

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERIA Y
DISEÑO.

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.

CURSO ACADÉMICO 2024 – 2025.

REUTILIZACIÓN, VALORIZACIÓN
Y RECICLAJE, UN CAMINO HACIA
LA SOSTENIBILIDAD EN OBRAS DE
RENOVACIÓN FERROVIARIA.

Autor: D. Pablo Roberto Segovia Becerra

Dirigido por: Dña. María José Cano Adán.

D. Juan Miguel Martínez Orozco.

Tabla de contenido

1. Introducción y contexto.....	8
1.1. Introducción.	8
1.2. Contexto actualizado.	14
1.2.1. Evolución de los GEI en la UE.....	14
1.2.2. Producción de residuos y tratamiento de los RCD.....	16
1.3. Presentación de la problemática.	22
1.4. Justificación del estudio.	22
2. Objetivos.....	23
2.1. Objetivos generales.....	23
2.2. Objetivos específicos.....	23
3. Estado del arte.	24
3.1. Conceptos previos.....	24
3.2. Origen de los residuos.	25
3.2.1. Industria de la minería.....	27
3.2.1.1. Minería de fosfatos.	28
3.2.1.2. Minería de carbón.....	28
3.2.1.3. Minería de hierro y cobre.	30
3.2.1.4. Minería de piedra ornamental.	32
3.2.2. Industria del acero.....	32
3.2.3. Industria petroquímica.....	34
3.2.4. Industria de la construcción.....	39
3.2.4.1. Valorización de RCD en Mezclas Bituminosas en frío.	39
3.2.4.2. Valorización de RCD en Mezclas bituminosas en caliente.	41

3.2.4.3.	<i>Valorización de RCD en capas de base en carreteras.....</i>	<i>42</i>
3.2.4.4.	<i>Valorización de RCD en rellenos de puertos.....</i>	<i>43</i>
3.2.4.5.	<i>Valorización de RCD en fabricación de hormigón.....</i>	<i>44</i>
3.2.4.6.	<i>Valorización de RCD para fabricación de cemento.....</i>	<i>45</i>
3.3.	<i>Obras de renovación y rehabilitación de líneas ferroviarias.....</i>	<i>45</i>
3.3.1.	<i>Conceptos previos:.....</i>	<i>45</i>
3.3.2.	<i>Descripción de las obras de renovación y/o rehabilitación ferroviaria.</i>	<i>47</i>
3.3.3.	<i>Elementos constitutivos de la sección transversal ferroviaria.</i>	<i>48</i>
3.3.4.	<i>Normativa aplicable y requisitos de los materiales a emplear en obras de renovación y/o rehabilitación.....</i>	<i>50</i>
4.	<i>Identificación de la necesidad / Gap en el conocimiento.....</i>	<i>50</i>
5.	<i>Propuesta metodológica.</i>	<i>52</i>
5.1.	<i>Clasificación de la línea actual y futura.</i>	<i>55</i>
5.2.	<i>Evaluación del material existente.....</i>	<i>57</i>
5.2.1.	<i>Carriles.</i>	<i>58</i>
5.2.2.	<i>Aparatos de vía.</i>	<i>60</i>
5.2.3.	<i>Traviesas.</i>	<i>61</i>
5.2.4.	<i>Balasto.</i>	<i>62</i>
5.2.5.	<i>Valoración del ahorro de costes económicos y ambientales.</i>	<i>64</i>
6.	<i>Aplicación a un caso de estudio. Reciclado del balasto como capa de forma, zahorra y subbalasto en una obra de renovación de vía ferroviaria.</i>	<i>65</i>
6.1.	<i>Presentación de la línea.....</i>	<i>65</i>
6.2.	<i>Ámbito de estudio.</i>	<i>66</i>
6.3.	<i>Aplicación de la metodología.</i>	<i>66</i>
6.4.	<i>Antecedentes del caso de estudio.</i>	<i>67</i>

6.5.	<i>Inspección de la explanada y del balasto existente.</i>	69
6.6.	<i>Caracterización del material de la explanada.</i>	70
6.7.	<i>Caracterización del balasto.</i>	73
6.7.1.	<i>Subbalasto.</i>	74
6.7.2.	<i>Zahorra.</i>	76
6.7.3.	<i>Capa de forma.</i>	79
6.8.	<i>Análisis del coste.</i>	82
6.8.1.	<i>Análisis del coste económico.</i>	82
6.8.2.	<i>Análisis del Coste ambiental basándonos en la generación de CO₂eq</i>	83
7.	<i>Interpretación de los resultados.</i>	85
8.	<i>Conclusiones.</i>	86
9.	<i>Futuras líneas de investigación.</i>	88
	<i>Bibliografía</i>	90

Tabla de imágenes

IMAGEN 1. ESQUEMA DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN CADA ALCANCE.(RANGANATHAN ET AL., N.D.).	12
IMAGEN 2. ESQUEMA DE ECONOMÍA CIRCULAR. (ECONOMÍA CIRCULAR - CONSILIUM, N.D.-A).....	12
IMAGEN 3. MATERIAS PRIMAS FUNDAMENTALES ESTRATÉGICAS. (ECONOMÍA CIRCULAR - CONSILIUM, N.D.-A) .	13
IMAGEN 4. ALGUNOS DE LOS PRODUCTOS ABARCADOS POR LA NORMATIVA SOBRE DISEÑO ECOLÓGICO. (ECONOMÍA CIRCULAR - CONSILIUM, N.D.-A).	13
IMAGEN 5. TARJETA ECOLÓGICA DE LA UE. (ECONOMÍA CIRCULAR - CONSILIUM, N.D.-A).	14
IMAGEN 6. GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA UE. (INDICATORS EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY’S HOME PAGE, N.D.).	15
IMAGEN 7. EMISIONES TOTALES BRUTAS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN ESPAÑA.(MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, 2024).....	16
IMAGEN 8. GENERACIÓN DE RESIDUOS POR ACTIVIDAD ECONÓMICA Y PAÍS EN 2022. (EUROSTAT, N.D.).	17
IMAGEN 9. GENERACIÓN DE RESIDUOS POR ACTIVIDAD ECONÓMICA EN 2022. (EUROSTAT, N.D.).	17
IMAGEN 10. FORMACIÓN DE LA EXPLANADA PARA CARRETERAS. (SECRETARÍA DE ESTADO DE INFRAESTRUCTURA, 2003).	25
IMAGEN 11. MATERIALES APTOS PARA FORMACIÓN DE EXPLANADAS DE FERROCARRIL. 1 DE 2. (MINISTERIO DE FOMENTO, 2015A).....	26
IMAGEN 12. MATERIALES APTOS PARA LA FORMACIÓN DE EXPLANADAS DE FERROCARRIL. 2 DE 2. (MINISTERIO DE FOMENTO, 2015A).	26
IMAGEN 13. PLANTAS DE ENERGÍA DE CARBÓN POR PAÍSES.(STATISTA, 2024A).....	30
IMAGEN 14. DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DEL GRANO DE LAS COLAS GRUESAS Y FINAS.(HU ET AL., 2017)	31
IMAGEN 15. CELDAS DE NEUMÁTICOS LISTAS PARA SER LLENADAS CON EL MATERIAL DE RELLENO GRANULAR. (INDRARATNA ET AL., 2022)	37
IMAGEN 16. PIEDRA DE BALASTO FERROVIARIO CON RECUBRIMIENTO DE CAUCHO DE POLVO DE NFU (ROYES ET AL., 2022).	38
IMAGEN 17. TIPOS DE REUTILIZACIÓN IN SITU CON EMULSIÓN.(MITMA, 2023).	40
IMAGEN 18. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE LOS ÁRIDOS UTILIZADOS EN LA MEZCLA A ENSAYAR.(NETO ET AL., 2020).....	41
IMAGEN 19. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PAQUETE DE FIRMES.....	43
IMAGEN 20. CURVA GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO FINO. NFA (NATURAL FINE AGGREGATE) RFA (RECYCLED FINE AGGREGATES) (PANGHAL & KUMAR, 2024).	44
IMAGEN 21. SECCIÓN TIPO FERROVIARIA.....	49
IMAGEN 22. CANTERAS DE BALASTO HOMOLOGADAS POR ADIF OCTUBRE 2020.	64
IMAGEN 23. SECCIÓN DE VÍA EXISTENTE EN RECTA. LÍNEA 530 MONFRAGÜE – PLASENCIA.	65
IMAGEN 24. SECCIÓN DE VÍA EXISTENTE EN CURVA. LÍNEA 530 MONFRAGÜE - PLASENCIA.....	66

IMAGEN 25. TIPOS DE PLATAFORMAS FERROVIARIAS SEGÚN SU CAPACIDAD PORTANTE. (MINISTERIO DE FOMENTO, 2015A).....	67
IMAGEN 26. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE DE LA PLATAFORMA.....	68
IMAGEN 27. SECCIÓN TRANSVERSAL FERROVIARIA.(MINISTERIO DE FOMENTO, 2015A).	69
IMAGEN 28. SECCIÓN TIPO RECTA BALASTO BAJO TRAVIESA.....	69
IMAGEN 29. CATA HILO ALTO PARA CLASIFICACIÓN DE BALASTO, BALASTO BAJO TRAVIESA Y CALIDAD DE EXPLANADA.	70
IMAGEN 30. CATA HILO BAJO PARA CLASIFICACIÓN DE BALASTO, BALASTO BAJO TRAVIESA Y CALIDAD DE EXPLANADA.	70
IMAGEN 31. RESULTADO ENSAYO CARACTERIZACIÓN SU 14.....	72
IMAGEN 32. RESULTADO ENSAYO CARACTERIZACIÓN SU 4.....	73
IMAGEN 33. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE SUBBALASTO A PARTIR DE BALASTO.	75
IMAGEN 34. ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE ZAHORRA A PARTIR DE BALASTO.	77
IMAGEN 35. ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE ZAHORRAS A PARTIR DE BALASTO.	78
IMAGEN 36. ENSAYO PARA CARACTERIZACIÓN DE CAPA DE FORMA A PARTIR DE BALASTO.	80
IMAGEN 37. EMISIONES DE CO ₂ EQ PARA DISTINTOS PRODUCTOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN. (AGGREGATES EUROPE & FEDERACIÓN DE ÁRIDOS, 2023).....	84

Tabla de gráficos

GRÁFICO 1. OBJETIVOS** DE LA UNIÓN EUROPEA RESPECTO A LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE 2013 A 2050. (STATISTA, N.D.) (AGENCIA EUROPEA DEL MEDIO AMBIENTE, 2016).....	15
GRÁFICO 2. GENERACIÓN DE RESIDUOS EN ESPAÑA. (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, 2024).	19
GRÁFICO 3. TRATAMIENTO FINAL DE RESIDUOS GENERADOS EN ESPAÑA.	19
GRÁFICO 4. PRINCIPALES RESIDUOS MINERALES GENERADOS POR LA CONSTRUCCIÓN.	20
GRÁFICO 5. TRATAMIENTO FINAL DE LOS RESIDUOS GENERADOS.....	21
GRÁFICO 6. TENDENCIAS PARA EL TRATAMIENTO FINAL DEL RESIDUO 12.6.....	21
GRÁFICO 7. TRATAMIENTO FINAL DE LOS RESIDUOS MINERALES DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN TOTALES EN EL AÑO 2022.....	22

Índice de tablas

TABLA 1. PARÁMETROS DE PRESTACIÓN PARA TRÁFICO DE PASAJEROS. (COMISIÓN EUROPEA, 2014).....	56
TABLA 2. PARÁMETROS DE PRESTACIÓN PARA TRÁFICO DE MERCANCÍAS. (COMISIÓN EUROPEA, 2014)	57
TABLA 3. IDENTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES EXISTENTES EN OBRA.	58
TABLA 4. RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA EXPLANADA.	71
TABLA 5. RESUMEN DE PRUEBAS EN MACHAQUEO DE BALASTO.....	74
TABLA 6. TABLA COMPARATIVA PARA VALIDACIÓN DE SUBBALASTO.	76

TABLA 7. TABLA COMPARATIVA PARA LA VALIDACIÓN DE ZAHORRAS.....	79
TABLA 8. TABLA COMPARATIVA PARA VALIDACIÓN DE CAPA DE FORMA.....	81
TABLA 9. COSTE ECONÓMICO SIN RECICLADO DE BALASTO POR KM DE RENOVACIÓN DE VÍA SIMPLE.....	82
TABLA 10. COSTE ECONÓMICO CON RECICLADO DE BALASTO POR KM DE RENOVACIÓN DE VÍA SIMPLE.	83
TABLA 11. COSTE SIN RECICLADO DE BALASTO POR KM DE RENOVACIÓN DE VÍA SIMPLE.....	84
TABLA 12. COSTE CON RECICLADO DE BALASTO POR KM DE RENOVACIÓN DE VÍA SIMPLE.	85
TABLA 13. ALINEACIÓN DEL TRABAJO CON LOS ODS	88

Índice de esquemas

ESQUEMA 3.2-1. DESECHOS DE LAS DISTINTAS INDUSTRIAS Y SU APLICACIÓN EN OBRA CIVIL.	27
ESQUEMA 5-1. PROPUESTA METODOLÓGICA DE ECONOMÍA CIRCULAR EN OBRAS DE RENOVACIÓN Y/O REHABILITACIONES FERROVIARIAS.	55
ESQUEMA 5.1-1. CLASIFICACIÓN INICIAL DE LA LÍNEA.	55
ESQUEMA 5.1-2. CLASIFICACIÓN DE LA FUTURA LÍNEA.	56
ESQUEMA 5.2-1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA TOMA DE DECISIONES DE LOS MATERIALES.....	57
ESQUEMA 5.3-1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA TOMA DE DECISIONES EN EL USO DEL CARRIL.....	59
ESQUEMA 5.4-1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EL USO DE LOS APARATOS DE VÍA.	60
ESQUEMA 5.5-1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EL USO DE LAS TRAVIESAS.	61
ESQUEMA 5.6-1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EL USO DEL BALASTO.....	62

1. Introducción y contexto.

1.1. Introducción.

En la actualidad, los niveles de contaminación atmosférica en Europa siguen sin ser seguros, por ello es necesario seguir trabajando para proteger la salud de los ciudadanos frente a los efectos negativos de la contaminación.

La contaminación del aire representa la presencia en él de agentes químicos, físicos o biológicos que alteran las características naturales de la atmósfera. Las instalaciones industriales y la construcción suponen una fuente habitual de contaminación.

A pesar de las mejoras en la calidad del aire registradas durante los últimos años, el nivel de contaminantes sigue superando las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS), especialmente en Europa Central, Oriental y en Italia.

La calidad del aire está estrechamente relacionada con el clima del planeta y los ecosistemas de todo el mundo. Dentro de las fuentes de contaminación atmosférica nos encontramos el consumo doméstico de energía para cocinar y calentarse, los vehículos de combustión, la generación de energía, la incineración de residuos y desechos agrícolas, y la industria. Gran parte de las fuentes de contaminación son empleadas en la construcción ya sea para el transporte de materiales con la combustión de los vehículos como en la propia industria.

Por todo ello, las políticas y las inversiones que respaldan medidas integradas de apoyo al uso sostenible de la tierra, el uso doméstico de energía y los medios de transporte menos contaminantes, las viviendas con mejor eficiencia energética, la generación de electricidad, la industria y la mejor gestión municipal de residuos pueden reducir eficazmente las principales fuentes de contaminación atmosférica. Así, conseguiremos estrategias beneficiosas para el clima y la salud, debido a la reducción de la carga de morbilidad y la ayuda a mitigar el cambio climático a corto y largo plazo.

Desde el 2015 se inicia el desarrollo del “Acuerdo de París”(ONU, 2015), que entró en vigor en noviembre de 2016. Se desarrolló por la Conferencia De París sobre Cambio Climático (COP21). Este acuerdo supone un hito en el proceso multilateral del cambio climático en el que todos los países deberían emprender medidas para combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos.

Su objetivo es limitar el calentamiento mundial por debajo de 2º centígrados, preferiblemente a 1, 5º centígrados en comparación con los niveles de calentamiento global que había en la era preindustrial. Para alcanzar este objetivo de temperatura a largo plazo, los países se proponen alcanzar el máximo de las emisiones de gases de efecto invernadero para lograr un planeta con clima neutro para el 2050.

El Acuerdo de París reafirma que los países desarrollados deben tomar la iniciativa en la prestación de asistencia financiera a los países menos dotados y más vulnerables. La financiación del clima es necesaria para la mitigación, ya que se requieren inversiones en gran escala para reducir significativamente las emisiones, efectos adversos y reducir los efectos de un clima cambiante.

Aunque es necesario aumentar en gran proporción las medidas relativas al cambio climático para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París, los años transcurridos desde su entrada en vigor ya han dado lugar a soluciones con bajas emisiones de carbono y a nuevos mercados. Cada vez más países, regiones, ciudades y empresas están estableciendo objetivos de neutralidad de carbono. Las soluciones de cero emisiones se están volviendo competitivas en todos los sectores económicos y ya representan el 25 % de las emisiones. Esta tendencia es más notoria en los sectores de la energía y el transporte. Para el 2030, las soluciones de cero emisiones de carbono podrían ser competitivas en sectores que representan más del 70 % de las emisiones mundiales.

A raíz del Acuerdo de París, en 2019 la Unión Europea inició una estrategia de crecimiento sostenible denominada “Pacto Verde Europeo” (European Council, n.d.), que consiste en un paquete de iniciativas políticas encaminadas a una transición ecológica con el objetivo último de alcanzar una neutralidad climática para el 2050.

El principal objetivo de este pacto verde europeo es el de conseguir de la Unión Europea una zona climáticamente neutra para el año 2050 reduciendo la contaminación y restableciendo el sano equilibrio en la naturaleza y los ecosistemas. Para alcanzar este logro se fijan unos objetivos específicos como son las Neutralidad Climática, que consiste en la reducción drástica de las emisiones de gases de efecto invernadero, la Economía Circular mediante un nuevo modelo económico en el que los productos se reutilizan, se separan y se reciclan para reducir así los residuos y conservar los recursos, una Industria Limpia más sostenible y eficiente desde un punto de vista energético, un Medio Ambiente más Saludable restaurando la naturaleza y trabajando para una contaminación cero con el fin de conseguir un medio ambiente más saludable para las futuras generaciones, unas Prácticas Agrícolas encaminadas a obtener alimentos más saludables y asequibles al tiempo que se protege al medio ambiente y como último objetivo Justicia y Equidad Climática para hacer que esta transición sea justa e inclusiva ayudando a las personas más afectadas sin dejar a nadie atrás.

Dentro de este Pacto Verde Europeo, se establece la “Ley Europea del Clima”(Unión Europea, 2021), por la que se establece un objetivo legal para alcanzar una neutralidad climática antes del 2050, además de una reducción del al menos el 55% de las emisiones netas de gases de efecto invernadero en comparación con 1990. Se establece la necesidad de mejorar el sumidero de carbono (Parlamento europeo, 2018). Además del Pacto Verde Europeo, está el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), que es el principal órgano internacional encargado de evaluar si se siguen de forma adecuada las medidas adoptadas.

Con los objetivos de la neutralidad del carbono, es decir cuando se consiga que se emita la misma cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera de la que se retira por diferentes vías, conseguiremos un balance cero y una disminución del impacto medioambiental (Parlamento Europeo, 2023).

El sector de la construcción representa actualmente el 50% de la extracción y el consumo de los recursos, el 40% del consumo energético, genera más del 30% del total de los residuos y es responsable del 36 % de las emisiones de gases de efecto invernadero que se producen cada año en la Unión Europea (UE) por lo que en noviembre del 2024 el Consejo Europeo revisó el reglamento sobre los productos de construcción estableciendo nuevos requisitos para garantizar que tanto el diseño como la fabricación de los materiales para la construcción sean más duraderos, reparables, reciclables y fáciles de remanufacturar (Consejo Europeo, 2019).

El pacto verde requiere que todos los ámbitos políticos contribuyan y se generen medidas en todos los sectores. Las acciones para frenar el calentamiento global deben ser imperativas para el futuro de la unión europea y el bienestar de sus ciudadanos.

Con este fin se creó el paquete de medidas «Objetivo 55» en julio de 2021 para cumplir los requisitos de la legislación europea sobre el clima en el sentido de disminuir las emisiones netas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Europa en al menos un 55 % de aquí a 2030 (Comisión Europea, 2023a).

Los GEI se miden a través de la huella de carbono que se define como “la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto” (MITECO, 2024).

Podemos distinguir entre:

- Huella de carbono de una organización. Se analizan las emisiones de GEI de una organización a lo largo de un año o periodo determinado, generando un inventario de estas. Los estándares más utilizados son: GreenHouse gas (GHG) Protocol (Ranganathan et al., n.d.) e International Organization for Standardization (ISO) 14064-1.(UNE-EN_ISO_14064-1=2019, n.d.).
- Huella de carbono de producto. Se analizan todas las emisiones de GEI realizadas durante el Ciclo de Vida del producto o servicio analizado. Los estándares más utilizados son: PAS 2050:2011, ISO/TS 14067:2013, con el apoyo de ISO 14040 e ISO 14044 para la elaboración del Análisis de Ciclo de Vida.

El análisis de huella de carbono nos proporciona un indicador ambiental global de la actividad que se desarrolla en una organización. La huella de carbono se configura como punto de referencia básico para el

inicio de las actuaciones en la reducción de consumo de energía y para la utilización de recursos y materiales, con el fin de mejorar el comportamiento medioambiental.

Centrándonos en las emisiones asociadas a las operaciones de una organización las podemos clasificar en emisiones directas o indirectas:

- Emisiones directas de GEI: son las emisiones de fuentes que son propiedad o están bajo el control de la organización. Podrían entenderse como las emisiones liberadas “in situ” donde se produce la actividad, por ejemplo, las emisiones debidas al sistema de calefacción por la quema de combustibles fósiles.
- Emisiones indirectas de GEI: son las emisiones producidas por las actividades de la organización, pero que ocurren en las fuentes que son propiedad o están bajo el control de otra organización diferente. Por ejemplo, la emisión procedente del consumo de la electricidad, cuyas emisiones han sido producidas en el lugar en el que se generó dicha electricidad.

Cuando hablamos de la huella de carbono de una organización y de las fuentes emisoras que se analizan en su cálculo, recurrimos al término “Alcance”, que podemos clasificarlo en 1, 2 y 3 (Imagen 1).

- Alcance 1: emisiones directas de GEI. Por ejemplo, emisiones que provienen de la combustión en calderas, hornos, vehículos, etc., que son propiedad o están bajo el control de la misma entidad. También se incluyen las emisiones fugitivas (p.ej. fugas de aire acondicionado, fugas de CH₄ de conductos, etc).
- Alcance 2: emisiones indirectas de GEI asociadas a la generación de electricidad adquirida y consumida por la organización.
- Alcance 3: otras emisiones indirectas, como, por ejemplo: la extracción y producción de materiales que adquiere la organización, los viajes de trabajo a través de medios externos, el transporte de materias primas, de combustibles y de productos realizados por terceros, o la utilización de productos o servicios ofrecidos por otros.

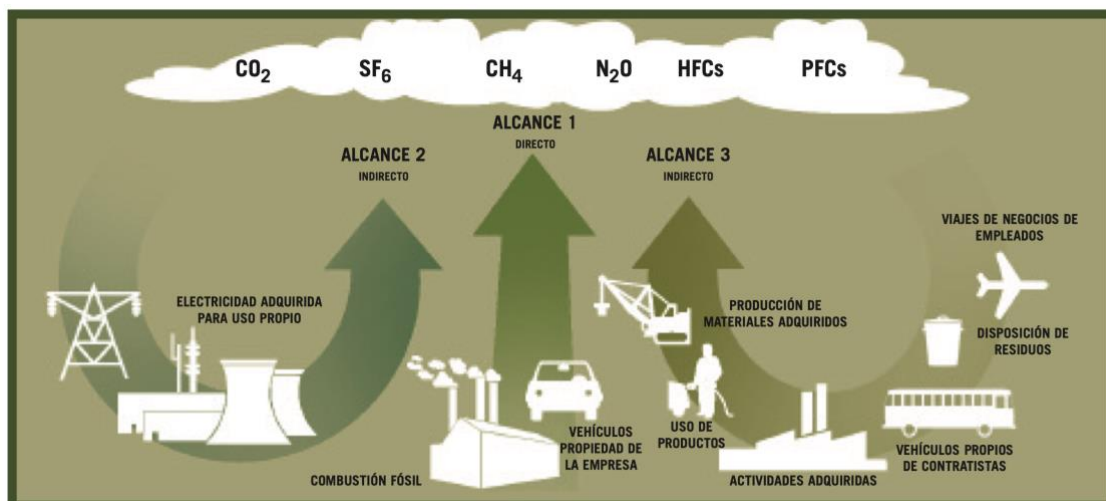


Imagen 1. Esquema de los elementos que componen cada alcance. (Ranganathan et al., n.d.).

Para reducir estos GEI y conseguir la neutralidad climática de la UE de aquí a 2050 es fundamental disociar el crecimiento económico del uso de los recursos y pasar a sistemas circulares en la producción y el consumo (Consejo Europeo, 2019). Para ello el pacto verde de la UE contiene el plan de acción de economía circular en el que incluía medidas para promover el consumo sostenible y garantizar que haya menos residuos.

Para ello el pacto verde europeo propone un Plan de Acción para la Economía Circular con 35 medidas de actuación para garantizar el desarrollo de productos sostenibles y la circularidad de los procesos de producción. Este plan de acción constituye un elemento fundamental del Pacto Verde Europeo y está estrechamente ligado a la Estrategia Industrial para Europa estableciendo un amplio marco de actuación para acelerar la transición hacia un modelo de crecimiento regenerativo.

Un modelo económico basado en la economía circular tiene como objetivos principales el uso compartido, la reparación, la reutilización y el reciclado de productos y materiales durante el mayor tiempo posible. Estos objetivos supondrían la menor utilización de recursos naturales reduciendo así la dependencia de materias primas y la emisión de GEI (*Economía Circular - Consilium*, n.d.-a).

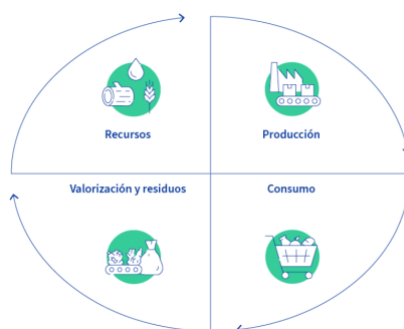


Imagen 2. Esquema de economía circular. (*Economía Circular - Consilium*, n.d.-a).

Uno de los principales objetivos de este modelo económico de economía circular es la reducción de la demanda de materias primas aumentando el reciclado de los materiales para que vuelvan al ciclo de producción. El objetivo fijado por la UE es que para el año 2030 el 25% de los materiales deben proceder del reciclado según el Reglamento de Materias Primas Fundamentales.



Imagen 3. Materias primas fundamentales estratégicas. (Economía Circular - Consilium, n.d.-a).

Otro de los objetivos es el Diseño de Productos Sostenibles que mediante el Reglamento sobre el Diseño Ecológico establece requisitos de eficiencia energética que abarcan 31 grupos de productos, entre los que se encuentran el acero y el aluminio, neumáticos, productos químicos entre otros, estimando un ahorro de 120.000 millones de euros de ahorro energético. Este Reglamento garantiza que los productos sean más duraderos y puedan repararse para que los consumidores puedan tomar decisiones más sostenibles.



Acero y aluminio



Productos textiles



Neumáticos



Muebles



Productos químicos, entre ellos los detergentes



Lavavajillas y televisiones

Imagen 4. Algunos de los productos abarcados por la normativa sobre diseño ecológico. (Economía Circular - Consilium, n.d.-a).

Además de prolongar la vida de los productos, la UE tiene también como objetivo un Empoderamiento de los Consumidores mediante una directiva para garantizar que las empresas hagan alegaciones engañosas sobre las ventajas medioambientales de sus productos y servicios y añadiendo una etiqueta armonizada con información sobre la garantía comercial de durabilidad que ofrecen los productores para que los consumidores puedan tomar decisiones más fundamentadas y sostenibles a la hora de adquirir un producto. Para ello se ha puesto en marcha un sistema de certificación como la tarjeta ecológica de UE.



Imagen 5. Tarjeta ecológica de la UE. (Economía Circular - Consilium, n.d.-a).

Dentro de la economía circular todos los residuos se pueden convertir en un recurso cerrando así el círculo de este modelo económico. La legislación de la UE establece las normas como la Directiva Marco sobre Residuos en vigor desde el 2020 (*Economía Circular - Consilium, n.d.-b*) para la transformación de estos residuos en nuevos recursos y productos.

A pesar de que la transición ecológica tendrá un coste elevado, el coste de la inacción sería mucho mayor. Se calcula que, si no se establecen medidas para evitar el calentamiento global, los daños globales podrían ascender hasta al 12% del producto interior bruto (PIB) (Galceranb-Vercher & Bouchet, 2023).

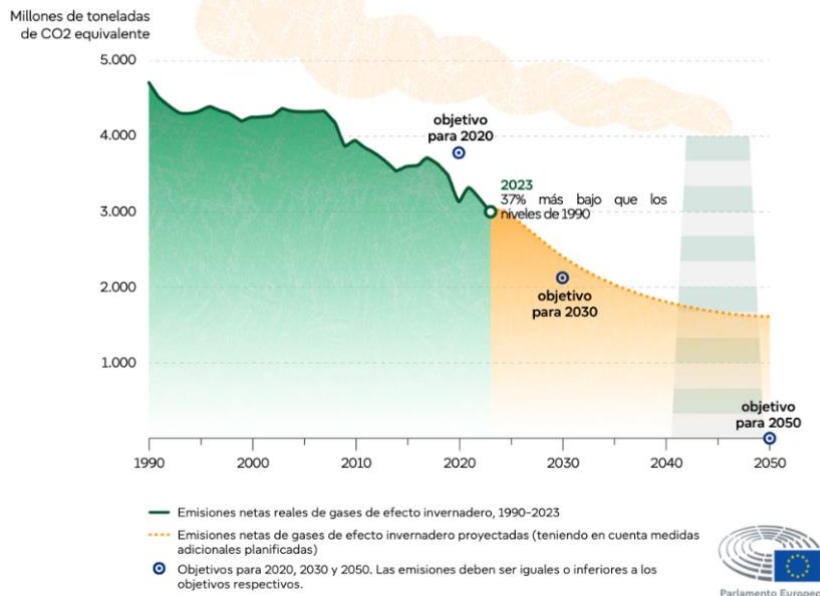
1.2. Contexto actualizado.

1.2.1. Evolución de los GEI en la UE.

Como se puede ver en la Imagen 6 y en el Gráfico 1 estamos muy lejos de conseguir los objetivos de neutralidad de carbono propuestos por el Parlamento Europeo para 2050. Según las proyecciones de la agencia europea del medio ambiente estamos bastante lejos de conseguir este hito.

Gases de efecto invernadero en la UE:

datos históricos, proyecciones y objetivos
1990-2050



Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente

Imagen 6. Gases de efecto invernadero en la UE. (Indicators | European Environment Agency's Home Page, n.d.).

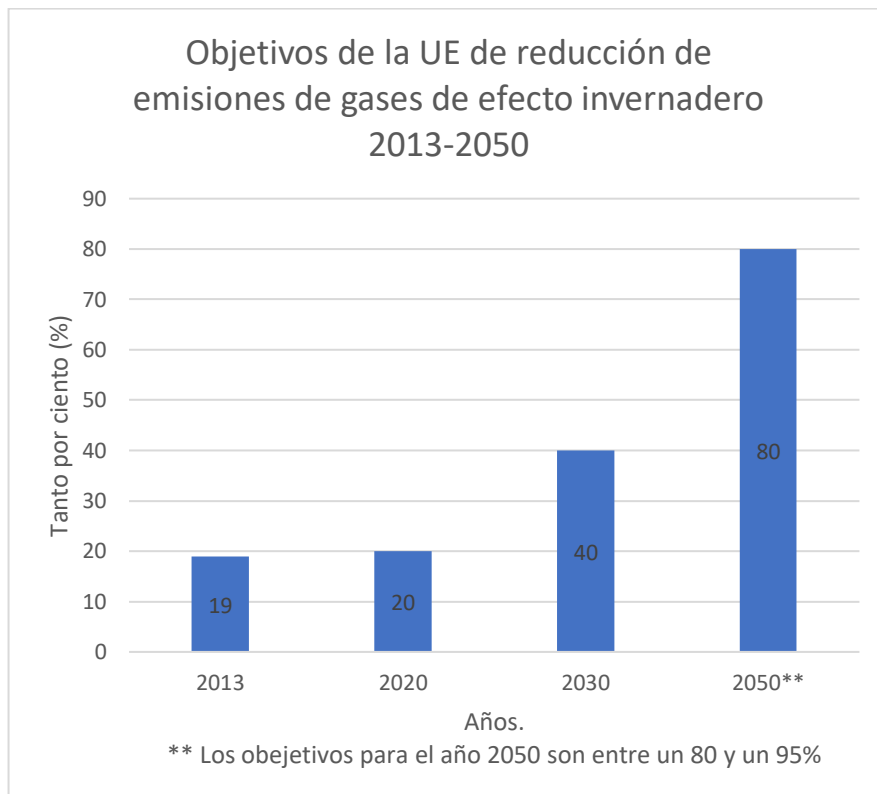


Gráfico 1. Objetivos** de la Unión Europea respecto a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de 2013 a 2050. (Statista, n.d.) (Agencia Europea del medio ambiente, 2016).

A nivel europeo, el sector de la construcción ha experimentado un importante descenso de sus emisiones de GEI, más de un 30% de reducción respecto a 2005 en 2023 (Parlamento Europeo, 2024) , esto no es suficiente para alcanzar los objetivos generales del 2050.

Por otro lado, si nos fijamos en España, el descenso de los GEI en 2023 con respecto a 1990 en emisiones brutas ha sido de un 5,8% (Imagen 7) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024) muy lejos de las exigencias de la Comisión Europea, si es verdad que durante los años desde el 2005 hasta el 2023 se está haciendo un esfuerzo considerable para la reducción de estos GEI con una reducción del 38,1% liderada principalmente por la generación de electricidad con fuentes renovables.

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Emisiones GEI (kt CO ₂ -eq)	286.655	325.728	381.945	436.341	353.628	331.965	269.803	287.569	292.297	269.968
Variación respecto a 1990		+13,6 %	+33,2 %	+52,2 %	+23,4 %	+15,8 %	-5,9 %	+3 %	+2, %	-5,8 %
Variación respecto a 2005					-19,0 %	-23,9 %	-38,2 %	-34,1 %	-33,0 %	-38,1 %

Imagen 7. Emisiones totales brutas de gases de efecto invernadero en España.(Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024).

Una de las medidas para disminuir estos GEI propuesta por la comisión europea es el paquete legislativo sobre economía circular, que entró en vigor en el 2017, que establece objetivos de reciclaje que los países comunitarios deberán lograr en 2030 con las siguientes cuotas de reciclaje de residuos: un 80% del papel y el cartón, un 70 % de los envases, un 80 % de los metales ferrosos, un 75 % del vidrio, un 60 % del aluminio.

En la actualidad, el sector de la industria de la construcción se enfrenta a un desafío creciente relacionado con la emisión de GEI generados, no solo por la extracción de materias primas y su puesta en obra, sino también por los residuos generados.

1.2.2.Producción de residuos y tratamiento de los RCD.

En el año 2022 los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) generados en la Unión Europea fueron del del 38,4% de la generación total de los residuos que ascendió a un total de 2.233 millones de toneladas (Eurostat, n.d.) lo que supone un total de 857,7 Millones de Toneladas de RCD. Así mismo la minería supuso un total de un 23% que ascendería a 513,59 millones de toneladas.

En la Imagen 8 se muestran las toneladas de residuos de cada uno de los países componentes de la UE por actividades.

Waste generation by economic activities and households, 2022 (% share of total waste)							
	Mining and quarrying	Manufacturing	Energy	Waste/water	Construction and demolition	Other economic activities	Households
EU	22.7	10.3	3.0	10.5	38.4	8.1	9.0
Belgium	0.0	12.6	0.2	24.7	41.4	13.4	7.7
Bulgaria	72.4	5.5	10.0	4.4	1.6	3.5	2.6
Czechia	0.3	12.5	1.0	13.5	43.8	17.9	11.0
Denmark	0.1	5.6	4.0	7.7	56.1	10.0	16.6
Germany	1.3	14.4	2.1	13.1	55.1	4.7	9.4
Estonia	11.5	17.2	50.2	3.5	9.0	6.0	2.6
Ireland	8.8	31.3	1.6	13.4	18.5	14.3	12.0
Greece(*)	11.6	14.5	5.8	13.5	33.5	7.8	13.4
Spain	7.0	12.0	0.8	19.6	30.6	9.9	20.0
France	0.1	5.3	0.2	7.3	71.6	5.3	10.0
Croatia	10.0	7.6	1.4	20.1	24.8	18.8	17.3
Italy	0.8	14.9	1.2	21.5	42.5	3.8	15.3
Cyprus	5.4	15.0	0.1	12.5	28.0	26.3	12.7
Latvia	0.1	12.3	1.1	36.3	12.5	9.9	28.0
Lithuania	0.4	19.2	3.8	23.1	9.9	18.7	24.9
Luxembourg	8.2	6.0	0.2	4.5	75.3	3.2	2.6
Hungary	0.2	16.0	18.3	4.0	37.4	6.2	17.9
Malta	1.5	0.9	0.0	6.4	77.7	6.1	7.4
Netherlands	0.1	10.8	0.5	7.7	64.7	9.5	6.8
Austria	0.0	7.9	0.6	3.9	76.6	4.9	6.1
Poland	36.5	14.8	7.9	13.9	12.3	6.6	8.0
Portugal	0.2	15.7	1.1	20.5	19.7	15.6	27.2
Romania	85.2	4.1	3.4	1.8	0.5	2.1	2.8
Slovenia	0.1	12.9	4.3	3.4	6.6	67.0	5.7
Slovakia	1.2	27.0	6.7	9.4	9.8	26.5	19.4
Finland	76.4	9.4	0.9	1.0	9.6	1.2	1.5
Sweden (*)	77.3		1.2	5.2	8.3		2.6
Iceland (*)	0.0	24.2	0.0	2.0	3.6	31.0	39.2
Liechtenstein	0.0	0.6	0.0	0.3	91.8	0.1	7.3
Norway	1.6	13.9	2.0	8.7	39.3	18.7	15.9
Montenegro	21.0	1.8	26.6	0.7	18.4	11.2	20.2
North Macedonia	26.1	25.8	0.5	11.5	3.4	6.1	26.6
Serbia	93.2	0.6	3.7	0.5	0.4	0.3	1.3
Türkiye	24.1	20.3	25.4	0.3	0.0	5.3	24.6
Albania (*)	1.0	68.0	0.0	6.2	0.0	24.9	0.0
Bosnia and Herzegovina	0.2	35.6	47.2	0.0	1.6	0.5	15.0
Kosovo (*)	0.3	10.2	84.6	0.4	2.5	2.0	0.0

Imagen 8. Generación de residuos por actividad económica y país en 2022. (Eurostat, n.d.).

En la siguiente imagen (Imagen 9) se muestran las toneladas totales de residuos generadas en la Unión Europea por tipos de actividad económica. La construcción es la actividad económica que más residuos genera, con el 38 % en el año 2022, seguida de la minería con un 23%.

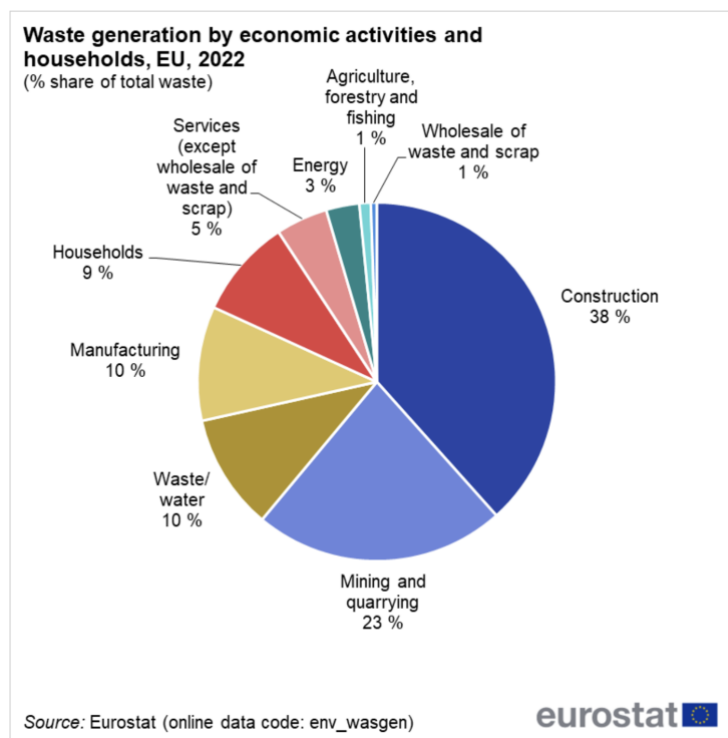


Imagen 9. Generación de residuos por actividad económica en 2022. (Eurostat, n.d.).

En Europa los residuos minerales importantes representan una gran parte de los residuos totales (64%). Son aquellos que proceden de la minería, las canteras, la construcción y la demolición. Si dejamos de lado los residuos minerales importantes, las mayores fuentes de residuos en 2022 fueron los servicios de residuos y agua (216 millones de toneladas), los hogares (193 millones de toneladas) y las actividades manufactureras (166 millones de toneladas) (*El Trabajo de La UE Para La Gestión Sostenible de Residuos | Temas | Parlamento Europeo*, n.d.) .

En el Gráfico 2 podemos observar la evolución de la generación de residuos en España en el periodo 2015-2022 de las industrias que, como veremos más adelante en este trabajo, generan residuos que se podrían valorizar en obras de construcción. En la gráfica vemos que en 2022 la industria de la construcción lideraba estas listas en España con un total de 36,238 millones de toneladas, lo que supone un 32,91% del total de residuos generados ligeramente por debajo de la media de la UE con un 38%, lo que supone una disminución de un 2,23% sobre el año anterior.

La segunda industria que más residuos genera en España es, sorprendentemente, la industria de recogida, tratamiento y eliminación de residuos con un total en el año 2022 de 22,31 millones de toneladas que supone un 15,48% del total de los residuos generados en España.

El resto de las industrias comparadas estarían muy por debajo de estos porcentajes, siendo la industria metalúrgica la tercera que más residuos genera con 4,95 millones de toneladas en el año 2022.

El dato quizás más llamativo es el de la industria extractiva que generó únicamente 0,184 millones de toneladas en el año 2022 cuando en años anteriores rondaba los 20 millones de toneladas.

Si observamos las tendencias de estos siete años vemos que, salvo la industria extractiva, el resto de las actividades permanecen constantes en la generación de residuos, en lugar de tener una tendencia negativa.

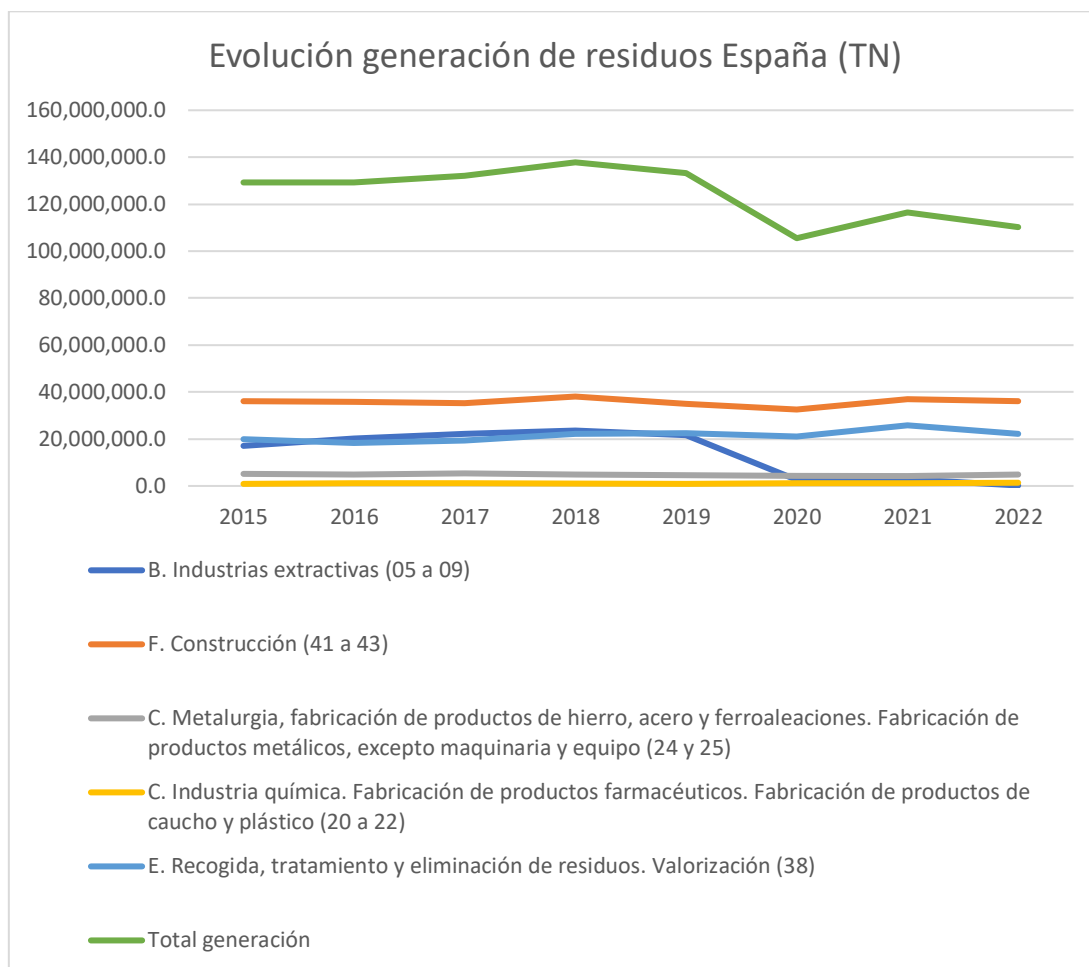


Gráfico 2. Generación de residuos en España. (Instituto Nacional de Estadística, 2024).

En el Gráfico 3 se puede ver como en el año 2022 en España solamente se reciclaron el 54,71% del total de residuos generados.

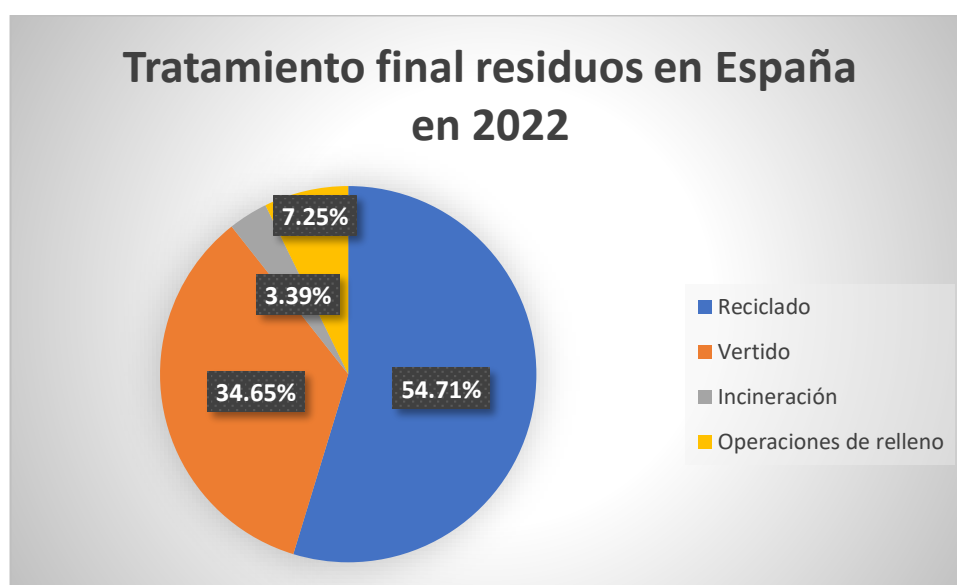


Gráfico 3. Tratamiento final de residuos generados en España.

Si particularizamos en la industria de la construcción tenemos que de todos los residuos generados en la construcción un 99,11% de estos residuos están clasificados según la CERT-stat Rev 4 (INE, n.d.) como residuos de minerales naturales y de estos residuos un 99,48% son No Peligrosos (NP).

Y dentro de estos residuos minerales naturales No Peligrosos los dos subproductos mayoritarios generados son los Residuos Minerales de Construcción y Demolición NP con 13,56 millones de toneladas en 2022 y los Suelos NP con 22,16 millones de toneladas, suponiendo entre ambos un total del 98,58% del total de los residuos generados por la industria de la construcción.

En los últimos 7 años la generación de estos residuos se ha mantenido estable como se puede ver en el Gráfico 4.

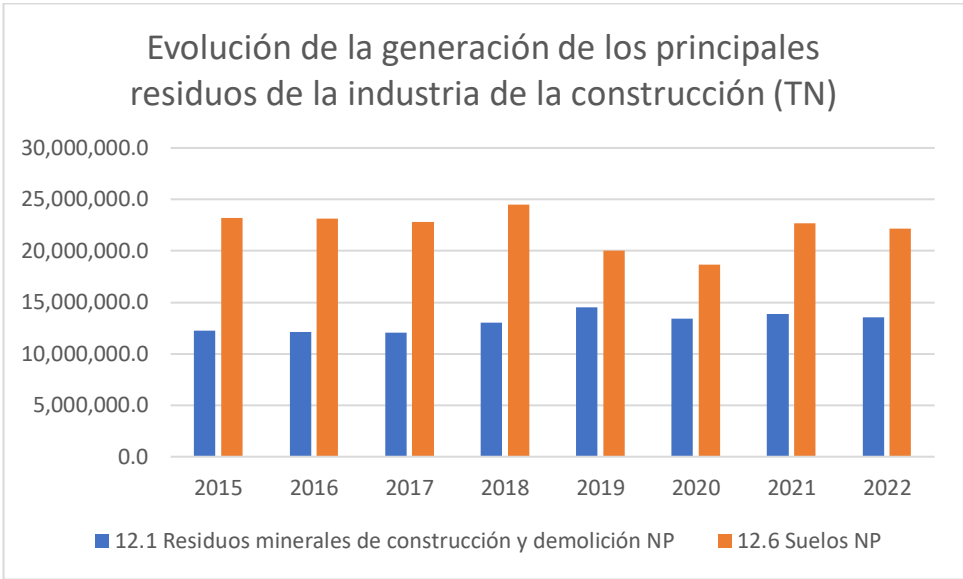


Gráfico 4. Principales Residuos minerales generados por la construcción.

En cuanto al tratamiento final de los residuos minerales de construcción y demolición NP podemos observar en el Gráfico 5 como, existe una tendencia creciente en el reciclado de éstos. Por otra parte, también existe una tendencia al alza en los vertidos, tan solo tienden a la baja los residuos utilizados para rellenos.

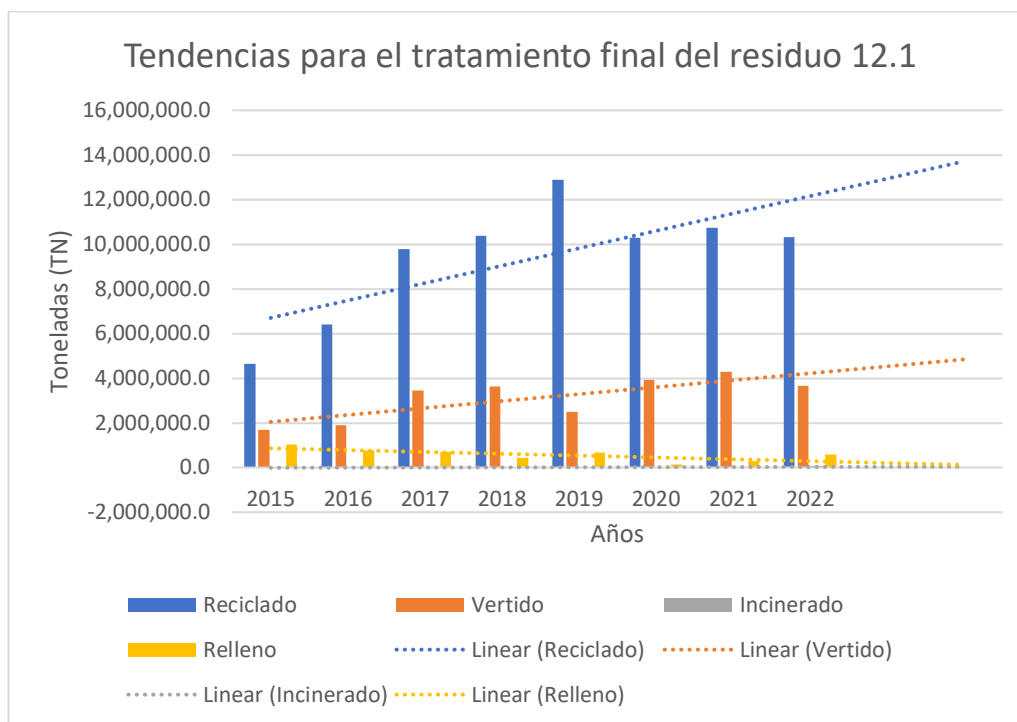


Gráfico 5. Tratamiento final de los residuos generados.

Si nos fijamos en los tratamientos finales para el residuo de Suelo NP, según nos muestra Gráfico 6, podemos ver que la tendencia actual es a aumentar el reciclado de éste, disminuyendo su uso para rellenos y vertidos.

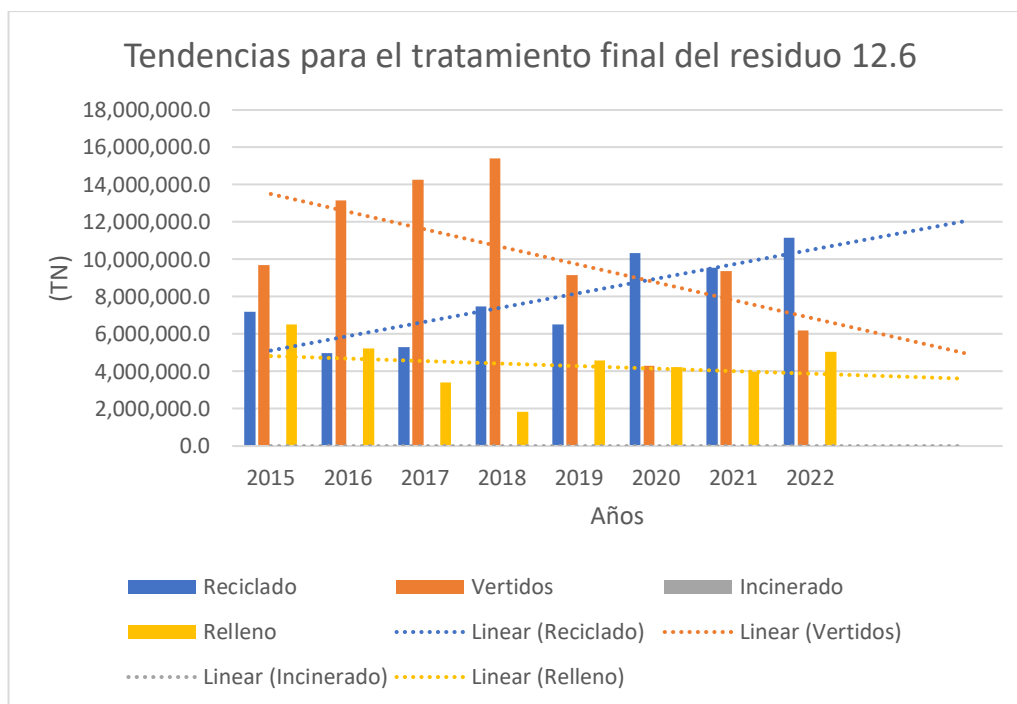


Gráfico 6. Tendencias para el tratamiento final del residuo 12.6.

En el Gráfico 7 se puede ver mejor lo sucedido con ese tipo de residuos en el año 2022, en el que se recicló casi el 58% de ese tipo de residuo, muy lejos del objetivo del reciclado del 100%.



Gráfico 7. Tratamiento final de los residuos minerales de construcción y demolición totales en el año 2022.

1.3. Presentación de la problemática.

A pesar del gran esfuerzo que se está haciendo por parte de la industria de la construcción, todavía estamos muy lejos de poder cumplir los objetivos propuestos por la comisión europea tanto en la emisión de GEI como en el reciclado de residuos. Estos objetivos son muy necesarios para alcanzar la neutralidad del carbono propuesta por la Comisión Europea para 2050. Esto pone de manifiesto la necesidad urgente de encontrar soluciones sostenibles para el manejo y reutilización de los RCD y de los residuos de derivados de la actividad de la minería y extracción de materiales. La reutilización de estos dos tipos de residuos en obras nuevas se presenta como una alternativa clave para reducir los GEI y optimizar los recursos naturales, favoreciendo la economía circular en lugar del modelo tradicional de extracción y fabricación de materiales nuevos. La valorización de estos residuos en obras de construcción contribuye a la disminución de la cantidad de residuos enviados a vertederos y por lo tanto a la sostenibilidad de la industria de la construcción.

1.4. Justificación del estudio.

La neutralidad climática para el año 2050 es el objetivo principal y más ambicioso de la UE. Para ello se están redactando reglamentos y directivas con objetivos parciales que ayuden a esta neutralidad climática mediante la reducción de los GEI. La reducción de estos GEI conllevaría efectos muy positivos para toda

la sociedad como son la mitigación del cambio climático mediante la reducción del aumento de la temperatura global del planeta reduciendo así los fenómenos meteorológicos extremos, además de una mejora en la calidad del aire contribuyendo a una mejora de la salud en la población. Para la reducción de estos GEI, uno de los objetivos es potenciar la economía circular mediante la producción de productos más duraderos, reparables, reutilizables y reciclables.

El uso de estos materiales en la industria de la construcción es una necesidad si queremos conseguir una industria sostenible y adaptada a las demandas de la sociedad actual. Con la reutilización, valorización y reciclado de materiales se consigue reducir el impacto ambiental asociado a la extracción de recursos naturales y el consumo de energía. Además, de esta manera, se fomenta la economía circular alargando la vida de los materiales puestos en obra y disminuyendo los residuos que hay que transportar a vertedero contribuyendo a la sostenibilidad del sector en los tres pilares fundamentales como son el social, mediante la creación de empleo verde, el pilar económico, mediante la disminución del coste de las obras utilizando materiales ya fabricados y puestos en obra además del coste económico que supone el traslado de estos materiales a vertedero y el pago de su canon, y el pilar medioambiental mediante la disminución de la generación de residuos y la menor emisión de GEI.

Por todo lo anterior, dentro de las obras de renovación ferroviaria, habría que hacer el esfuerzo de caracterizar previamente todo el material disponible, tanto en la misma obra de renovación como en el entorno, y analizar de qué manera se puede reutilizar, valorizar o reciclar dentro de la misma obra para poder alcanzar esta sostenibilidad de las obras de renovación ferroviaria.

2. Objetivos.

2.1. Objetivos generales.

Como objetivo generales vamos a analizar las distintas posibilidades de reutilización, valorización y reciclado de los materiales existentes en obras de rehabilitación y/o renovación ferroviaria basándonos en la economía circular con el fin de crear un catálogo para utilizarlos dentro de la misma obra, ya sea con empleo directo, como los materiales que puedan ser reutilizables, para desempeñar la función para la que fueron creados y así alargar su vida útil, como empleándolos como materiales auxiliares, para otras unidades de obra en las que, mediante una transformación inicial del material sea valorizables en otras unidades de obra, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental, social y económica de las obras de renovación y/o rehabilitación ferroviarias.

2.2. Objetivos específicos.

Para la consecución del objetivo de sostenibilidad en obras de renovación ferroviaria tenemos los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar una revisión documental para conocer el estado actual de la línea, el origen y las posibilidades de uso de los materiales aprovechables en obras de rehabilitación/renovación ferroviaria, así como la normativa implicada.
2. Plantear un procedimiento general para la selección y valorización de los residuos en obra.
3. Aplicar el procedimiento a un caso práctico.
4. Evaluar los costes en términos de sostenibilidad.
5. Evaluar la pertinencia y aplicabilidad de la metodología planteada para facilitar la optimización en el uso de residuos de obra.

3. Estado del arte.

3.1. Conceptos previos.

La Ley 22/2011 (Jefatura del estado, 2011) junto con sus modificaciones incluidas en Ley 5/2013 (Jefatura del estado, 2013) de residuos y suelos contaminados establece una caracterización de los residuos generados como peligrosos y no peligrosos según establece la Lista Europea de Residuos (LER) en la Decisión 2000/532/CE (Comisión Europea, 2000) de la Comisión Europea, que posteriormente se ha modificado por la Decisión 2014/955/UE (Comisión Europea, 2014).

Esta misma ley define como residuos industriales los residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre.

Por otra parte, define como residuo peligroso los residuos que presenta una o varias de las características peligrosas enumeradas en el anexo III de dicha ley, y aquél que pueda aprobar el Gobierno de conformidad con lo establecido en la normativa europea o en los convenios internacionales de los que España sea parte, así como los recipientes y envases que los hayan contenido.

La valorización se entiende como cualquier operación cuyo resultado principal sea 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, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general.

Por otra parte, el reciclado se define como toda operación de valorización mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad original como con cualquier otra finalidad. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno.

3.2. Origen de los residuos.

En este trabajo nos vamos a centrar en los residuos no peligrosos con un gran potencial de aprovechamiento como material a valorizar en la industria de la construcción siguiendo el Esquema 3.2-1.

Para la confección de este esquema nos hemos basado en los antecedentes que existen de la utilización de este tipo de materiales en distintas tipologías de obras y en distintas zonas geográficas del planeta y que se ha comprobado que funcionan correctamente para los usos indicados.

La metodología seguida para la realización de este esquema ha seguido los siguientes pasos:

- Buscar industrias que, para la obtención de sus productos principales, generaran residuos y posteriormente comprobar si estos residuos generados podrían tener un aprovechamiento directo o indirecto en obras de ingeniería civil.
- Que de estos residuos con potencial de aprovechamiento existieran estudios, bien de laboratorio o bien directamente en obra, y se haya comprobado su funcionamiento y sus limitaciones para los usos asignados.
- Que, de los distintos usos que pudieran tener estos materiales dentro de la obra civil, uno de ellos sea de aplicación en alguna de las capas que componen las secciones tipos para la ejecución de terraplenes y capas de terminación en carreteras según la IC 6.1 (Imagen 10) y para ferrocarriles según la IF-3 (Ministerio de Fomento, 2015a) (Imagen 11 e Imagen 12)

		TIPOS DE SUELOS DE LA EXPLANADA (DESMONTES) O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE (TERRAPLENES, PEDRAPLENES O RELLENOS TODO-UNO)				
		SUELOS INADECUADOS Y MARGINALES (IN)	SUELOS TOLERABLES (0)	SUELOS ADECUADOS (1)	SUELOS SELECCIONADOS (2) y (3)	ROCA (R)
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1 $E_{vd} \geq 60\text{MPa}$					
	E2 $E_{vd} \geq 120\text{MPa}$					
	E3 $E_{vd} \geq 300\text{MPa}$					
IN	Suelo inadecuado o marginal (Art. 330 del PG-3)	0 Suelo tolerable (Art. 330 del PG-3)	1 Suelo adecuado (Art. 330 del PG-3)	2 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)	3 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)	
S-EST 1	Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)	S-EST 2 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)	S-EST 3 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)	HM-20 (Art. 610 del PG-3)		

Imagen 10. Formación de la explanada para carreteras. (Secretaría de Estado de Infraestructura, 2003).

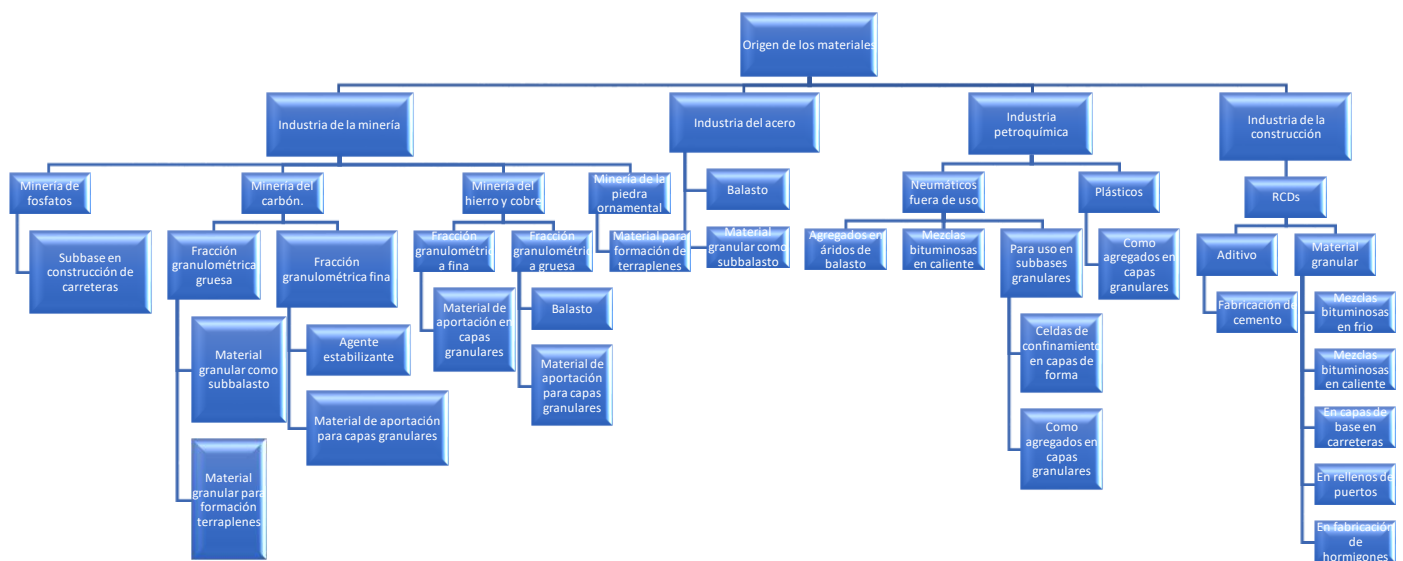
TIPO DE SUELO (clasificación geotécnica)	Clase de calidad de suelo
0.1. Suelos con alto contenido de materia orgánica. 0.2. Suelos blandos, con contenidos de más del 15 % de finos ^a , con alto contenido de humedad, inapropiados para compactar. 0.3. Suelos tixotrópicos (p.e.: arcillas de gran susceptibilidad). 0.4. Suelos conteniendo material soluble (p.e.: rocas salinas o yeso). 0.5. Terreno contaminado (p.e.: residuos industriales). 0.6. Suelos con un contenido medio de materia orgánica. 0.7. Suelos de alta plasticidad, con más del 15% de finos, suelos colapsables ^c o suelos expansivos ^d .	QS0
1.1. Suelos conteniendo más del 40 % de finos ^a (excepto los suelos clasificados como 0.2 o 0.7). 1.2. Rocas muy susceptibles a la meteorización. P.e.: - Cretas con $p_d < 1,7 \text{ t/m}^3$ y alta friabilidad. - Margas. - Esquistos meteorizados.	QS1
1.3. Suelos conteniendo entre el 15 y el 40 % de finos ^a (excepto los clasificados como 0.2 o 0.7). 1.4. Rocas moderadamente susceptibles a la meteorización. P.e.: - Cretas con $p_d < 1,7 \text{ t/m}^3$ y baja friabilidad. - Esquistos no meteorizados. 1.5. Rocas blandas. P.e.: Con Microdeval húmedo (MDH) > 40 y Los Ángeles (LA) > 40.	QS1 ^e
2.1. Suelos conteniendo entre el 5 y el 15 % de finos ^a , excepto los suelos colapsables ^c . 2.2. Suelos uniformes (CU ≤ 6), conteniendo menos del 5 % de finos ^a , excepto los suelos colapsables ^c .	QS2 ^f

Imagen 11. Materiales aptos para formación de explanadas de ferrocarril. 1 de 2. (Ministerio de Fomento, 2015a).

TIPO DE SUELO (clasificación geotécnica)	Clase de calidad de suelo
2.3. Rocas moderadamente duras. P.e.: Con $25 < \text{MDH} \leq 40$ y $30 < \text{LA} \leq 40$.	
3.1. Suelos bien graduados, conteniendo menos del 5 % de finos ^a . 3.2. Rocas duras. P.e.: Con $\text{MDH} \leq 25$ y $\text{LA} \leq 30$	QS3

Imagen 12. Materiales aptos para la formación de explanadas de ferrocarril. 2 de 2. (Ministerio de Fomento, 2015a).

El fin de este esquema es proporcionar un documento simple y visual que nos ayude a potenciar la economía circular propuesta por la Unión Europea con el fin de potenciar la conservación de los recursos naturales.



Esquema 3.2-1. Desechos de las distintas industrias y su aplicación en obra civil.

3.2.1. Industria de la minería.

Las actividades mineras son económicamente esenciales ya que nos proporcionan una gran cantidad de materias primas minerales esenciales para sectores estratégicos como las energías renovables, la movilidad eléctrica, la industria, la tecnología digital, la aeroespacial y la defensa (MITECO, 2025), sin embargo, como son una de las principales causas de contaminación en todo el mundo, deben llevarse a cabo de una manera más ecológica. Esta industria posee varios desafíos ambientales, sin embargo, la gestión de los residuos sólidos generados durante la vida útil de la mina es de gran preocupación. (Segui et al., 2023).

Los residuos generados en la industria de la minería están catalogados según la LER dentro del capítulo 01 Residuos de la prospección, extracción de minas y canteras y tratamientos físicos y químicos de minerales.

De esta industria se obtienen principalmente dos tipos de residuos, uno de ellos es un material de tipo granular cuya aplicación principal en obra civil sería valorizarlos como base para terraplenes o para capas de terminación de terraplenes con capacidad portante. Otro uso para este tipo de material que dependería sus propiedades físico - químicas es como árido para la fabricación de hormigones y para la fabricación de mezclas bituminosas.

El otro residuo obtenido es un polvo fino cuya valorización en obra civil sería principalmente la de material de aportación para la mejora de las propiedades mecánicas en capas granulares.

Para la valorización de estos tipos de material en obra civil sería de aplicación la siguiente normativa:

- UNE EN13043:2003/AC: 2004 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras áreas pavimentadas.
- UNE-EN 13242:2003 +A1:2008 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.
- UNE-EN 12457-(1,2,3 y 4):2003. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos.
- Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG3)
- UNE-EN 12620:2003 + A1:2015 Áridos para hormigones.
- UNE-EN 933-8:2012+A1:2015 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
- UNE-EN 13043:2043/AC:2004 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.
- EN 1744-4:2007 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 4: Determinación de la sensibilidad al agua de los materiales de relleno para mezclas bituminosas
- UNE-EN 1744-1:2010 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.
- UNE-EN 13450/AC:2004 Áridos para balasto.
- UNE-EN 12457-(1,2,3 y 4):2003. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos.
- NLT-326/00. Ensayo de lixiviación en materiales para carreteras.

3.2.1.1. Minería de fosfatos.

Estos materiales se obtienen en el proceso de producción de ácido fosfórico y son un material de tipo granular.

Los fosfoyesos vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 06 correspondiente a "Residuos de procesos químicos inorgánicos", en subapartado 06 09 correspondiente a "Residuos de la fabricación, formulación, distribución y utilización de productos químicos que contienen fósforo y de procesos químicos del fósforo".

En Egipto y en Marruecos el desecho de rocas de la minería de fosfato se utilizó como material para subbase en la construcción de carreteras. A este material se le realizaron pruebas para conocer sus propiedades físicas como ensayos de compactación, CBR, desgaste de los ángeles, ensayos de durabilidad. (Ahmed & Abouzeid, 2009) (Amrani et al., 2019).

3.2.1.2. Minería de carbón.

En la minería del carbón se produce un residuo conocido como sobrecarga (OB de sus siglas en inglés OverBunden), se está vertiendo sobre vastas áreas de terreno útil, lo que lleva a una demanda cada vez mayor de espacio terrestre en todo el mundo. La valorización de este material en forma en la obra civil

puede proporcionar una solución efectiva y ambientalmente sólida para la eliminación de las reservas de este residuo.

Este residuo está formado principalmente por relaves o Mine Tailings (MT) que es un material muy fino que se produce durante el procesamiento de minerales, y por los desechos de minería o Mine Wastes (MW) que es un material de tipo granular producido durante la extracción del mineral.

Este residuo de la minería del carbón constituye el residuo de código LER 01 01 02. Se trata de un residuo perteneciente al capítulo 01, correspondiente a los residuos de la prospección, extracción de minas y canteras y tratamientos físicos y químicos de minerales y subcapítulo 01 01 residuos de la extracción de minerales. Estando considerados como residuos no peligrosos. (*Consideraciones Medioambientales* | CEDEX, n.d.).

Estos residuos se puede valorizar en la construcción de carreteras en países como Australia en los que se ha usado MT como material de aportación para una mejor compactación del material granular (Indraratna, Gasson, et al., 2011) y en Marruecos en los que el MW que debido a sus propiedades físicas como la compresibilidad, sus propiedades geotécnicas, el comportamiento de hinchamiento y su comportamiento ambiental han sido utilizados como material granular en la formación de terraplenes (Arias et al., 1998a) .

(Banerjee et al., 2020) se centra en el reciclaje de este OB como alternativa al material de subbalasto convencional en los ferrocarriles. Se han realizado una serie de pruebas de modelo con este material como capas de subbalasto de diferentes espesores que complementan a una plataforma con una capacidad portante baja. Además, se han utilizado geoceldas de diferentes geometrías para mejorar el rendimiento adicional. De los resultados se obtuvo que el OB tenía el potencial de ser reciclado como un material de subbalasto en los ferrocarriles. Además, con el OB reforzado con geoceldas, la magnitud del asentamiento vertical y las tensiones se podrían reducir significativamente. Además, estos resultados obtenidos “in situ” se validaron mediante modelos de elementos finitos para predecir las deformaciones laterales y las tensiones del material.

El MT también ha servido de estudio para su aplicación en la construcción de plataformas de carreteras de bajo volumen de tráfico. (Suárez Maldonado & Pájaro Miranda, 2024) nos proponen la valorización de este residuo para la mejora de las capacidades mecánicas de las plataformas con suelos de baja capacidad portante sustituyendo entre el 20 y el 40% en peso del material natural por este MT. Todo esto se comprobó experimentalmente mediante pruebas de caracterización física mecánica y de resistencia en muestras de arenas arcillosas y se demuestra una mejora en las propiedades mecánicas del suelo, como el California Bearing Ratio (CBR), Límites Plástico y Líquido, y el Test de Compactación (PROCTOR) gracias al uso de este material como agente estabilizante, mejorando también su granulometría y su clasificación según la guía AASHTO pasando de una clasificación A-6, un suelo no apto para la formación de subbase a un suelo tipo A-2-6 que es un suelo competente para capas estructurales en pavimentos.

Aunque este material en España es meramente residual debido al progresivo cierre de las minas de carbón, como se puede observar en la siguiente imagen (Imagen 13) en otros países como China, EEUU o India, podría ser una solución aceptable debido a la cantidad de extracción de carbón para la producción de energía que aún se extrae (Statista, 2024b) .

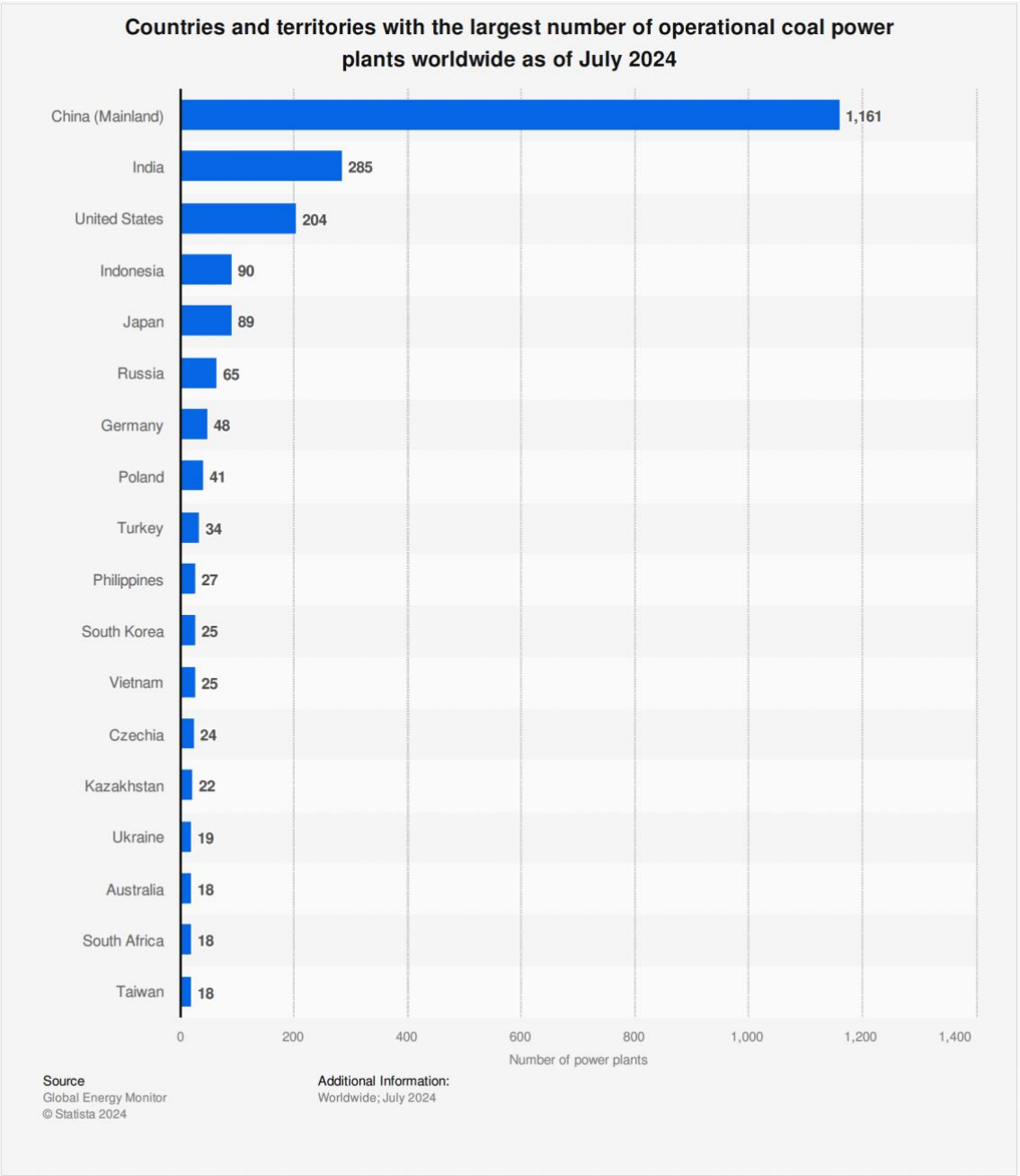


Imagen 13. Plantas de energía de carbón por países.(Statista, 2024a).

3.2.1.3. Minería de hierro y cobre.

Los residuos de la minería del hierro y del cobre pertenecen al capítulo 01 01 01 residuos de la extracción de minerales metálicos según el código LER.

En 1979 se estudió la posibilidad de la utilización de las partículas MT extraídas de la minería del cobre con un diámetro inferior a 0,075 mm pudieran ser usadas para la construcción de terraplenes como material de aportación al material natural como zahorras y suelos de distinta clasificación mejorando sus propiedades mecánicas como la compactación, la resistencia a compresión, permeabilidad y erosionabilidad. (Sultan, 1979).

Este residuo de la minería del cobre también se ha usado en España (Galicia) como agregado natural en caminos rurales y en capas no estructurales de carreteras (Arias et al., 1998b).

En estudios posteriores se han estudiados las características de este residuo MT que se obtienen de la minería del hierro y del cobre y que tienen unas propiedades aptas para su utilización como material granular en obra civil según una serie de experimentos de laboratorio para examinar las características estáticas y cíclicas de estos materiales en la mina de hierro de Yuhezhai en China, y en las minas de cobre Bahuerachi en México.

Se investigaron las propiedades geotécnicas básicas de los residuos MT y MW, incluyendo la gravedad específica, la distribución del tamaño del grano, la plasticidad, la permeabilidad y la compresibilidad, y las pruebas de compresión triaxiales, así como las triaxiales cíclicas. Se realizaron pruebas para analizar la fuerza y las respuestas cíclicas de las cuatro muestras ensayadas, dos muestras de la fracción granulométrica fina MT, una para cobre y otra para hierro y otras dos muestras de las fracciones granulométricas gruesas MW, una para cobre y otra para fino como se muestra en la Imagen 14.

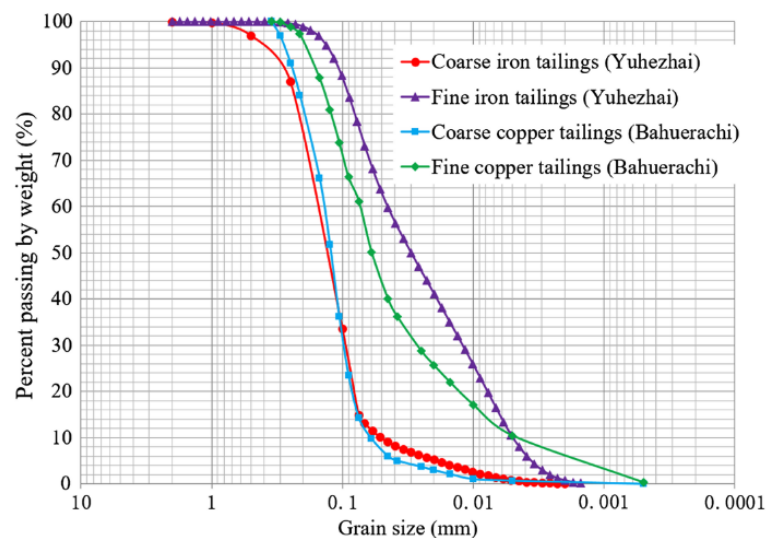


Imagen 14. Distribución del tamaño del grano de las colas gruesas y finas. (Hu et al., 2017)

Las dos muestras de tamaño grueso se clasificaron como Arena de limo según la Unified Soil Classification System (ASTM 2011a), y las dos muestras finas fueron clasificadas como Arcilla Magra Arenosa (CL según ASTM 2011a) (Hu et al., 2017).

3.2.1.4. Minería de piedra ornamental.

“Bajo la denominación de piedra natural o roca ornamental se engloban aquellas rocas que, una vez extraídas y tras un proceso de elaboración, son aptas para ser utilizadas como materiales nobles de construcción (pavimentos, aplacados, mampostería, cubiertas, etc.), elementos de ornamentación, arte funerario o escultórico y objetos artísticos variados, conservando íntegramente su composición, textura y propiedades físico-químicas.” (Piedra Ornamental | CEDEX, n.d.).

La clasificación de estos residuos se corresponde con el Código 01 04 13 relativo a "Residuos de la prospección, extracción de minas y canteras y tratamientos físicos y químicos de minerales. Residuos de la transformación física y química de minerales no metálicos. Residuos del corte y serrado de piedra distintos de los mencionados en el código 01 04 07", y se consideran residuos de carácter no peligroso.

Las rocas ornamentales de mayor interés comercial y económico son aquellas que por sus características de vistosidad, físico-mecánicas y aptitud para el pulido constituyen la materia prima que ha dado lugar al desarrollo de la llamada Industria de la Piedra Natural. Atendiendo a estos criterios se conocen mundialmente los tres grupos denominados genéricamente: Granitos, Mármoles y Pizarras, también llamados Rocas Ornamentales.

Estos residuos se pueden dividir en los de canteras y empresas. Las condiciones naturales que se encuentran en las canteras, como fallas, grietas y hendiduras, pueden hacer que sea casi imposible obtener bloques. Esto conduce a la aparición de materiales de desecho. Los diámetros promedio de los residuos de mármol de las canteras son de 75 a 100 mm. (Ural & Yakşe, 2020) .

Según estudios realizados sobre estos materiales en minas de extracción de mármol en Turquía en los que se midieron distintos parámetros mecánicos como fueron Proctor modificado, la prueba CBR de resistencia seca/húmeda y el peso unitario in situ del mármol residual utilizando el método del cono de arena se determinó que estos materiales mostraron que los residuos de mármol son adecuados para ser utilizados como materiales base, según la Technical Specifications of Turkish Highways (TSTH).

3.2.2. Industria del acero.

El reciclaje de materiales industriales ha adquirido una importancia creciente en la búsqueda de soluciones sostenibles para la construcción y la ingeniería civil. Uno de los residuos industriales con un gran potencial de reutilización es la escoria de horno de arco y dentro de éstos las escorias negras, un residuo generado durante el proceso de producción de acero.

Dentro del programa LIFE+ financiado por la Comisión Europea, se está desarrollando un árido reciclado de altas prestaciones que cumple con la normativa nacional y normativa europea que regula su uso como capas de asiento en plataformas.

Las escorias de acería de horno de arco eléctrico vienen incluidas en la Lista Europea de Residuos en el

Capítulo 10 correspondiente a "Residuos de procesos térmicos" con los siguientes códigos:

- 10 02 01 Residuos de tratamiento de escorias.
- 10 02 02 Escorias no tratadas.

Estas dos clasificaciones corresponden a residuos no peligrosos.

“La principal aplicación de las escorias de hornos de acería en Europa es la construcción de carreteras (48%) y solo un 13% son enviadas a vertederos. El uso de escoria en el ámbito ferroviario no es tan común como en la construcción de carreteras y solo Estados Unidos, Brasil, Canadá e India tienen experiencia.” (Morata Royes, 2016).

Además de esa aplicación como material granular este producto se puede valorizar para el proceso de producción de cemento y hormigones. (*Obras Realizadas* | CEDEX, n.d.).

La valorización de este tipo de material en obra civil está sujeto a la siguiente normativa:

- UNE EN13043:2003/AC: 2004 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras áreas pavimentadas.
- UNE-EN 13242:2003 +A1:2008 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.
- UNE-EN 12620:2003 + A1:2015 Áridos para hormigones.
- UNE-EN 1744-1:2010 + A1:2013 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos.
- Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG3).

En España existen varios tramos de pruebas realizados para ADIF en el que se han empleado este tipo de árido siderúrgico como material granular, en las distintas capas de un terraplén e incluso como balasto.

Uno de estos tramos de pruebas se realizó en la línea de ADIF con tráfico mixto en Castellbisbal con el objetivo de demostrar la viabilidad de este árido siderúrgico en su empleo como balasto, subbalasto y capa de forma a escala real.

Otro tramo de pruebas se realizó en Derio (Vizcaya), en un tramo entre Derio y Zamudio en una vía única electrificada. Se dividió el tramo en 4 subtramos variando los porcentajes de subbalasto de este material entre un 15 y un 70%.

Estos tramos de pruebas se monitorizaron y se llegó a la conclusión de que *“el árido siderúrgico emerge como un árido de alta calidad que ofrece una resistencia a la abrasión y una dureza considerablemente mayor a la de la mayoría de áridos naturales comúnmente empleados en las capas de asiento ferroviarias. La idoneidad de su aplicación en capas de asiento ferroviarias ha sido demostrada por las pruebas de*

campo, poniendo de manifiesto su contribución hacia vías ferroviarias de mejores prestaciones, tales como vías más rígidas, estables y duraderas.” (Royes et al., 2022).

Estos áridos siderúrgicos que su por su buen comportamiento podrían ser usados como subbalasto y capa de forma tienen una restricción geográfica, ya que el transporte de esos áridos a zonas alejadas de sus zonas de producción produciría un efecto negativo en la sostenibilidad que se está buscando mediante la reutilización de éstos.

Recientemente, se ha propuesto la implementación del balasto de escoria de acero como un material apropiado para sustituir el balasto de piedra. (Jing et al., 2020) sugiere una combinación óptima de balasto de piedra y escoria de acero (SB-SS de sus siglas en inglés Stone Balast – Steel Slag) con respecto al comportamiento dinámico de cinco combinaciones SB-SS como 0%SS, 25%SS, 50%SS, 75%SS y 100%SS por peso de balasto utilizando un modelo de método de elementos finitos de una pista de prueba de 50 metros. Se llegó a la conclusión de que la mejor combinación era aquella que contenía un 75%SS como la combinación óptima SB-SS.

3.2.3. Industria petroquímica.

La industria petroquímica es uno de los sectores más dinámico y tiene una gran importancia para el desarrollo de la economía mundial en su conjunto, pues produce una variedad de productos desde plásticos hasta químicos básicos de gran importancia para diversos sectores económicos. Sin embargo, la demanda cada vez mayor de estos productos presenta un reto muy importante a la hora de gestionar esos residuos ya que son productos con una gran dificultad de degradación en vertederos, lo que produce contaminación a gran escala de forma permanente. A pesar de la implementación de nuevas tecnologías tanto para su fabricación como para su reciclaje, muchos de ellos todavía son difíciles de reutilizar debido a la estructura compleja que tienen y la falta de tecnologías adecuadas para tratarlos.

“La utilización sostenible del plástico ha ganado un creciente interés en los últimos años. El uso de estos productos reciclados sostenibles en la industria de la construcción de obra civil reducirá la demanda de materiales de canteras, los costos asociados con los vertederos, así como la huella de carbono de futuros proyectos de infraestructura.” (Arulrajah et al., 2020).

Los residuos provenientes de la industria petroquímica vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en los siguientes Capítulos:

- Capítulo 15: residuos de envases; absorbentes, trapos de limpieza; materiales de filtración y ropas de protección no especificados en otra categoría, con el código 15 01 02 Envases de Plástico

- Capítulo 19: residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial, con el código 19 12 04 Plástico y Caucho
- Capítulo 16: Residuos no especificados en otros capítulos de la lista con el código 16 01 03 Neumáticos fuera de uso.

Las principales aplicaciones en obra civil para este tipo de material son su utilización como agregados para subbases en terraplenes o mezclas bituminosas, aunque existen otras aplicaciones en fase de estudio para el uso de neumáticos como celdas confinantes para la mejora de las propiedades mecánicas de capas en subbase de terraplenes.

La valorización de este tipo de material en obra civil está sujeto a la siguiente normativa:

- Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG3).
- NLT-326/00. Ensayo de lixiviación en materiales para carreteras (Método del tanque).
- ORDEN CIRCULAR 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).
- ORDEN CIRCULAR 21bis/2009 sobre betunes mejorados y betunes modificados de alta viscosidad con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y criterios a tener en cuenta para su fabricación "in situ" y almacenamiento en obra.
- ORDEN FOM 2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos (BOE de 3 de enero de 2015).
- PrEN 14243. European Standard. "Post-consumer tyre-Materials and applications".
- UNE-CEN/TS 14243:2012 EX. Materiales producidos a partir de NFU. Especificación de categorías basadas en sus dimensiones e impurezas y métodos para determinar sus dimensiones e impurezas.

Para su utilización como agregado en subbases en terraplenes (Arulrajah et al., 2020) nos propone el uso de mezclas de plástico recuperado (RP) con RCD's como materiales para la ejecución de la capa de forma ferroviaria. El RP utilizado en esta investigación es la mezcla de varios tipos de plásticos de desecho, que no se pueden separar ni reciclar en nuevos productos. La influencia de la inclusión de RP en RCD's se evaluó en base a pruebas que incorporaron la evaluación de la rotura de las partículas, el comportamiento de compresibilidad, la rigidez y los parámetros de resistencia de las mezclas. El módulo resistente, (MR) de los productos reciclados se determinó en base a un protocolo de prueba triaxial de carga repetida (Repeat Load Triaxial RLT) propuesto, basado en el rango de tensiones relevantes aplicadas a estos materiales. También se evaluaron dos tipos de materiales para capa de forma de origen natural (Convencional Caping Material CCM) utilizados actualmente en obras ferroviarias bajo condiciones de prueba similares. Las respuestas de las mezclas se evaluaron contra el rango de resultados de los CCM para determinar el

porcentaje óptimo de RP. Se determinó que la inclusión de residuos plásticos en los agregados de demolición podría mejorar la resistencia a la degradación y las características de absorción de energía de las mezclas. Se descubrió que la inclusión de RP con un 5% en (Recycled Concrete Aggregates RCA) y un 3 % en (Crushed Brick CB) era la mezcla óptima, que además se encontró que mejoraba la capacidad de absorción de energía de este producto alternativo de capa forma ferroviaria reciclada.

Los neumáticos son otro de los materiales de desecho más problemáticos generados por las sociedades modernas. Son altamente inflamables, no biodegradables, y su composición puede causar lixiviación tóxica si se almacenan, o humos peligrosos si se incineran. (Sharma et al., 2000) Cada año se eliminan más de tres millones de toneladas de neumáticos solo en Europa. (Sol-Sánchez et al., 2014).

(Martínez Fernández et al., 2018) se nos propone el uso de neumáticos de desecho (Tyres Derived Aggregates TDA) mezclado con material granular para ejecutar la capa de forma y subbalasto en obras ferroviarias.

Con esta mezcla de desecho de neumáticos y material granular se realizó un tramo de pruebas en la línea de ADIF Boadilla – Algeciras dentro del proyecto Constructivo para la Renovación del trayecto San Pablo – Almoraima.

Con esta aplicación de agregados de TDA en capas de capa de forma y subbalasto en obras ferroviarias no solo solucionaríamos parte del problema del reciclaje y reutilización de estos neumáticos desechados, sino que también obtendríamos beneficios de mejora de la resistencia a la degradación.

Agregar entre el 1 y el 10% de partículas de caucho a la mezcla (en términos de peso) mejora la resistencia a la degradación (medida utilizando los coeficientes de Los Ángeles y Micro-Deval) y reduce la capacidad de carga. Una adición de caucho limitada al 5 % proporcionó un equilibrio óptimo entre estas dos características. (Martínez Fernández et al., 2018).

Otra solución para la formación de capa de forma y subbalasto es el uso de plásticos (migas de goma) que además usa también residuos de minería (escorias de horno). (Indraratna et al., 2018)

Además de CW (Coal Wash) y RC (Rubber Crums), la escoria del horno de acero (SFS) también se incluyó en la mezcla para fortalecer aún más la mezcla SEAL (Synthetic Energy absorbing Layer).

Se realizaron pruebas de laboratorio exhaustivas en las mezclas y se ha concluido que al mantener la relación de mezcla de SFS:CW = 7:3 (por masa), la mezcla podría mantener suficiente resistencia al corte con un potencial de hinchazón insignificante (causado por SFS) en comparación con los materiales de subbalasto tradicionales (Qi et al., 2018) . Por lo tanto, todas las mezclas SEAL mencionadas en este estudio tienen la misma relación de mezcla (SFS:CW = 7:3) mientras que el contenido de RC está cambiando del 0 al 40% (por masa).

El uso de neumáticos de caucho de desecho en la capa de forma de vía férrea es otra solución alternativa para el reciclado de éstos. Una célula de neumático modificada es desarrollada por extracción de uno de los flancos de un neumático de caucho de desecho.

Se colocan varias celdas de neumático en la capa de recubrimiento a lo largo del ancho de la vía férrea (Imagen 15) y se llenan con material de relleno granular compactado. Estas celdas a base de neumáticos de caucho modificado no solo proporcionan mejores características de amortiguación debido a la presencia de caucho, sino que también proporcionan un confinamiento adicional debido a la Geometría cilíndrica 3D intacta de la celda del neumático. Esta tecnología del refuerzo de las células del neumático en la capa de recubrimiento pendiente de una patente internacional (Patente Internacional (PCT) Solicitud No. PCT/AU2018/050074). (Indraratna et al., 2022).



Imagen 15. Celdas de neumáticos listas para ser llenadas con el material de relleno granular. (Indraratna et al., 2022)

Estas aplicaciones para el reciclado de material procedente de la industria petroquímica tienen, según los diversos estudios citados, un doble beneficio. Por un lado, el reciclado y la reutilización de material de desecho de la industria petroquímica y por otro lado la mejora de las propiedades físicas, aumentando la capacidad de disipación de la energía, de las capas de forma y subbalasto.

Como agregado en mezclas bituminosas en caliente, el uso de polvo de caucho en mezclas asfálticas ha sido acogido en Estados Unidos al menos desde inicios de los sesenta por el Departamento de Transporte de Arizona. Desde entonces este tipo de material ha sido adoptado alrededor del mundo (Ibrahim et al., 2013) . Los beneficios del asfalto modificado con polvo de caucho se evidencian en la mejora de las propiedades de durabilidad ya que previene el agrietamiento del cemento asfáltico, mejora la adherencia en superficies mojadas para disminuir su incidencia en accidentes de tránsito y ayuda a reducir el ruido que se transmite a través del pavimento. Además, se puede citar el beneficio ambiental que representa el tener una aplicación para el caucho triturado de los neumáticos que han sido desechados al final de su vida útil (Campaña et al., 2016).

La investigación de (Chiu & Lu, 2007) estudió la viabilidad del uso de caucho asfáltico (AR de sus siglas en inglés Asphalt Rubber), producido mezclando caucho de neumáticos (GTR de sus siglas en Inglés Ground Tire Rubber) con un asfalto, como aglutinante para el asfalto de matriz de piedra (SMA de sus siglas en Inglés Stone Matrix Asphalt). Se utilizaron dos tamaños diferentes de GTR producidos en Taiwán. También se evaluó el rendimiento potencial de las mezclas AR-SMA. Se concluyó que las mezclas de SMA que cumplen con los requisitos volumétricos típicos para SMA podrían producirse utilizando un caucho asfáltico que contiene el 20% de un GTR fino con un tamaño máximo de 0,6 mm. No se necesitó fibra para evitar el drenaje cuando se usó este caucho de asfalto. Las mezclas AR-SMA no fueron significativamente diferentes de las mezclas SMA convencionales en términos de susceptibilidad a la humedad de los resultados de las pruebas AASHTO T283. Los resultados de las pruebas de seguimiento de la rueda a 60 °C muestran que la resistencia al desgaste de las mezclas AR-SMA era mejor que la de las mezclas SMA convencionales.

Una solución innovadora para la valorización de los Neumáticos Fuera de Uso (NFU) sería utilizarlo como agregado en áridos de balasto para el recubrimiento del material usado como balasto en las vías férreas que además mejoraría la sostenibilidad del ferrocarril en Europa aportando múltiples beneficios.

Este nuevo material consiste en áridos de balasto cubiertos por un revestimiento conformado por un aglutinante avanzado y polvo de caucho procedente de NFU como se muestra en la Imagen 16, proporcionando una gran mejora mecánica y beneficios medioambientales (Royes et al., 2022).



Imagen 16. Piedra de balasto ferroviario con recubrimiento de caucho de polvo de NFU (Royes et al., 2022).

Este nuevo material aportaría mejoras mecánicas al comportamiento del balasto, reduciría la necesidad de mantenimiento, aumento de la vida útil, mayor resistencia a la abrasión según el estudio de (Royes et al., 2022).

Existen ya en España varios tramos de pruebas realizados con este material, como el realizado en una línea de tráfico mixto de ancho convencional (1668 mm) propiedad de ADIF en Caldes de Malavella y otro en el metro de Barcelona en los que se pudo comprobar que existía una disminución de las vibraciones y de los asientos de vía comparando este balasto recubierto con balasto normal.

3.2.4. Industria de la construcción.

Uno de los grandes problemas ambientales en todo el mundo es gran volumen de desechos de construcción y/o demolición, que en Europa llegaron a ser en 2023 de 2.233 millones de toneladas, debido a la creciente industria de la construcción y la población mundial que han llevado a un aumento de la producción de estos residuos. Poder valorizar estos residuos de construcción y demolición (RCD) podría ayudar a reducir los residuos y conservar los recursos naturales.

Los residuos generados en actividades de construcción y demolición están incluidos en el Capítulo 17 de la LER, que trata sobre "Residuos de la construcción y demolición". Los códigos correspondientes al subcapítulo 01, que abarca hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, son los siguientes:

- 170101: Hormigón
- 170102: Ladrillos
- 170103: Tejas y materiales cerámicos
- 170107: Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, distintas de las especificadas en el código 17 01 06

Los residuos clasificados con el código 17 01 06* son considerados peligrosos y por lo tanto no son objeto de este trabajo.

La principal aplicación para la valorización de estos RCD en obra civil son como material granular, ya sea como capas de base en terraplenes, como para la fabricación de hormigones y para fabricación de mezclas bituminosas, en caliente o en frío y rellenos portuarios. Aunque existen otras aplicaciones para estos RCD como son su aplicación como agregados en la fabricación de cemento.

La valorización de este tipo de material en obra civil está sujeto a la siguiente normativa:

- UNE EN13043:2003/AC: 2004 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras áreas pavimentadas.
- UNE-EN 13242:2003 +A1:2008 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.
- UNE-EN 12620:2003 + A1:2015 Áridos para hormigones.
- UNE-EN 1744-1:2010 + A1:2013 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos.
- Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG3).

3.2.4.1. Valorización de RCD en Mezclas Bituminosas en frío.

En la era de la disponibilidad limitada de recursos naturales y la creciente conciencia de los problemas ambientales, las mezclas de reciclaje en frío (Cold Recycling Mixtures CRM) están ganando popularidad en términos de construcción de capas base de pavimentos. Las principales ventajas de esta tecnología son

la reducción de costes, el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la producción convencional de asfalto de mezcla caliente (Convencional Hot Mix Asphalt HMA). (Fang et al., 2016) (Thom & Dawson, 2019). Las propiedades de los CRM dependen de la selección cualitativa y cuantitativa de sus componentes, que son Pavimento Asfáltico Recuperado (Reclaim Asphalt Pavement RAP), agregados naturales, emulsión de betún o betún espumado, agua y relleno activo. Dependiendo de la combinación aplicada de agentes de unión, se pueden distinguir varios tipos de mezclas de reciclaje en frío, tales como materiales tratados con cemento (Cement-Treated Material CTM) con cemento como único agente de unión, materiales tratados con cemento-betún (Cement-Bitumen-Treated Materials CBTM) que contienen emulsión de betún o betún espumado con una proporción de betún residual (B) a cemento (C) menor o igual a uno ($B/C \leq 1$), y materiales estabilizados en betún (Bitumen Stabilized Material BSM) con un contenido residual de betún residual de aproximadamente el 3% y una cantidad máxima de relleno activo (por ejemplo, cemento) igual al 1% ($B/C \geq 1$) (Grilli et al., 2012) (Cardone et al., 2015).

Estos tipos de mezclas se llegan a hacer con entre un 50 y un 70% del peso de la mezcla mineral de material reciclado procedente del asfalto fresado (Konieczna et al., 2020), aunque en España se permite hasta un 100%.

Se define como reutilización in situ con emulsión de capas de firmes a la mezcla homogénea, convenientemente extendida y compactada, del material resultante del fresado de una o más capas de un firme existente, una emulsión bituminosa, agua y, eventualmente, aditivos (MITMA, 2023).

Según la legislación española vigente se distinguen 3 tipos de reutilización in situ con emulsión del material según se muestra en la Imagen 17.

	TIPO I	TIPO II	TIPO III
Material reutilizado del firme existente	Capa bituminosa (espesor ≤ 5 cm) + material granular	Capa(s) bituminosa(s) (espesor de 5 a 10 cm) + base no bituminosa	Mezclas bituminosas
Proporción de material bituminoso (%)	≤ 60	60-100	100
Espesor reutilizado (cm)	8-15	8-15	6-12(*)

Imagen 17. Tipos de reutilización in situ con emulsión. (MITMA, 2023).

En las reutilizaciones de tipo III, el material a reutilizar estará constituido por un conjunto de partículas pétreas, recubiertas por ligante hidrocarbonado envejecido, resultantes de la adecuada segregación mediante fresado del pavimento existente en la profundidad establecida.

En las reutilizaciones de tipo I y II, el material a reutilizar será una combinación de material pétreo recubierto por ligante hidrocarbonado y material pétreo sin recubrir (MITMA, 2023).

En cambio, si el material procedente de la demolición o fresado de firmes se llevara a una planta para su tratamiento y mezclado con emulsión sería de aplicación la Norma 6.3 IC Rehabilitación de firmes.

3.2.4.2. Valorización de RCD en Mezclas bituminosas en caliente.

Se han hecho estudios para la aplicación de residuos de construcción y demolición (RCD) en la fabricación de revestimiento asfáltico, como alternativa para el aprovechamiento de estos materiales.

En el estudio experimental de (Pérez Pérez & María, n.d.) se nos propone la sustitución de la granulometría en la fracción 0/40 del árido natural por árido reciclado para un tráfico T3 para capa de rodadura cumpliendo los requisitos del PG3 (del año 2002) para el índice de las y el equivalente de arena. La composición de este árido reciclado de RCD contenía aproximadamente Hormigón (72%); Piedra (20%); Cerámico (3%); Yeso y otras impurezas (1%) y Materiales asfálticos (4%). El valor del coeficiente de Los Ángeles es del 30%. Este valor no cumple los requisitos de tráfico pesado establecidos en el PG-3 (del año 2002) para tráfico pesado TO0 y TO en capas de base. Por otra parte, el coeficiente de absorción del AR (grueso) es 4,86%, un valor muy superior al ofrecido por los áridos naturales.

En estos estudios, como el realizado por (Neto et al., 2020) se utilizaron pruebas de caracterización física, química y mineralógica y de dosificación por el método Marshall. Posteriormente se analizó un tramo de pruebas experimental utilizando una función de mercado adaptada para la inclusión del RCD. En ese tramo de pruebas se utilizó árido reciclado de RCD en las fracciones de grava tipo 1 y arena reemplazando el árido de tipo natural para estas fracciones en la mezcla bituminosa. Los datos se muestran en la Imagen 18.

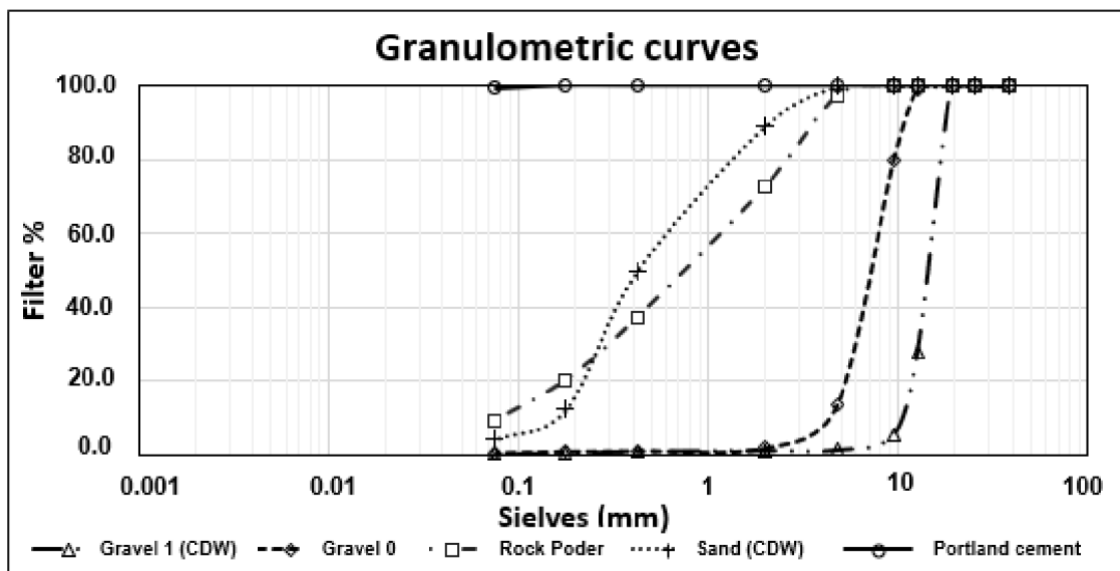


Imagen 18. Curvas granulométricas de los áridos utilizados en la mezcla a ensayar.(Neto et al., 2020).

Se observó que los agregados de RCD tenían un buen potencial para su uso en recubrimientos de asfalto en caliente basándose en el análisis del tramo experimental en que, a través del análisis del tráfico y las condiciones de rodadura, el pavimento asfáltico obtuvo resultados bastante satisfactorios.

3.2.4.3. Valorización de RCD en capas de base en carreteras.

(Santana & Estaire, 2022) se centra en analizar cómo podrían afectar los áridos reciclados al medio ambiente si se usaran como material para terraplenes midiendo sobre todo la lixiviación de estos materiales.

(Park, 2003) investigó las características de los Agregados de Reciclado de Hormigón (RCA de sus siglas en inglés Recycled Concrete Aggregate) como materiales base y subbase. Los resultados mostraron que la RCA se puede utilizar como materiales alternativos a los agregados naturales triturados para carreteras. La estabilidad y la resistencia al cizallamiento de RCA en condiciones húmedas fueron menores que en condiciones secas, y la tasa de reducción fue comparable a la de los agregados naturales. Además, la deflexión de la sección RCA era similar a la de la sección de agregados naturales en el campo.

(Poon & Chan, 2006) presentaron el uso factible de los RCA y ladrillo de arcilla triturada como materiales de subbase de carreteras sin atar. Los resultados demostraron que el uso del 100 % de RCA disminuyó la densidad seca máxima y aumentó el contenido óptimo de humedad de los materiales subbase en comparación con los de los materiales subbase naturales. El valor de la relación de carga de California (CBR) de la subbase utilizando ladrillo de arcilla triturada fue menor que el de RCA. Sin embargo, el valor de CBR empapado para todas las subbases recicladas fue un 30 % mayor que el del requisito de resistencia mínima en Hong Kong.

(Leite et al., 2011) evaluaron las influencias de composición y compactación en el comportamiento mecánico de la base de la carretera y las capas de subbase basadas en los materiales RCD. El valor de CBR y los módulos resistentes obtenidos con materiales reciclados de RCD eran similares a los obtenidos con agregado natural comúnmente utilizado en la construcción de carreteras.

(Barbudo et al., 2012) estudiaron la relación entre los diferentes componentes de los agregados reciclados y su comportamiento mecánico para la aplicación en carretera a través de un análisis estadístico. Los resultados mostraron que la selección correcta de los materiales y la eliminación de impurezas en una planta con cribado y doble trituración son importantes para mejorar la calidad de los agregados reciclados. Llegaron a la conclusión de que el agregado reciclado se puede utilizar como materiales de base en las carreteras.

(Jiménez et al., 2012) evaluaron el comportamiento y el impacto ambiental de los agregados reciclados de RCD seleccionados en condiciones de campo en un camino rural en el sur de Córdoba. Los resultados demostraron que ambos agregados reciclados (4/40 mm, agregado de hormigón reciclado y agregado de mezcla reciclada) eran de buena calidad y cumplían con todos los límites establecidos en la Instrucción de Carreteras española (6.1 IC). La prueba de carga de la placa estática mostró una excelente capacidad de carga en ambas capas estructurales. Además, el uso de agregados reciclados en carreteras rurales sin pavimentar no presentaba un riesgo de contaminación ambiental a las aguas subterráneas.

(Arulrajah et al., 2014) investigaron la posibilidad de usar RCA, ladrillo triturado (CB de sus siglas en inglés Crushed Brick), pavimento de asfalto recuperado (RAP), roca de excavación de residuos (WR) y vidrio reciclado en aplicaciones de base/subbase de pavimento no atado. Se descubrió que RCA, CB y WR cumplían con los requisitos de resistencia física y de cizallamiento para agregados en aplicaciones de base/subbase de pavimento. El RAP y el vidrio reciclado deben mezclarse con agregados de mayor calidad para mejorar aún más sus propiedades físicas y de resistencia, particularmente la abrasión de Los Ángeles y el CBR para cumplir con los requisitos de la autoridad vial.

3.2.4.4. Valorización de RCD en rellenos de puertos.

Otra posible aplicación para estos RCD es el relleno portuario. En España las recomendaciones de la ROM 4.1 -94 y la norma 6.1-IC se utilizan para el diseño de rellenos portuarios.

(Agrela et al., 2020) en su trabajo utilizaron áridos de hormigón reciclado (RCA) y áridos reciclados mixtos (MRA) para su aplicación en capas estructurales de plataformas portuarias.

Esta investigación tenía como objetivo estudiar y evaluar el comportamiento físico, químico y mecánico de los áridos de hormigón reciclado (RA) para su uso en una aplicación completa a escala real en capas estructurales en una plataforma de carga en el puerto "Ciudad de Palos" en Huelva sobre un área de 8.200 m².

Como se muestra en la Imagen 19 el RA se aplicó sobre toda la superficie de la sección estructural en dos capas. El diseño de los pavimentos portuarios se lleva a cabo de acuerdo con su uso y actividad futura, estableciendo las diferentes cargas de cálculo, su intensidad de uso y el tipo de material existente en capas inferiores.

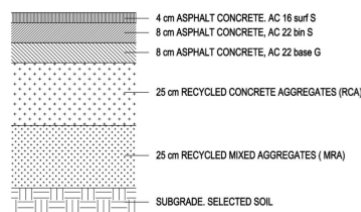


Imagen 19. Sección transversal del paquete de firmes.

Después de ensayar las propiedades de los distintos materiales reciclados y su comportamiento dentro del paquete de firmes se llegó a la conclusión de que los materiales reciclados, aunque tienen densidades algo más bajas que los materiales naturales, especialmente el mayor contenido de material cerámico (MRA), presentan propiedades físicas, químicas y mecánicas muy adecuadas para su uso como subbase y bases para plataformas portuarias.

3.2.4.5. Valorización de RCD en fabricación de hormigón.

Países como Alemania, Holanda y Japón, han sido pioneros en el uso de hormigones con áridos reciclados, esto es debido a que son países con una gran cultura y conciencia de reciclaje. Con la introducción en España del anejo 15 de la EHE 2008, se hace posible la ejecución de obras con hormigones reciclados en España (Martínez García et al., 2021).

Actualmente, para la fabricación de hormigón estructural a partir de áridos reciclados, se aplica en España el Código Estructural, apartado 30.8. En él nos define los requisitos físicos y mecánicos y su composición. Para la fabricación de estos hormigones, actualmente, sólo está permitido la utilización de la fracción del árido grueso reciclado precedente de Residuos de Hormigón en un porcentaje máximo del 20% en peso y una resistencia de hasta 40 MPa para hormigones en masa y armados.

Actualmente la fracción del árido fino reciclado queda fuera de esta norma. Existen multitud de estudios en el que se caracterizan diferentes HAR con dosificaciones distintas de árido reciclado para estudiar su comportamiento tomando como referencia un hormigón hecho con áridos naturales. (Panghal & Kumar, 2024) analiza cuatro muestras de HAR con diferentes porcentajes de árido fino reciclado (25%, 50%, 75% y 100%) para obtener un hormigón de 27 MPa. Los resultados de este estudio se muestran en la Imagen 20.

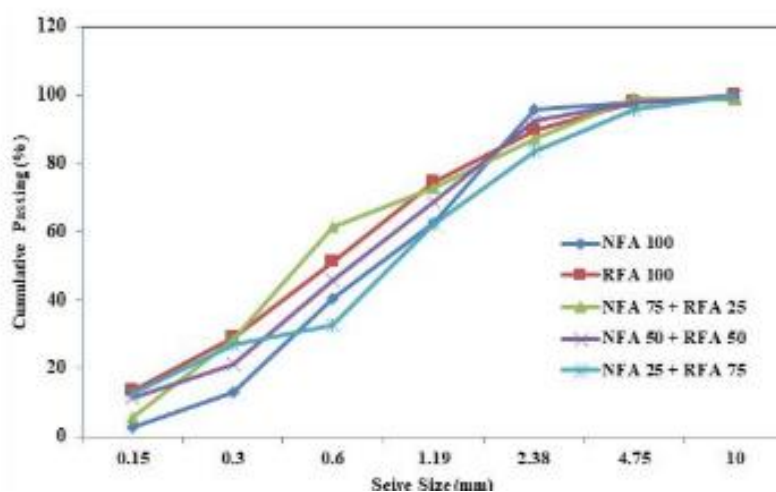


Imagen 20. Curva granulométrica del árido fino. NFA (Natural Fine Aggregate) RFA (Recycled Fine Aggregates) (Panghal & Kumar, 2024).

De este estudio se concluyó que las propiedades mecánicas del hormigón muestran un aumento hasta un límite específico y luego disminuyen más allá del punto óptimo. El porcentaje de reemplazo ideal para RFA en el hormigón es del 25 %. El hormigón exhibe características de resistencia superiores en este nivel de reemplazo y disminuye en calidad al 100% de reemplazo.

Otros estudios de laboratorio han evaluado la posibilidad de sustituir el cemento por Residuos de Demolición de Mampostería (RDM) en hormigones autocompactantes. Se llegó a la conclusión de que

sustituyendo en peso entre el 10 y 20% del cemento por RDM se conseguían propiedades mecánicas en el hormigón muy similares a la de la mezcla de referencia (Silva et al., 2015) .

En España existen ya numerosas obras de hormigón realizadas con hormigón con árido reciclado (HAR), como el Puente atirantado sobre el río Turia en Manises, que es uno de los puentes más singulares del área metropolitana de Valencia, en España. Más de 1.250 metros cúbicos de hormigón utilizados en la construcción de este paso elevado en el que el uso de áridos reciclados fue pionera en un puente atirantado. La Asociación Internacional de Ingenieros y Estructuras adjudicó este proyecto para ser el primer puente en el mundo el uso de materiales reciclados. (*ConstruGomes*, n.d.).

3.2.4.6. Valorización de RCD para fabricación de cemento.

La Agencia Internacional de Energía propuso un Plan de Reducción de CO² (Frías et al., 2014) que, para la industria del cemento, pidió una reducción de CO² de 2 Gt, en 2007, a 1,55 Gt, en 2050, durante un periodo en el que se prevé un aumento del 50% en la producción de cemento (Frías et al., 2015).

Para esta disminución de CO² en la producción del cemento se puede emplear balasto degradado que, debido a sus características físicas y mecánicas ya no es apto para funcionar de lastre en las vías. Mediante la trituración de este balasto se podría emplear como adicción puzolánica en cementos. La investigación de (Yagüe García & González Gaya, 2020) tiene el objetivo conocer el comportamiento de las nuevas adiciones minerales de silicio-aluminio con actividad puzolánica, de valor añadido en la fabricación de cementos y materiales similares, obtenidos del uso del balasto de vía, un residuo de la infraestructura ferroviaria.

Los residuos de balasto se estudiaron como una adición puzolánica en cementos con sustituciones de 10% y 20% de residuos de balasto que estuvieron expuestos a entornos extremadamente agresivos.

Los morteros de cemento con niveles de sustitución puzolánico de 10% y 20% de balasto de vía reciclado se han estudiado por exposición a entornos agresivos: frío extremo (Madrid) y niebla marina salina (Barcelona).

3.3. Obras de renovación y rehabilitación de líneas ferroviarias.

3.3.1. Conceptos previos:

Para poder entender en que consiste una obra de rehabilitación o una obra de renovación ferroviaria hay que tener algunas definiciones claras. Estas definiciones vienen en la directiva 2016/797 del Parlamento Europeo y del consejo (Unión Europea, 2016).

Previamente vamos a definir que es un “sistema ferroviario de la unión”. El sistema ferroviario de la unión integra los elementos:

A. Las redes.

Las redes están compuestas por:

- las líneas especialmente construidas para la alta velocidad, equipadas para velocidades por lo general iguales o superiores a 250 km/h,
- las líneas especialmente acondicionadas para la alta velocidad, equipadas para velocidades del orden de 200 km/h,
- las líneas especialmente acondicionadas para la alta velocidad, de carácter específico debido a dificultades topográficas, de relieve o de entorno urbano, cuya velocidad deberá ajustarse caso por caso. Esta categoría incluye las líneas de interconexión entre las redes de alta velocidad y convencionales, los tramos de estación, el acceso a las terminales, almacenes, etc., que son recorridos a velocidad convencional por material rodante de «alta^[1]se^[2] velocidad»,
- líneas convencionales previstas para el transporte de viajeros,
- líneas convencionales previstas para el tráfico mixto (viajeros y mercancías),
- líneas convencionales dedicadas al tráfico de mercancías,
- nudos de viajeros,
- nudos de transporte de mercancías, incluidas las terminales intermodales,
- las vías de enlace entre los elementos anteriormente citados.

Estas redes incluirán los sistemas de gestión del tráfico, de posicionamiento y de navegación: instalaciones técnicas de tratamiento de datos y de telecomunicaciones previstas para el transporte de viajeros de largo recorrido y el transporte de mercancías en esta red con el fin de garantizar una explotación segura y armoniosa de la red y la gestión eficaz del tráfico.

B. Los vehículos.

Los vehículos de la Unión englobarán todos los vehículos aptos para circular por la totalidad o parte de la red de la Unión:

- Las locomotoras eléctricas y el material rodante utilizado en el transporte de viajeros, incluidas las unidades motrices los trenes automotores térmicos o eléctricos, y los coches de viajeros.
- Los vagones de mercancías, incluidos los vehículos de piso rebajado diseñados para toda la red y los vehículos diseñados para el transporte de camiones,
- vehículos especiales, tales como material rodante auxiliar.

Dentro de este sistema ferroviario existen los “subsistemas” que son las partes estructurales o funcionales del sistema ferroviario de la unión compuesta por:

- ámbitos de naturaleza estructural:

- infraestructura
 - energía
 - control-mando y señalización en tierra,
 - control-mando y señalización a bordo,
 - material rodante
- ámbitos de naturaleza funcional:
- explotación y gestión del tráfico
 - mantenimiento
 - aplicaciones telemáticas para servicios de viajeros y de transporte de mercancías.

El subsistema de infraestructura, que es en el que se va a centrar este trabajo, es la vía tendida, los equipos de vía, los pasos a nivel, las obras civiles (puentes, túneles, etc.), los elementos de las estaciones vinculados al ferrocarril (incluidas las entradas, andenes, zonas de acceso, locales de servicios, aseos y sistemas de información, así como sus características de accesibilidad para personas con discapacidades y personas con movilidad reducida) y los equipos de seguridad y protección.

Una obra de “Rehabilitación” consiste en los trabajos de modificación sustancial de un subsistema o de una parte del mismo que conlleven un cambio en el expediente técnico que acompaña a la declaración «CE» de verificación, si existe tal expediente, y que mejoren el rendimiento global del subsistema.

Una obra de “Renovación” son los trabajos importantes de sustitución de un subsistema o de una parte del mismo que no afecten al rendimiento global del subsistema.

3.3.2.Descripción de las obras de renovación y/o rehabilitación ferroviaria.

Teniendo en cuenta todos los conceptos anteriores, este trabajo se centra en las obras de renovación y/o rehabilitación del subsistema infraestructura, y más concretamente en los elementos que componen la vía tendida, como son el balasto, la traviesa y el carril, los aparatos de vía, como son los desvíos, travesías, aparatos de dilatación, escapes.

Las actuaciones principales que se realizan en una obra de rehabilitación y/o renovación de vía ferroviaria son:

- Movimiento de tierras y tratamientos de explanaciones. Estos movimientos de tierras se realizan con el fin de modificar trazados para aumentar radios de curvaturas y así aumentar la velocidad de las circulaciones y para el aumento del ancho de las plataformas para la duplicación de vías. El tratamiento de explanaciones se realiza para adaptar la explanada existente a las nuevas exigencias de tráfico ferroviario.

- Renovación, rehabilitación y mejora de superestructura ferroviaria que consiste en sustituir total o parcialmente los elementos que integran la vía tendida, como son el balasto, las traviesas, el carril y los aparatos de vía.
- Montaje de vía nueva en el caso de que haya alguna duplicación de vía o ejecución de alguna vía de apartado o estacionamiento nueva.

3.3.3.Elementos constitutivos de la sección transversal ferroviaria.

Según el (Ministerio de Fomento, 2015a) la sección transversal ferroviaria está constituida, de arriba abajo, por los siguientes elementos:

- Carril.
- Elementos de sujeción y apoyo entre carril y traviesas.
- Traviesas.
- Elementos de sujeción y apoyo bajo traviesas (opcionalmente).
- Base o banqueta de balasto: está constituida por piedra machacada de gran resistencia al desgaste, con granulometría uniforme y tamaños que oscilan aproximadamente entre 20 y 60 mm, según Pliego PF-6 del Ministerio de Fomento.
- Subbase. Constituida por una o varias capas, con la misión de contribuir al reparto de cargas y a dotar a la vía de la rigidez vertical adecuada, absorber vibraciones, evitar la contaminación del balasto por ascenso de finos, proteger la plataforma contra las heladas y evacuar las aguas de lluvia.

Lo habitual es que la subbase esté constituida por una única capa de subbalasto, aunque en el caso más general también puede estar constituida por una capa de cimentación, una anticontaminante y un fieltro anticontaminante.

- Subbalasto: constituido por grava arenosa de granulometría continua, compactada al 100 % del PM, no deformable al paso de maquinaria de obra y de baja permeabilidad, con el fin de proteger a la plataforma del agua de lluvia, todo ello según Pliego PF-7 del Ministerio de Fomento.
- Capa de cimentación: constituida por grava o zahorra bien graduadas de granulometría continua, compactada al 100 % del Proctor Normal (PN) y no deformable al paso de la maquinaria de obra. Se suele utilizar sobre explanadas o superficies del terraplén o excavación de capacidad portante media, no siendo necesaria, en general, sobre suelos QS3.
- Capa anticontaminante: constituida por arena de granulometría continua. Se suele utilizar sobre explanadas de baja capacidad portante. A veces se sustituye por otra capa de granulometría uniforme con función drenante.

- Filtro anticontaminante (geotextil): reduce el ascenso de los finos de la explanada a las capas superiores, facilitando la puesta en obra de éstas. Además, reduce la formación de roderas sobre la plataforma al paso de la maquinaria de obra.
- Capa de forma de la plataforma: es la capa superior de remate y coronación de la explanada o superficie del terraplén o excavación. Su función principal es mejorar la capacidad portante de ésta. Ha de ser compactable y de mejores características que las de la explanada.

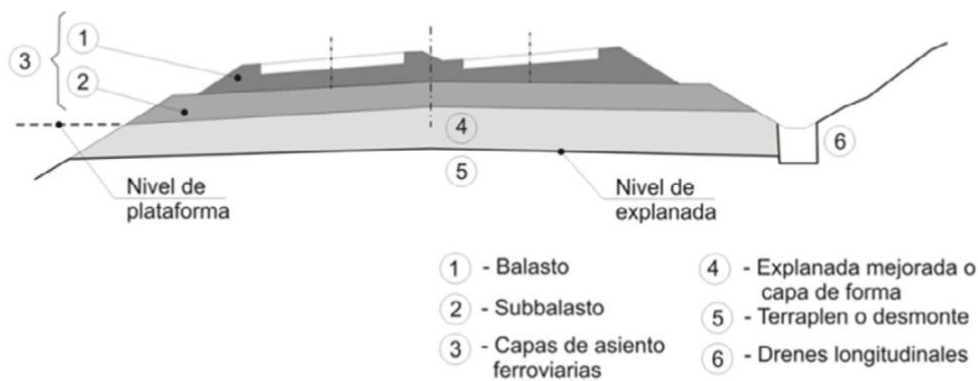


Imagen 21. Sección tipo ferroviaria.

La explanada ferroviaria bajo la capa de forma está constituida generalmente por el terreno natural (secciones en desmonte) o por material de aportación (secciones en terraplén). En el caso de sección a media ladera la composición será mixta. El material de aportación procederá, en general, de la traza o de préstamos cercanos.

Las características geotécnicas de la plataforma dependerán, en principio, de la calidad del material y de sus condiciones de puesta en obra (grado de compactación, módulo de deformación E_v , etc.). No obstante, la inclusión de una capa de forma, con los requisitos de calidad y espesor indicados en esta Instrucción y con las condiciones de puesta en obra recogidas en el correspondiente Pliego, permitirá aumentar la capacidad portante de la explanada de partida.

Además, la plataforma deberá estar dotada de una red de drenaje superficial y de otra profunda, en su caso, para recoger y evacuar las aguas procedentes de escorrentía, de filtraciones o subterráneas que puedan alterar las condiciones de ésta.

La base de balasto y la subbase constituyen las denominadas capas de asiento o de soporte de la vía, que son las responsables de su comportamiento en cuanto a rigidez, alineación, nivelación y drenaje.

3.3.4. Normativa aplicable y requisitos de los materiales a emplear en obras de renovación y/o rehabilitación.

- NAV 3-4-0.1 canteras suministradoras. prescripciones geotécnicas y de instalaciones de fabricación (Adif, 2007)
- Nota técnica. utilización de material de segundo uso en infraestructuras ferroviarias (agencia estatal de seguridad ferroviaria, 2022)
- NAV 7-1-3.9 reutilización del material ferroviario de vía procedente de desinstalaciones (ADIF, 2022b)
- NAP 1-2-4.0 Geología, geotecnia y estudio de los materiales (ADIF, 2023b)
- NAP 1-2-1.0. Metodología para el diseño del trazado ferroviario. (ADIF, 2024)
- NAP 1-2-0.1. índice y contenido tipo de los proyectos de plataforma ferroviaria (ADIF, 2023a)
- ET 03.360.004.0 Especificación Técnica. Balasto (ADIF, 2022a)
- ORDEN FOM/1269/2006, de 17 de abril, por la que se aprueban los Capítulos: 6.–Balasto y 7.–Subbalasto del pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios (PF) (Ministerio de Fomento, 2006)
- Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio, por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal (Ministerio de Fomento, 2015a)

4. Identificación de la necesidad / Gap en el conocimiento.

En la literatura publicada hasta la fecha no se han descrito los medios para la reutilización, valorización y reciclado de los materiales existentes en las vías ferroviarias a renovar para favorecer la economía circular de este tipo de obras. En este tipo de proyectos es fundamental la implementación de métodos para la reutilización del balasto dado que supone un alto porcentaje del material necesario en las obras de renovación ferroviaria.

Las vías de balasto convencionales representan una alta proporción de las vías ferroviarias mundiales (aprox. 90 %) (Indraratna, Salim, et al., 2011). Teniendo en cuenta la estrategia global de economías bajas en carbono, neutras en carbono y circulares, es importante maximizar la vida útil de las vías de balasto en lugar de reemplazar/construir nuevas vías (Guo et al., 2022).

La NAV 7-1-3.9 (ADIF, 2022b) “Reutilización del material ferroviario de vía procedente de desinstalaciones” establece la metodología a seguir en Adif y Adif AV (en adelante Adif) para clasificar el material procedente de levante, indicando criterios que no sean una simple inspección visual, de tal modo que se justifique correctamente la viabilidad de la reutilización del material levantado.

Para ello se establecerán criterios para la revisión del material proveniente de desinstalaciones y determinar su destino final, que puede ser su reutilización (directa o tras su regeneración y tratamiento en taller) o su enajenación y achatarramiento.

El objeto de este documento es regular el proceso para el control y gestión del material ferroviario que se libera de la vía debido a la renovación de las instalaciones existentes en trabajos de mejora y mantenimiento de Adif.

Por ello, es imprescindible efectuar un trabajo de clasificación y apartado de los materiales que pueden volver a emplearse, bien directamente o tras un tratamiento de regeneración, como material reutilizable (ADIF, 2022b).

Los materiales objeto de esta Instrucción son:

- Traviesas y sistemas de sujeción.
- Carriles.
- Aparatos de vía.
- Balasto.

Además, existe una norma técnica de la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria (AESF) (Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria, 2022) que clarifica la aplicación de la Especificaciones técnicas de interoperabilidad (Comisión europea, 2014) (Comisión Europea, 2023b) en lo relativo a Subsistemas que incluyen componentes de interoperabilidad aptos para el uso y válidos para ser reutilizados.

En estos documentos se recogen que características deben de tener los distintos materiales ya mencionados para que puedan ser reutilizados para las mismas funciones que tenían anteriormente, es decir, que características debe de tener una traviesa para seguir siendo una traviesa o un carril para seguir siendo un carril, y en el momento que no cumplan esas características los desechan, en ningún momento recoge la posibilidad de que esas traviesas, ese carril o ese balasto se puedan emplear de ninguna otra manera.

La búsqueda de una manera de valorización para todo este material presente en las obras de renovación o adecuación de vía debe de ser una prioridad para hacer más sostenibles esta tipología de obras.

Por ejemplo, la reutilización del balasto reduciría los costes, minimizaría la eliminación de este material y reduciría la extracción de la cantera. Hay varias normas que regulan las propiedades del balasto, como el tamaño, la forma, la dureza, la resistencia a la abrasión y la composición para proporcionar un mejor rendimiento de la plataforma ferroviaria, debido a la amplia variedad de materiales y condiciones ambientales a las que están sometidos.

Las especificaciones del balasto se basan en la ejecución de pruebas de caracterización y se pueden dividir según las propiedades de resistencia y las propiedades geométricas. En España esas especificaciones las podemos encontrar en la ET 03.360.004.0 Especificaciones técnicas. Balasto (ADIF, 2022a) .

La degradación del Balasto se observa con frecuencia bajo carga cíclica, y resulta en una capacidad de carga y un problema de drenaje de la pista de balasto. Para mantener la estabilidad y la seguridad, se necesitan mantenimientos periódicos, como la limpieza y el reemplazo, que producen una gran cantidad de

balasto desperdiciado. Por lo tanto, reutilizar el balasto deteriorado puede convertirse en un método considerable para el desarrollo ferroviario sostenible y la protección del medio ambiente (Jia et al., 2019) .

En los ensayos realizados por (Cescon et al., 2021) se llevaron a cabo una serie de pruebas como son el desgaste de los ángulos, difracción por rayos X y ensayos de forma según los estándares ASTM D582113 (2017) y ABNT NBR 5564 (2014) para evaluar las propiedades del balasto, así como un análisis de las características geométricas y mineralógicas de la grava, y el impacto de la variación de estas propiedades en el rendimiento del balasto. Se evaluó la viabilidad de reutilizar el balasto retirado de una línea de ferrocarril operativa, y se concluyó que el material todavía era adecuado para su reutilización, aunque sus propiedades han sufrido algunos cambios, sin modificar sus principales características y funciones.

(Jia et al., 2019) estudió el comportamiento mecánico de la mezcla de balasto usado más balasto nuevo para averiguar la proporción de peso del criterio del balasto reciclado. En este ensayo se realizaron una serie de grandes pruebas de cizallamiento directo con diferentes proporciones de peso (0%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50%) de balasto reciclado mezclado con balasto nuevo bajo diferentes tensiones normales. Los resultados mostraron que la reducción de la fuerza de corte de la mezcla es insignificante, cuando se mezcla con menos del 30% de balasto reciclado. Con el aumento de la proporción de balasto reciclado, la fuerza de corte y el número de coordinación se reducen y los desplazamientos se aumentan.

El balasto deteriorado se podría limpiar y cribar y añadirlo al balasto nuevo siempre que ambos tengan las mismas propiedades mineralógicas. Algo parecido se hace en las operaciones de mantenimiento de las líneas de ferrocarril en aquellas zonas donde la cantidad de balasto en la vía no es suficiente para el bateo de ésta y se agrega balasto nuevo al balasto existente.

Con todo lo anterior, y teniendo en cuenta que caminamos hacia una economía circular con una tasa de desperdicios que se aproxime a cero para conseguir hacer de la industria de la construcción una industria sostenible, en este trabajo vamos a identificar, dentro de una obra de renovación o rehabilitación ferroviaria, que materiales, ya presentes en esa línea ferroviaria, son susceptibles de reutilizarse, reciclarse o valorizarse.

5. Propuesta metodológica.

Dentro del marco europeo, para poder llevar a cabo el sistema ferroviario transeuropeo convencional y de alta velocidad e implementar la interoperabilidad que permita una circulación segura e ininterrumpida de trenes entre los países de la Unión Europea (UE) hay que llevar a cabo distintas obras de rehabilitación y renovación de líneas ferroviarias ya existentes para adaptar los condicionantes reglamentarios , técnicos y operativos que requiere la UE, todo esto sin perder de vista la sostenibilidad de este sistema ferroviario.

Por este motivo se ofrece en este trabajo un enfoque metodológico para la renovación y rehabilitación de la vía en el subsistema de infraestructura, con un enfoque en la reutilización y reciclaje de materiales

existentes empleándolos, siempre que sea posible, dentro de la misma obra, minimizando así la extracción de recursos naturales.

En el esquema que se muestra a continuación se muestran las actuaciones previas al comienzo de una obra de renovación ferroviaria para saber que material vamos a poder reutilizar, valorizar o reciclar y así poder dar las mejores soluciones a dicho material.

Para ello se averigua que categoría de línea es la existente y cuál va a ser la categoría futura según su código de tráfico (Comisión europea, 2014). Según este código, se averigua si es una línea de transporte de pasajeros, de transporte de mercancías o mixto, de cuáles son las características de la vía existente y futura, como son el tipo de gálibo, la carga por eje de los vehículos, que es el principal condicionante a la hora de calcular las capas granulares como la capa de forma y el subbalasto, la velocidad de la línea, que influye directamente en el trazado de ésta y la longitud de los andenes. Por otro lado, vamos a ver que normativa hay que seguir para saber si el material existente en la vía ferroviaria a renovar cumpliría con las exigencias propuestas por (ADIF, 2022b), para líneas que no tengan que ser interoperables, y por (Comisión europea, 2014) para líneas que tengan que ser interoperables, para su reutilización en la línea renovada.

En primer lugar, tras haber realizado la clasificación de la vía según la normativa ETI 1299/2014, se realiza la clasificación de los materiales que componen dicha vía. Dentro de ellos, se encuentran materiales no aptos para la reutilización y los que si son aptos para ser reutilizados.

Dentro de los materiales no aptos para la reutilización, podemos encontrar materiales que podrían alargar su vida útil dentro de la misma obra mediante una valorización de éstos, empleándolos para otro fin diferente al que fueron creados. Por otro lado, se encuentran los materiales que no se podrían valorizar en la misma obra debido a su estado y que su única salida llevarlos a un gestor autorizado.

Entre los materiales no valorizables nos encontramos con los carriles que, debido a su estado su única salida es el achatarramiento, y los aparatos de vías que pueden acabar como chatarra o ser transportados al centro de tecnología de vías.

Por otro lado, en los materiales valorizables tenemos los carriles, las traviesas y el balasto. Los carriles pueden reutilizarse para la formación de pantallas o para realizar hincas de carriles. Las traviesas, sin embargo, se emplean para la formación de material granular mediante machaqueo que se podría utilizar para la realización de rellenos, adecuación de caminos, formación de terraplenes o como áridos para el tratamiento bituminoso. El balasto, también se podrá reutilizar como material granular tras un proceso de machaqueo, al igual que las traviesas, y en este caso, se pueden realizar subbases granulares como zahorras y subbalasto, que se podrían emplear en adecuación de caminos, formación de terraplenes y como áridos para mezclas bituminosas.

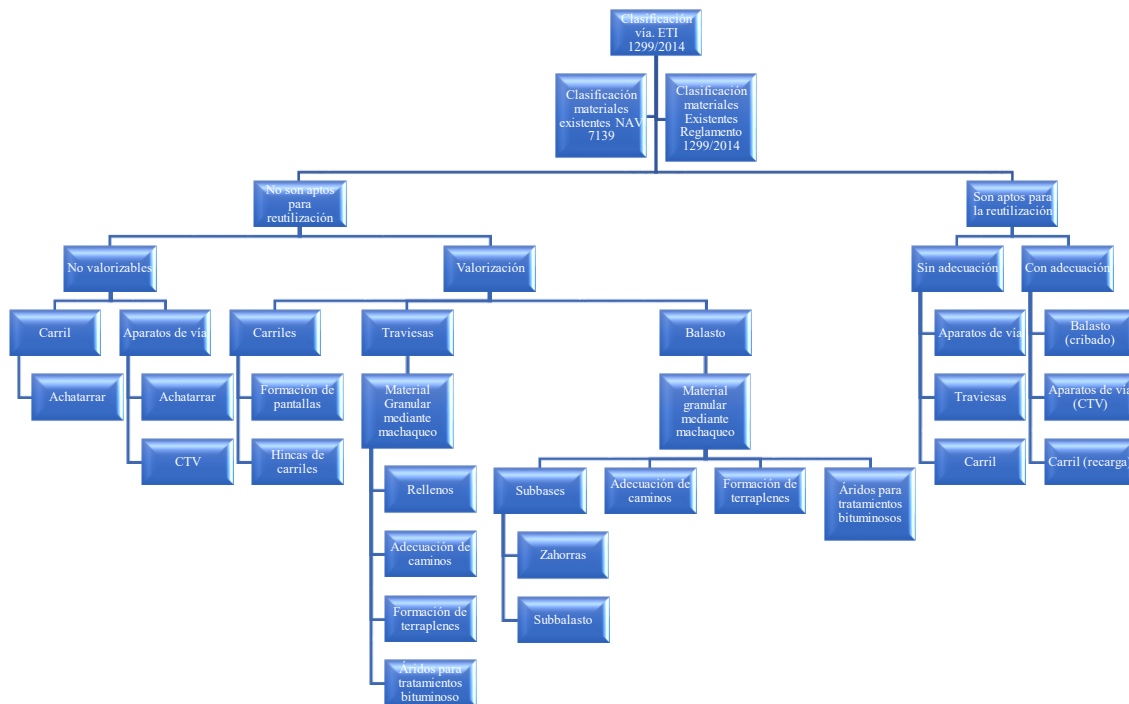
En contraposición, cuando los materiales son aptos para ser reutilizados, con la misma finalidad para la que fueron creados, se puede diferenciar el material sin adecuación y con adecuación, es decir el material que no requiere tratamiento previo para su nueva reutilización y los que si la necesita.

Dentro del material que no requiere adecuación se pueden encontrar aparatos de vía, traviesas o carriles. Entre los materiales que si requieren un tratamiento previo para su reutilización, podemos encontrar el balasto, que con un simple cribado puede generar un coste positivo en términos de sostenibilidad muy elevado, el carril, que mediante recargas puntuales puede usarse nuevamente evitando grandes costes económicos y medioambientales y los aparatos de vía.

Las actuaciones propuestas para los distintos tipos de materiales mencionados anteriormente serían siempre, en primer lugar, la reutilización directa en la misma obra, sin ningún tipo de transformación del material ya que es la que menor coste de sostenibilidad conlleva. Si esto no fuera posible, se intentaría la reutilización de estos materiales con una mínima transformación o adecuación, un cribado en el caso del balasto, para conseguir una granulometría apta para su reutilización y una recarga en el caso del carril, tanto de la vía tendida como de los aparatos de vía, siempre que sea posible dentro de la misma obra.

Si la reutilización del material de manera directa o con una mínima transformación o adecuación no fuera posible, se intentaría la valorización y/o reciclaje de los distintos materiales. Mediante esta valorización, de manera directa o mediante el reciclaje de los distintos materiales, se obtendría zahorra artificial reciclada (ZAR) de la trituración de las traviesas de hormigón, material granular procedente de la trituración del balasto como es la capa de forma y el subbalasto, que servirían para la mejora y adecuación de la plataforma ferroviaria.

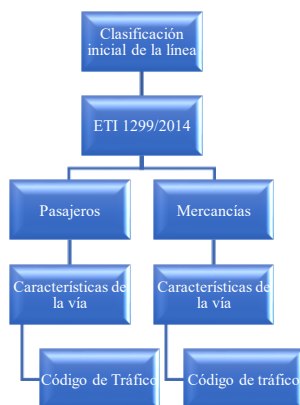
Estos procesos de reutilización, valorización y/o reciclaje se deben hacer conforme a la normativa. Para el carril, y aparatos de vía según (Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria, 2022) y (ADIF, 2022b) , balasto según (ADIF, 2007), (ADIF, 2022a) y (Ministerio de Fomento, 2006), balasto y traviesas según (Ministerio de la presidencia, 2008) y (Ministerio de Fomento, 2015b).



Esquema 5-1. Propuesta metodológica de economía circular en obras de renovación y/o rehabilitaciones ferroviarias.

5.1. Clasificación de la línea actual y futura.

Para la identificación y clasificación de la línea actual, así como para clasificación de la línea una vez reformada nos basaremos en las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad (ETI) 1299/2014.

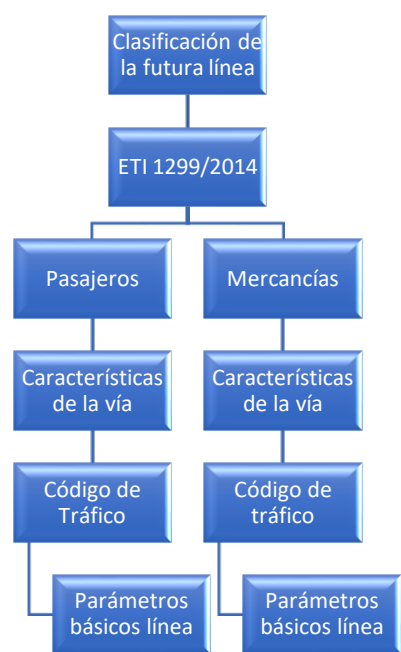


Esquema 5.1-1. Clasificación inicial de la línea.

Una vez que tenemos clasificada la línea ferroviaria actual ya podemos conocer los parámetros básicos de esa línea.

Posteriormente necesitamos saber cuál va a ser la nueva clasificación de la línea para saber cuáles son los parámetros básicos del nuevo subsistema de infraestructura a adoptar para tomar las mejores decisiones

posibles sobre el material existente ya en esa línea. Para eso seguiremos un esquema muy parecido al anterior aplicando la misma ETI.



Esquema 5.1-2. Clasificación de la futura línea.

Esta ETI clasifica las líneas según si es para pasajeros o para mercancías según la Tabla 1 y la Tabla 2

Tabla 1. Parámetros de prestación para tráfico de pasajeros. (Comisión europea, 2014)

Código de tráfico	Gálibo	Carga por eje (tn)	Velocidad en la línea (KM/h)	Longitud útil de los andenes
P1	GC	17 (*)	250-300	400
P2	GB	20 (*)	200-250	200-400
P3	DE3	22,5 (**)	120-200	200-400
P4	GB	22,5 (**)	120-200	200-400
P5	GA	20 (**)	80-120	50-200
P6	G1	12 (**)	n.d.	n.d.
P1520	S	22,5 (**)	80-160	35-400
P1600	IRL1	22,5 (**)	80-160	75-240

Tabla 2. Parámetros de prestación para tráfico de mercancías. (Comisión europea, 2014)

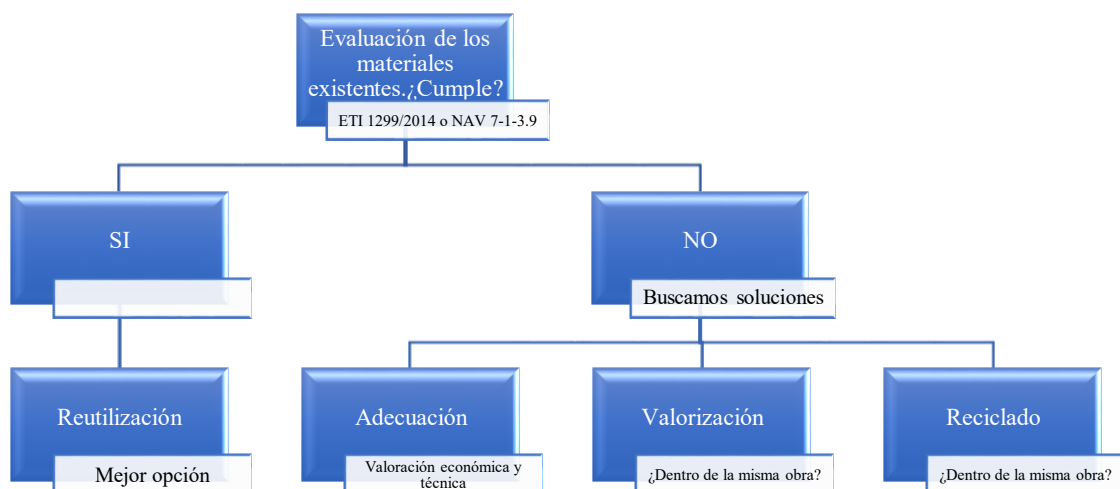
Código de tráfico	Gálibo	Carga por eje (tn)	Velocidad en la línea (KM/h)	Longitud útil de los andenes
F1	GC	22,5 (*)	100-120	740-1050
F2	GB	22,5 (*)	100-120	600-1050
F3	GA	20 (*)	60-100	500-1050
F4	G1	18 (*)	n.d.	n.d.
P1520	S	25 (*)	50-120	1050
P1600	IRL1	22,5 (*)	50-100	150-450

Si nuestra obra es una obra de acondicionamiento habría que identificar la nueva clasificación de la línea. En las obras de renovación de vía la clasificación inicial de la vía se mantiene.

5.2. Evaluación del material existente.

En segundo lugar, se procede a una evaluación general del estado de los materiales de la vía a los que se refiere la NAV 7-1-3.9, viendo cuales de ellos cumplen con las exigencias de dicha norma para volver a utilizar en esa misma actuación y cuáles no.

En el caso de que la vía tenga que ser interoperable habría que tener en cuenta el reglamento de UE 1299/2014 de la Comisión Europea.



Esquema 5.2-1. Diagrama de flujo para la toma de decisiones de los materiales.

En la siguiente tabla se recogen los materiales que normalmente están presentes en las obras de adecuación y renovación indicando su tipología.

Tabla 3. Identificación de los materiales existentes en obra.

Material	Tipo
Carril	RN 45
	54 E1
	60 E1
Aparatos de vía	Desvío
	Aparatos de dilatación
	Travesía
	Doble diagonal
	Cambiador de hilo
Traviesas	Madera
	Bibloque
	Monobloque
Balasto	Tipo 1
	Tipo 2
	Tipo 3

Como se puede ver en el Esquema 5.2-1 la mejor opción sería que los materiales cumplieren para su reutilización en la misma obra, pero salvo que en esa línea haya habido alguna renovación puntual, bien sea de balasto, traviesas o carril debido a algún acontecimiento climático extremo, un accidente o un descarrilo, no suele suceder que los materiales existentes sean aptos para su reutilización. En la mayoría de los casos hay que buscar soluciones para darle una segunda vida a esos materiales aplicando el principio de economía circular para una mayor sostenibilidad de este tipo de obras.

A continuación, se proponen distintas alternativas para cada uno de los elementos mencionados anteriormente.

5.2.1. Carriles.

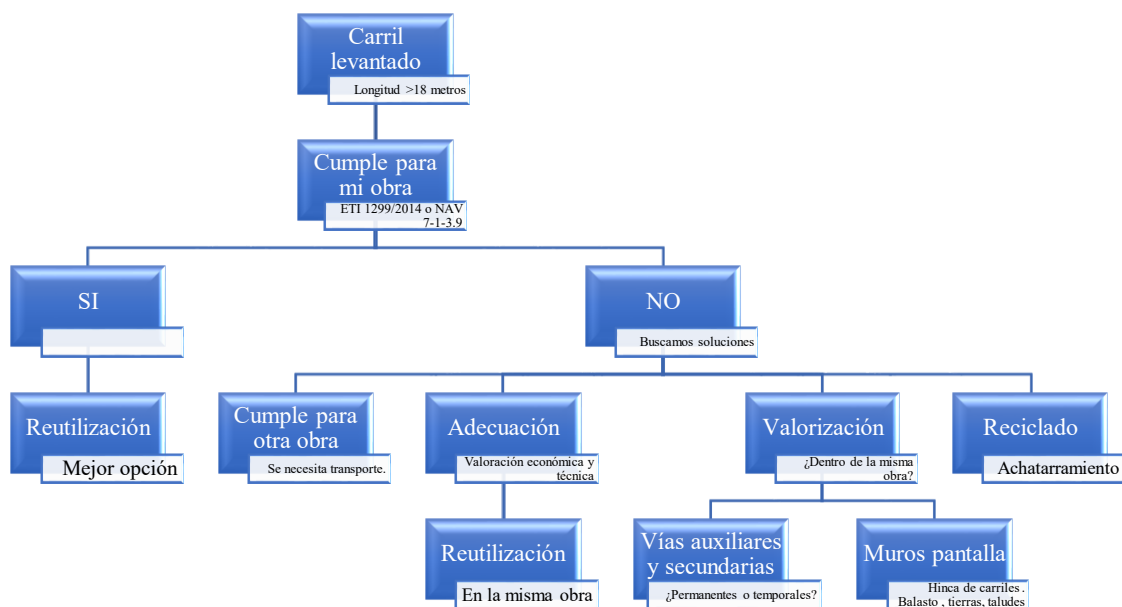
El carril es un elemento que tienen un gran peso medioambiental dentro de las obras de renovación y rehabilitación ya que, como hemos visto anteriormente, para la extracción del hierro en los procesos mineros se genera una gran cantidad de subproducto al igual que en la fabricación del acero en los hornos.

Aunque ya se ha hablado de las posibles aplicaciones de estos subproductos en obras de ingeniería civil, sería mucho más sostenible disminuir la fabricación del acero para no generarlos.

Como norma general el carril que nos vamos a encontrar en obras de renovación y rehabilitación es del tipo 54 E1, que pesa al salir de fábrica 54 Kg/ml. Esto supone 108.000 Kg de acero por cada kilómetro de renovación, que son 1710 Kg de CO₂/Tn que harían un total de 184.680 Tn de CO₂ por cada Km de renovación.

Por este motivo el carril es uno de los elementos a tener más en cuenta a la hora de llevarlo a achatar.

En el Esquema 5.2.1-1 podemos ver que opciones de uso tenemos para el carril a renovar.



Esquema 5.2.1-1. Diagrama de flujo para toma de decisiones en el uso del carril.

Si es verdad que, si el carril no cumple con las especificaciones de las normativas mencionadas, es el elemento más complicado de valorizar en una obra de renovación. Se podría utilizar en un primer momento para el montaje de la vía auxiliar, pero una vez terminada la obra habría que buscarle otras salidas que no fuera mandarlo a achatar.

En las obras de renovación, a la hora de levantar el carril, es muy importante la longitud de las barras del carril a renovar. Si el carril cumple con las especificaciones para poder ser reutilizado en esa misma obra, habría que cortarlo con mayor longitud posible, y ésta dependerá del modo de transporte y la localización de la zona de acopio provisional en la que se acopie el carril durante la realización del resto de los trabajos.

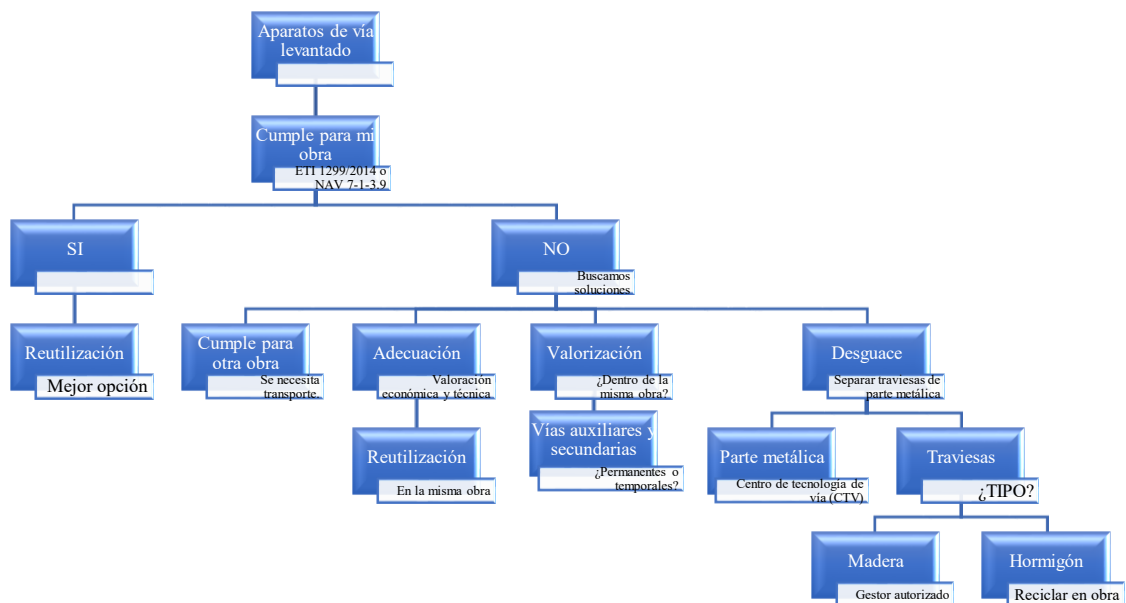
Si el carril no fuera apto para su reutilización en la misma obra, pero se quisiera reutilizar en otra obra habría que cortar el carril con una longitud mínima de 18 metros, que es el equivalente a una barra elemental en carril de 54.

Otra manera de poder reutilizar carriles que no cumplen con los parámetros establecidos es mediante la regeneración. Esta regeneración consiste en volver a darle al carril los parámetros necesarios para su colocación en la Red de Ferrocarriles de Interés General (RFIG) mediante recarga con soldaduras. Este proceso que de manera puntual se podría realizar en obra, si es con carácter general habría que mandar el carril fuera de la obra a instalaciones industriales.

Otros usos que se le pueden dar al carril, aunque con una entidad mucho menor, es la de la formación de muros pantalla para la ampliación de terraplenes mediante el hincado de éstos y para la formación de muretes guardabalasto.

5.2.2. Aparatos de vía.

Para la gestión de estos aparatos de vía vamos a seguir el siguiente esquema.



Esquema 5.2.2-1. Diagrama de flujo para la toma de decisiones en el uso de los aparatos de vía.

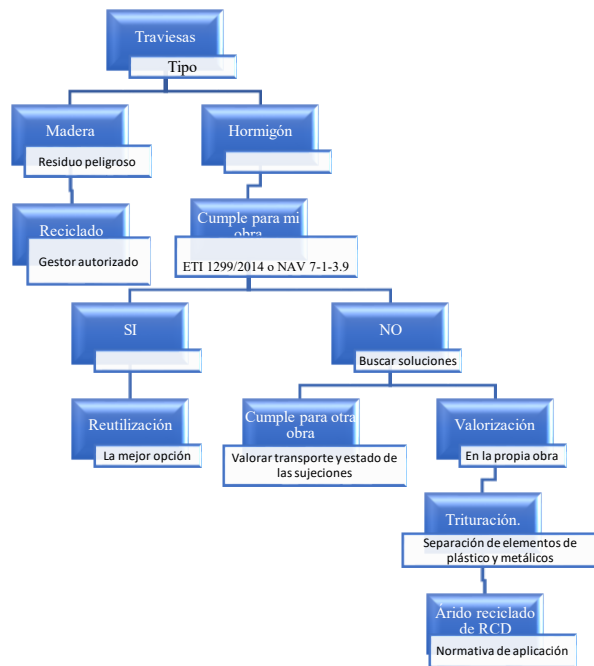
Debido a la gran singularidad de estos elementos de la vía, si debido a su estado no fueran aptos para emplearlos nuevamente como aparatos de vía, bien sea en la misma línea o en otra con una categoría inferior, ni fueran aptos para poder regenerarlos, el siguiente paso es separar la parte metálica de las traviesas y gestionarlo por separado.

En la gestión de la parte metálica en obra, hoy en día, hay poco que hacer, únicamente mandarlo a las instalaciones del centro de tecnología de vía (CTV).

5.2.3. Traviesas.

Lo más frecuente en una obra de renovación y/o rehabilitación es encontrarte con traviesas de hormigón en los terraplenes y trincheras y con traviesas de madera en los túneles y viaductos.

Para la gestión de estas traviesas se sigue el siguiente esquema.



Esquema 5.2.3-1. Diagrama de flujo para la toma de decisiones en el uso de las traviesas.

Las traviesas de madera utilizadas en la red ferroviaria española, si no cumplen con las exigencias para su reutilización en la misma obra no pueden ser valorizadas por la misma obra ya que contiene sustancias potencialmente peligrosas para la salud debido a su tratamiento con creosota y se catalogan como un residuo peligroso según LER con el código 170204 (Vidrio, plástico y madera que contienen sustancias peligrosas o están contaminadas por ellas).

Con respecto a las traviesas de hormigón, para hacernos un cálculo rápido hay que saber que cada traviesa de hormigón contiene aproximadamente 0,12 m³ de hormigón. El CO₂ equivalente para la fabricación de 1 m³ de hormigón es de 285 Kg. Sabiendo que cada kilómetro de vía contiene 1667 traviesas, las emisiones equivalentes de CO₂ por cada kilómetro de renovación únicamente debido a la fabricación de esas traviesas es de 57 Tn de CO₂. De aquí la importancia de la reutilización de las traviesas siempre que se su estado lo permita.

En el caso de que las traviesas no pudieran reutilizarse como traviesas, al ser de hormigón y como ya se ha visto anteriormente, mediante la trituración de éstas y la separación de los pequeños elementos de plástico y las armaduras se podrían utilizar como material granular (árido reciclado de RCD) para rellenos, adecuación de caminos de acceso, formación de terraplenes, mejora de explanadas, áridos para tratamientos

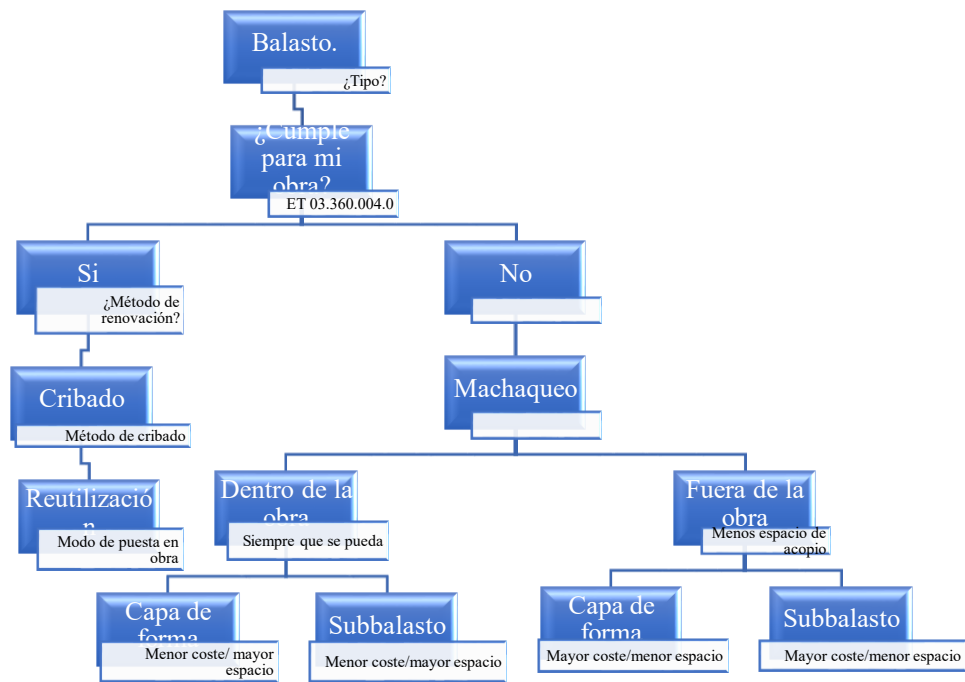
bituminosos como simples dobles y triples tratamientos en impermeabilización de explanadas. Estas actividades mencionadas son muy comunes en las obras de renovación de vía.

Si es cierto que, por cada kilómetro de renovación de vía simple, en el caso de no poder reutilizar ninguna traviesa para su función principal, el volumen obtenido de material granular no sería muy grande, estaría en torno a los 200 m3 pero supondría un ahorro económico importante al no tener que llevarlas a vertedero y potenciar así la economía circular.

5.2.4. Balasto.

Sin duda alguna el balasto es el mayor de los residuos generados en una obra de renovación de vía. En una vía simple (una sola vía) el volumen de balasto por metro lineal de vía puede estar en torno a los 1,7 – 1,8 m3/ml, con lo que tendríamos un total de 1700 – 1800 m3/km, que con una densidad aparente del balasto puesto en obra de 1,6 Tn/m3 harían un total de 2.800 Tn/km . Aunque la emisión de CO2 equivalente en la fabricación de áridos es de 8,9 Kg de CO2 eq (Aggregates Europe & Federación de áridos, 2023) por cada tonelada de árido fabricado, el volumen tan grande de este material que se necesita hace que por cada km de vía renovada la aportación de balasto nuevo suponga, únicamente su fabricación, la emisión de 25 tn de CO2 equivalente, de aquí la importancia de la reutilización del todo el balasto que se pueda.

Para una correcta gestión del balasto en las obras de renovación y/o rehabilitación se sigue el siguiente esquema.



Esquema 5.2.4-1. Diagrama de flujo para la toma de decisiones en el uso del balasto.

Como se ve en los distintos estudios mencionados en este trabajo la reutilización del balasto es posible y además necesaria para la sostenibilidad del ferrocarril.

Si el tipo de balasto existente en la línea es compatible con el código de tráfico de la nueva línea, lo mejor es la reutilización del mayor volumen de éste posible, ya que como normal general, como se puede ver en Imagen 22 no suele haber una cantera homologada de balasto cerca de nuestra obra, con lo que el coste del transporte suele ser bastante elevado.

Para la reutilización del balasto es muy importante la forma de ejecución en la que se quiera hacer la renovación o la rehabilitación.

Si la renovación del balasto se hace con desguarnecedora se ahorraría el tener que llevar todo el balasto a un acopio, cribarlo allí y volver a ponerlo en obra, ya que la propia desguarnecedora tiene cribas que al mismo tiempo que van levantando el balasto de la vía por delante del tren de trabajo, lo criban y lo van soltando el por la parte trasera del tren de trabajo. El resto del material que por granulometría no se pudiera reutilizar se llevaría en el tren de tolvas hasta un punto de vertido para su transporte a un acopio y posterior tratamiento.

Este método mediante desguarnecedora es el más recomendable cuando la obra tiene pocos accesos para la maquinaria de obra pública tradicional, para las renovaciones de vía única que por la estrechez de la plataforma impiden el cruce de vehículos en la plataforma, pero únicamente se puede utilizar cuando la explanada existente no necesita un refuerzo de material granular.

Por otro lado, si la obra cuenta con suficientes accesos para la maquinaria de obra pública, consta de una plataforma lo suficientemente ancha para el cruce de vehículos y/o la plataforma existente necesita un refuerzo mediante la suplementación de capas granulares, la renovación se podría hacer con maquinaria de obra pública. En este caso, el balasto que se levanta de la traza se llevaría a un acopio para su cribado y posterior puesta en obra. En este caso, el material que no se pudiera reutilizar no necesitaría un segundo transporte al encontrarse ya en acopio para su tratamiento.

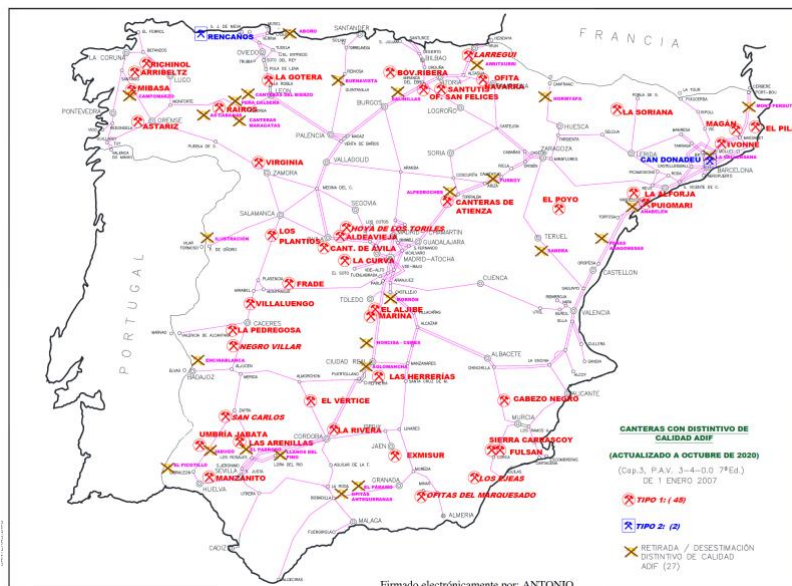


Imagen 22. Canteras de balasto homologadas por ADIF octubre 2020.

El residuo de balasto que no pueda ser reutilizado, que, si no se reutilizara nada, como ya he mencionado con anterioridad, puede llegar a ser de un volumen muy importante, que llevarlo a vertedero supondría un coste muy importante y no solo en términos económicos, es fácil transformarlo en un material granular con el único tratamiento previo de un machaqueo, y que, debido a sus propiedades físicas, su podría utilizar en las capas superiores de los terraplenes como suelo seleccionado, zahorras o subbalasto.

Para hacernos una idea del ahorro tan importante que supondría la valorización de este material dentro de la misma obra vamos a suponer que todo el balasto lo transformamos en árido, que podría ser zahorras para adecuación de caminos o en subbalasto para la mejora de la plataforma existente. Obtendríamos un total de 1.260 m³ por cada kilómetro de renovación y vía simple.

Todo este material serviría, por ejemplo, para la adaptación de la plataforma ferroviaria al nuevo régimen de cargas necesarias mediante la formación de capas de terminación con alta capacidad portante en la plataforma existente contribuyendo a la adaptación del subsistema de infraestructura a la nueva normativa.

5.2.5. Valoración del ahorro de costes económicos y ambientales.

Por último, en esta metodología se valorará el ahorro tanto económico como ambiental de la reutilización, valorización o reciclado de los distintos materiales existentes.

Estos costes varían según cada tipo de obra y sobre todo según su localización debido a la gran influencia del transporte de los materiales en los costes estudiados.

Para la valoración de los costes económicos vamos a ver la diferencia del importe en euros (€) que supone por cada kilómetro de renovación de vía única el reutilizar, valorizar, reciclar o llevar a vertedero cada uno de los distintos materiales existentes.

Para la valoración de los costes ambientales vamos a tener en cuenta el CO₂eq de la fabricación de cada uno de los materiales nuevos que habría que poner en obra comparándola con el coste que supondría, en términos de CO₂eq también, el proceso de reutilización, valorización o reciclaje de estos materiales para su utilización en la misma obra.

De esta manera nos podremos hacer una idea del ahorro que supone para cada obra la aplicación de la economía circular de estos materiales existentes.

6. Aplicación a un caso de estudio. Reciclado del balasto como capa de forma, zahorra y subbalasto en una obra de renovación de vía ferroviaria.

6.1. Presentación de la línea.

La obra sobre la que se basa nuestro caso de estudio es un proyecto constructivo de Renovación de vía y Adaptaciones desde la estación de Monfragüe hasta Plasencia (Cáceres). Este tramo está incluido en la Línea de Alta Velocidad Madrid – Extremadura. Este proyecto constructivo consistía básicamente en la renovación de todos los elementos de la vía tendida (balasto traviesa y carril) en una longitud de 16.885,70 metros y la renovación y adaptación de la estación de Plasencia en la que había duplicaciones de vía y ampliaciones de andenes.

La línea para renovar y adaptar pertenecía a la línea 530 Monfragüe – Plasencia de ancho Ibérico (1668 mm) y sin electrificar con una velocidad máxima de 90 km/h, con curvas de radio variable entre 395 y 2000 metros y de vía única con secciones como las que se muestran en la Imagen 23 e Imagen 24 .

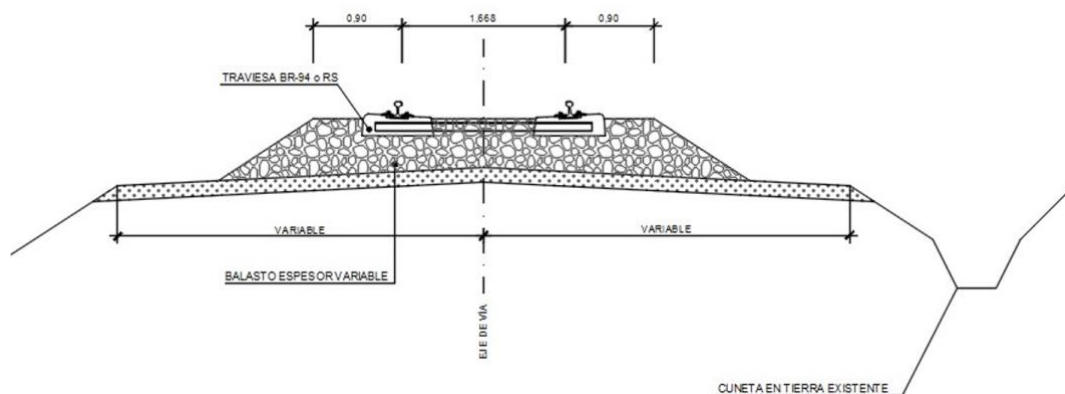


Imagen 23. Sección de vía existente en recta. Línea 530 Monfragüe – Plasencia.

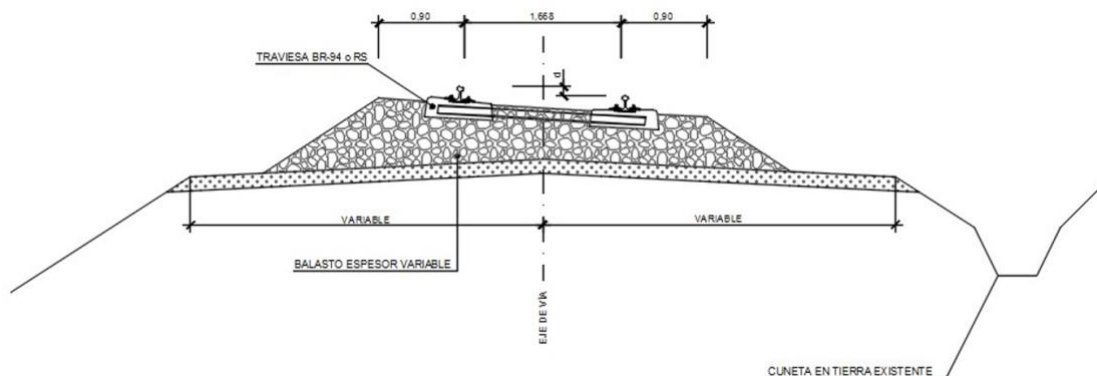


Imagen 24. Sección de vía existente en curva. Línea 530 Monfragüe - Plasencia.

El material existente en esta línea era:

- Carril UIC de 45 y 54
- Aparatos de vía:
 - o Desvíos Tipo DS-B1
 - o Desvíos Tipo DS-A
- Traviesas:
 - o Tipo RS (hormigón Bibloque) en plena vía
 - o Madera en vías auxiliares y desvíos.
- Balasto: Varios tipos.

6.2. Ámbito de estudio.

Para este caso de estudio nos vamos a centrar en el reciclaje del balasto, en como mediante un simple proceso de machaqueo se puede utilizar dentro de la misma obra como capas de material granular, para la mejora de la plataforma ferroviaria añadiendo la capa de forma y el subbalasto obteniendo así la sección tipo correspondiente a la Imagen 21.

6.3. Aplicación de la metodología.

Para la aplicación de la metodología descrita en el apartado anterior vamos a seguir los siguientes pasos.

- Identificación de la línea actual: Como hemos visto en la presentación de la línea, ésta pertenece a la RFIG y se dedica únicamente al tráfico de pasajeros con un código de tráfico P5.
- La futura línea va a pertenecer a la línea de Alta Velocidad Madrid – Extremadura dedicada el tráfico de pasajeros con un código de tráfico P1.
- Evaluación del material existente.
 - o En esta línea existían dos tipos de carril, el carril tipo UIC de 45 que no es interoperable por lo que no se puede reutilizar y el carril UIC de 54 que aunque si es

interoperable debido al desgaste de este no cumple los parámetros de la norma para el tipo de línea resultante.

- Los aparatos de vía que nos encontrábamos en la línea eran desvíos de los tipos A y B1, ninguno de los dos interoperables por lo que no se pueden reutilizar en las vías principales, pero los tipos B1 sí que se podrían usar para las vías de apartado.
 - Ninguno de los dos tipos de traviesas que existían en la línea eran interoperables. Las traviesas de madera, como hemos visto anteriormente son consideradas residuos peligrosos y fueron llevadas directamente a un gestor autorizado. Las traviesas RS fueron acopiadas para su retirada por parte de Adif debido a que no existía un precio en el proyecto para su demolición en obra.
 - Para la identificación del balasto se hicieron catas y ensayos viéndose que existían varios tipos de balasto en la línea, tipo 1 y tipo 2, aunque el tipo predominante era el de tipo 1. Aun así, desde la propiedad, insistieron en que no querían que se reutilizara ninguna cantidad de balasto.
- Análisis de los costes económicos y ambientales.

6.4. Antecedentes del caso de estudio.

Las plataformas ferroviarias de la red convencional existentes carecen, en la mayoría de los casos, de una explanada apta para las nuevas cargas y los nuevos tráficos ferroviarios ya que su ejecución es muy anterior a los nuevos pliegos que existen actualmente, además de que para su construcción las técnicas empleadas no eran, ni mucho menos, las existentes actualmente.

“Como criterio general, en el caso de obra nueva, se deberá disponer siempre de una plataforma con capacidad portante alta, clase P3, con objeto de minimizar los espesores necesarios de balasto y subbalasto y de mejorar el comportamiento a largo plazo. Para ello será necesario colocar, en general, una capa de forma, con las características recogidas en el apartado siguiente. En casos excepcionales (disponibilidad de materiales, bajo tráfico, etc.) y tras los adecuados estudios justificativos, se podrán admitir plataformas de capacidad portante P1 y P2, lo que supondrá colocar mayores espesores de subbalasto que en el caso de plataformas P3 (el espesor de balasto en una línea es normalmente uniforme en toda su longitud por lo que si se usan plataformas de capacidad portante menor en unas secciones que en otras ello conllevara mayores espesores de subbalasto)” (Ministerio de Fomento, 2015a).

PLATAFORMA	CAPACIDAD PORTANTE
P 1	Baja
P 2	Media
P 3	Alta

Imagen 25. Tipos de plataformas ferroviarias según su capacidad portante. (Ministerio de Fomento, 2015a).

Para adaptar estas explanadas a las nuevas cargas ferroviarias se necesita reforzar el terraplén con capas granulométricas superiores, como son la capa de forma y el subbalasto, para dotarlo de una mayor capacidad portante, necesaria para un reparto de cargas homogéneo que evitan que se puedan producir deformaciones no deseadas en la plataforma lo que afectaría a la geometría de la vía y, en consecuencia, la seguridad del tráfico ferroviario. Estas capas granulométricas impermeables son fundamentales para mantener un nivel de humedad óptimo en el terraplén mediante el drenaje eficaz del agua de lluvia hacia los taludes, impidiendo así que toda el agua de la plataforma se filtre hacia el núcleo pudiendo desestabilizar la plataforma y favoreciendo el riesgo de deslizamientos o hundimientos, incrementando así los costes asociados al mantenimiento de esta infraestructura.

Explanada (superficie del terraplén o excavación)		Clase de plataforma por su capacidad portante	Requisitos de la capa de forma		
Clase de calidad de suelos	CBR ^a (min) ⁽¹⁾		Clase de calidad de suelos	CBR ^b (min)	Mínimo espesor: "e _f " (m)
QS 1	2	P 1	QS 1	2	⁽²⁾
		P 2	QS 2	5	0,50
		P 2	QS 3	17	0,35
		P 3	QS 3	17	0,50
QS 2	5	P 2	QS 2	5	⁽³⁾
		P 3	QS 3	17	0,35
QS 3	17	P 3	QS 3	17	⁽⁴⁾

Imagen 26. Determinación de la capacidad portante de la plataforma.

En la Imagen 27 se muestra la geometría y la disposición de las distintas capas de las explanadas ferroviarias según la Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias (IF-3) (Ministerio de Fomento, 2015a) en el que se puede ver como la explanada se complementa con capas granulométricas como son la capa de forma y el subbalasto.

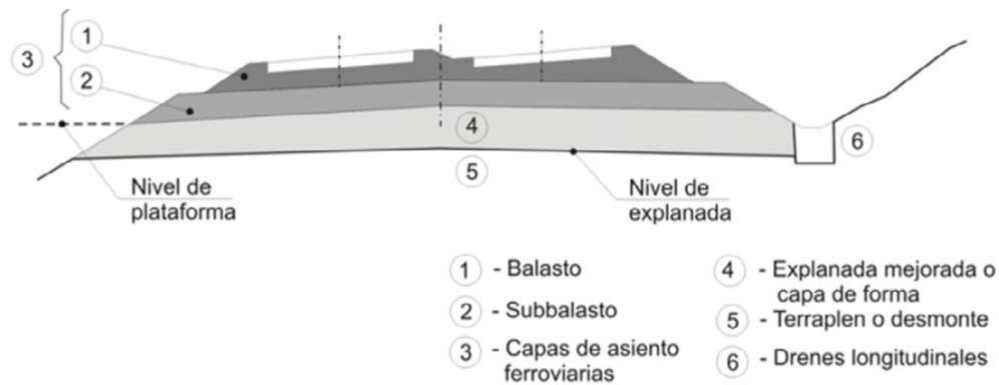


Imagen 27. Sección transversal ferroviaria. (Ministerio de Fomento, 2015a).

Estas capas de forma y subbalasto se obtienen de manera tradicional de las canteras, originando así una extracción de recursos naturales y unos residuos que se llevan a vertedero que como veremos a continuación se podrían evitar.

6.5. Inspección de la explanada y del balasto existente.

Esta falta de capacidad portante e impermeabilidad de la explanada se aprecia especialmente en los terraplenes donde la cama de balasto es considerablemente mayor a los 30 centímetros, que son los que marca la norma NAV 3-4-3.0 (ADIF, 2015) (Imagen 28) para el balasto bajo traviesa en sección tipo recta, ya que se ha ido manteniendo la rasante mediante los trabajos de mantenimiento consistentes en el vertiendo balasto, bateo, perfilado y estabilizado de la vía, y/o está este balasto completamente saturado de finos invalidando así la función del balasto como se puede ver en la Imagen 29 y la Imagen 30.

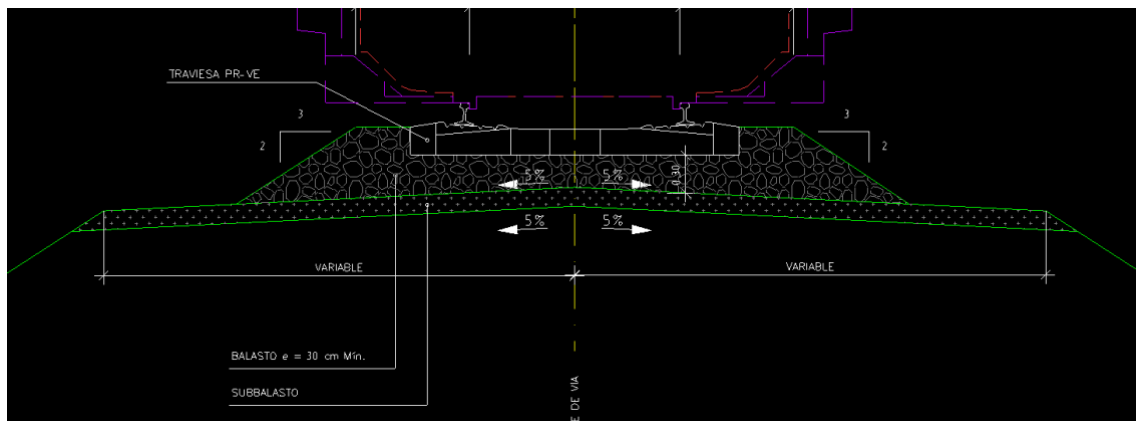


Imagen 28. Sección tipo recta balasto bajo traviesa.



Imagen 29. Cata hilo alto para clasificación de balasto, balasto bajo traviesa y calidad de explanada.



Imagen 30. Cata hilo bajo para clasificación de balasto, balasto bajo traviesa y calidad de explanada.

Actualmente, en las renovaciones de la infraestructura ferroviaria convencional existente, en lo que a la mejora y adecuación de la plataforma se refiere, existen varios problemas entre los que podemos destacar que son obras lineales de bastante longitud, con accesos bastante limitados a la plataforma e incluso en algunos casos inexistentes durante toda la longitud de la renovación, la falta de canteras cerca de la traza de la obra de renovación y la falta de zonas de vertido autorizado para todo el material pétreo.

6.6. Caracterización del material de la explanada.

Una vez realizada la inspección visual en obra del material existente en la explanada se procede a caracterizarlo mediante ensayos en laboratorio. Los resultados obtenidos para la explanada fueron los que se muestran en la Tabla 4. Como se puede ver la plataforma carecía de material granular, como la capa de forma y del subbalasto.

Tabla 4. Resumen de datos obtenidos en la caracterización de la explanada.

PK	Hilo	Ref. Muestra	Clasificación suelo (FOM 1382/02)
15+900	Alto	SU01	Tolerable
15+100	Alto	SU02	Tolerable
11+400	Alto	SU03	Adecuado
13+450	Alto	SU04	Tolerable
12+950	Alto	SU05	Tolerable
12+200	Alto	SU06	Tolerable
10+440	Alto	SU07	Adecuado
10+750	Alto	SU08	Tolerable
10+200	Alto	SU09	Adecuado
9+440	Alto	SU10	Adecuado
8+750	Recta	SU11	Tolerable
7+700	Recta	SU12	Tolerable
7+290	Bajo	SU13	Adecuado
7+100	Bajo	SU14	Adecuado
5+300	Bajo	SU15	Tolerable
3+300	Bajo	SU16	Tolerable
2+300	Recta	SU17	Adecuado
1+700	Alto	SU18	Tolerable
1+500	Bajo	SU19	Adecuado

A continuación, se muestran dos ensayos completos de la caracterización de la explanada. La muestra SU 14 (Imagen 31) y la muestra SU 4 (Imagen 32).

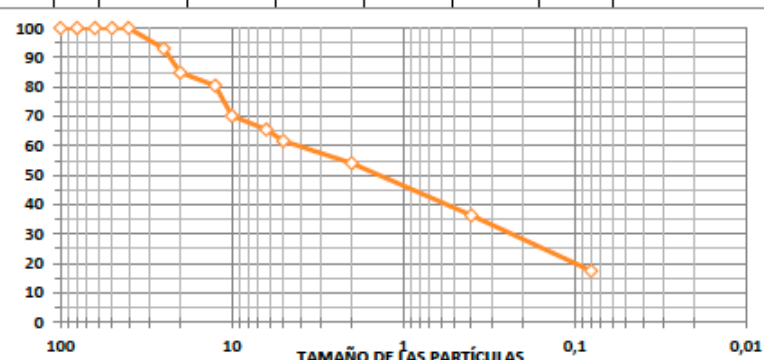
ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN, ESTADO Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS																					
OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN: Determinar características y propiedades geométricas, físicas, químicas y mecánicas para clasificarlos y evaluar su comportamiento para su uso en obra civil.																					
PETICIONARIO: VIAS Y CONSTRUCCIONES DIRECCIÓN: C/ de los milanos n °10 , 10004 Cáceres OBRA: ADECUACION DE VIAS PLASENCIA Y MONFRAGUE ÁREA DE ACREDITACIÓN: VSG					Nº PETICIÓN: 9358 REF. OBRA: EXP-1441 Nº TRABAJO: 1441/1817/25889-94 REFERENCIA MUESTRA: SU-14																
TIPO DE MUESTRA Y ESTADO EN QUE LLEGA: Alterada en saco IDENTIFICACIÓN DEL SUELO: suelo CONDICIONES DE ENSAYO: Normales; según procedimiento de ensayo					FECHA DE ENTRADA MUESTRA: 19/05/2021 PROCEDENCIA: pk 7+100 CATA EN HILO BAJO PROFUNDIDAD MUESTRA (m.): -																
ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO. UNE 103.101.																					
Tamices	% Pasa	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.7em;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">BOLOS</th> <th style="width: 10%;">GRAVA GRUESA</th> <th style="width: 10%;">GRAVA MEDIA</th> <th style="width: 10%;">GRAVA FINA</th> <th style="width: 10%;">ARENA GRUESA</th> <th style="width: 10%;">ARENA MEDIA</th> <th style="width: 10%;">ARENA FINA</th> </tr> </thead> </table>								BOLOS	GRAVA GRUESA	GRAVA MEDIA	GRAVA FINA	ARENA GRUESA	ARENA MEDIA	ARENA FINA					
BOLOS	GRAVA GRUESA	GRAVA MEDIA	GRAVA FINA	ARENA GRUESA	ARENA MEDIA	ARENA FINA															
100	100,0																				
80	100,0																				
63	100,0																				
50	100,0																				
40	100,0																				
25	93,0																				
20	84,9																				
12,5	80,5																				
10,0	70,2																				
6,3	65,6																				
5,0	61,6																				
2,0	54,0																				
1,25																					
0,83																					
0,40	36,4																				
0,16																					
0,08	17,5																				
		TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS																			
		FRACCIÓN GRUESA			FRACCIÓN FINA																
LÍMITES DE ATTERBERG. UNE 103.103 Y 103.104 <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 40%;">LÍMITE LÍQUIDO:</td> <td style="width: 20%; text-align: center;">29,2</td> <td style="width: 40%;"></td> </tr> <tr> <td>LÍMITE PLÁSTICO:</td> <td style="text-align: center;">20,5</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ÍNDICE DE PLASTICIDAD:</td> <td style="text-align: center;">8,7</td> <td></td> </tr> </table>										LÍMITE LÍQUIDO:	29,2		LÍMITE PLÁSTICO:	20,5		ÍNDICE DE PLASTICIDAD:	8,7				
LÍMITE LÍQUIDO:	29,2																				
LÍMITE PLÁSTICO:	20,5																				
ÍNDICE DE PLASTICIDAD:	8,7																				
MATERIA ORGÁNICA. UNE 103.204. 0,27 SALES SOLUBLES. NLT-114. 0,15 SULFATOS SOLUBLES. UNE 103.201-202 																					
HINCHAMIENTO LIBRE. UNE 103.601. Hinchamiento % = [] ASIENTO DE COLAPSO. NLT-254 Índice de colapso = [] Potencial colapso = []																					
HUMEDAD POR SECADO EN ESTUFA UNE 103.300 % HUMEDAD = []																					
COMPACTACIÓN PRÓCTOR. UNE 103.500 - 501 <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 40%;">RESULTADO PRÓCTOR:</td> <td style="width: 20%; text-align: center;">NORMAL</td> <td style="width: 40%;"></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">MODIFICADO</td> <td style="text-align: center;">X</td> </tr> <tr> <td>DENSIDAD OPTIMA (g/cm³) =</td> <td style="text-align: center;">2,02</td> <td></td> </tr> <tr> <td>% HUMEDAD OPTIMA =</td> <td style="text-align: center;">8,60</td> <td></td> </tr> </table>										RESULTADO PRÓCTOR:	NORMAL			MODIFICADO	X	DENSIDAD OPTIMA (g/cm³) =	2,02		% HUMEDAD OPTIMA =	8,60	
RESULTADO PRÓCTOR:	NORMAL																				
	MODIFICADO	X																			
DENSIDAD OPTIMA (g/cm³) =	2,02																				
% HUMEDAD OPTIMA =	8,60																				
DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE C.B.R. UNE 103.502 <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 40%;">COMPACTACIÓN PROCTOR</th> <th style="width: 20%; text-align: center;">95 %</th> <th style="width: 40%; text-align: center;">100 %</th> </tr> <tr> <td>ÍNDICE C.B.R.</td> <td></td> <td style="text-align: center;">15,8</td> </tr> <tr> <td>AGUA ABSORBIDA (%)</td> <td></td> <td style="text-align: center;">0,74</td> </tr> <tr> <td>HINCHAMIENTO (%)</td> <td></td> <td style="text-align: center;">0,42</td> </tr> </table>										COMPACTACIÓN PROCTOR	95 %	100 %	ÍNDICE C.B.R.		15,8	AGUA ABSORBIDA (%)		0,74	HINCHAMIENTO (%)		0,42
COMPACTACIÓN PROCTOR	95 %	100 %																			
ÍNDICE C.B.R.		15,8																			
AGUA ABSORBIDA (%)		0,74																			
HINCHAMIENTO (%)		0,42																			
CLASIFICACIÓN DE SUELOS CLASIFICACIÓN FOM 1382/02: ADECUADO CLASIFICACIÓN CASAGRANDE: CLASIFICACIÓN HBR: CLASIFICACIÓN USCS:																					

Imagen 31. Resultado ensayo caracterización SU 14.

ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN, ESTADO Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS																																																																											
OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN: Determinar características y propiedades geométricas, físicas, químicas y mecánicas para clasificarlos y evaluar su comportamiento para su uso en obra civil.																																																																											
PETICIONARIO: VIAS Y CONSTRUCCIONES		Nº PETICIÓN: 9405																																																																									
DIRECCIÓN: C/ de los milanos n º10 , 10004 Cáceres		REF. OBRA: EXP-1441																																																																									
OBRA: ADECUACION DE VIAS PLASENCIA Y MONFRAGUE		Nº TRABAJO: 1441/1807/25829-34																																																																									
ÁREA DE ACREDITACIÓN: VSG		REFERENCIA MUESTRA: SU-04																																																																									
TIPO DE MUESTRA Y ESTADO EN QUE LLEGA: Alterada en saco		FECHA DE ENTRADA MUESTRA: 17/05/2021																																																																									
IDENTIFICACIÓN DEL SUELO: suelo		PROCEDENCIA: pk 13+450 vía 1 hilo arriba																																																																									
CONDICIONES DE ENSAYO: Normales; según procedimiento de ensayo		PROFUNDIDAD MUESTRA (m.): -																																																																									
ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO. UNE 103.101.																																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tamices</th> <th>% Pasa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>80</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>63</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>50</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>40</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>25</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>20</td><td>93,0</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>89,2</td></tr> <tr><td>10,0</td><td>80,3</td></tr> <tr><td>6,3</td><td>76,3</td></tr> <tr><td>5,0</td><td>72,9</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>66,4</td></tr> <tr><td>1,25</td><td></td></tr> <tr><td>0,63</td><td></td></tr> <tr><td>0,40</td><td>52,1</td></tr> <tr><td>0,16</td><td></td></tr> <tr><td>0,08</td><td>36,9</td></tr> </tbody> </table>	Tamices	% Pasa	100	100,0	80	100,0	63	100,0	50	100,0	40	100,0	25	100,0	20	93,0	12,5	89,2	10,0	80,3	6,3	76,3	5,0	72,9	2,0	66,4	1,25		0,63		0,40	52,1	0,16		0,08	36,9	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tamaño de Partículas (mm)</th> <th>% Pasa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>80</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>63</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>50</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>40</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>25</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>20</td><td>93,0</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>89,2</td></tr> <tr><td>10,0</td><td>80,3</td></tr> <tr><td>6,3</td><td>76,3</td></tr> <tr><td>5,0</td><td>72,9</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>66,4</td></tr> <tr><td>1,25</td><td></td></tr> <tr><td>0,63</td><td></td></tr> <tr><td>0,40</td><td>52,1</td></tr> <tr><td>0,16</td><td></td></tr> <tr><td>0,08</td><td>36,9</td></tr> </tbody> </table>			Tamaño de Partículas (mm)	% Pasa	100	100,0	80	100,0	63	100,0	50	100,0	40	100,0	25	100,0	20	93,0	12,5	89,2	10,0	80,3	6,3	76,3	5,0	72,9	2,0	66,4	1,25		0,63		0,40	52,1	0,16		0,08	36,9
Tamices	% Pasa																																																																										
100	100,0																																																																										
80	100,0																																																																										
63	100,0																																																																										
50	100,0																																																																										
40	100,0																																																																										
25	100,0																																																																										
20	93,0																																																																										
12,5	89,2																																																																										
10,0	80,3																																																																										
6,3	76,3																																																																										
5,0	72,9																																																																										
2,0	66,4																																																																										
1,25																																																																											
0,63																																																																											
0,40	52,1																																																																										
0,16																																																																											
0,08	36,9																																																																										
Tamaño de Partículas (mm)	% Pasa																																																																										
100	100,0																																																																										
80	100,0																																																																										
63	100,0																																																																										
50	100,0																																																																										
40	100,0																																																																										
25	100,0																																																																										
20	93,0																																																																										
12,5	89,2																																																																										
10,0	80,3																																																																										
6,3	76,3																																																																										
5,0	72,9																																																																										
2,0	66,4																																																																										
1,25																																																																											
0,63																																																																											
0,40	52,1																																																																										
0,16																																																																											
0,08	36,9																																																																										
LÍMITES DE ATTERBERG. UNE 103.103 Y 103.104 LÍMITE LÍQUIDO: 37,4 LÍMITE PLÁSTICO: 25,1 ÍNDICE DE PLASTICIDAD: 12,3 MATERIA ORGÁNICA. UNE 103.204. 0,36 SALES SOLUBLES. NLT-114. 0,22 SULFATOS SOLUBLES. UNE 103.201-202 HINCHAMIENTO LIBRE. UNE 103.601. Hinchamiento % = ASIEN TO DE COLAPSO .NLT-254 Índice de colapso = Potencial colapso = HUMEDAD POR SECADO EN ESTUFA UNE 103.300 % HUMEDAD =		COMPACTACIÓN PRÓCTOR. UNE 103. 500 - 501 RESULTADO PRÓCTOR: NORMAL MODIFICADO <input checked="" type="checkbox"/> DENSIDAD OPTIMA (g/cm³) = 1,91 % HUMEDAD OPTIMA = 11,40 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE C.B.R. UNE 103.502 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>95 %</th> <th>100 %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>COMPACTACIÓN PROCTOR</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ÍNDICE C.B.R.</td> <td></td> <td>8,7</td> </tr> <tr> <td>AGUA ABSORBIDA (%)</td> <td></td> <td>0,78</td> </tr> <tr> <td>HINCHAMIENTO (%)</td> <td></td> <td>0,45</td> </tr> </tbody> </table> CLASIFICACIÓN DE SUELOS CLASIFICACIÓN FOM 1382/02: TOLERABLE CLASIFICACIÓN CASAGRANDE: CLASIFICACIÓN HBR: CLASIFICACIÓN USCS:			95 %	100 %	COMPACTACIÓN PROCTOR			ÍNDICE C.B.R.		8,7	AGUA ABSORBIDA (%)		0,78	HINCHAMIENTO (%)		0,45																																																									
	95 %	100 %																																																																									
COMPACTACIÓN PROCTOR																																																																											
ÍNDICE C.B.R.		8,7																																																																									
AGUA ABSORBIDA (%)		0,78																																																																									
HINCHAMIENTO (%)		0,45																																																																									

Imagen 32. Resultado ensayo caracterización SU 4.

6.7. Caracterización del balasto.

Visto que toda la plataforma, en sus zonas de terraplenes, carecían de material granular, y con la finalidad de poder reciclar todo este balasto para darle una segunda vida potenciando así la economía circular y por tanto la sostenibilidad de este tipo de obras de renovación ferroviaria, se procede a hacer unas pruebas con el balasto que se extrajo de la traza para intentar conseguir el material necesario para ejecutar la capa de

forma y el subbalasto necesarios para la adecuación de la plataforma, y así evitar tener que extraer recursos naturales de cantera y transportarlos hasta obra con todo el coste ambiental que ello supone.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen de pruebas en machaqueo de balasto.

Precedencia		Ref. Muestra	Clasificación suelo
Machaqueo balasto	Acopio	SUB-01	Subbalasto
Machaqueo balasto	Acopio	CF-01	Capa de forma
Machaqueo balasto	Acopio	ZA-01	Zahorra

A continuación, se muestran los ensayos realizados a los machaqueos de balasto para su clasificación.

6.7.1.Subbalasto.

Los ensayos del material machacado para ver su idoneidad como subbalasto se hicieron según la siguiente normativa:

- Análisis granulométrico según UNE-EN 933-1 Y 2
- Determinación del Coeficiente de Arena según UNE 933-8
- Coeficiente de permeabilidad del subbalasto según FOM 1269/2006
- Contenido en sulfatos solubles según UNE 103.201
- Ensayo de compactación Proctor Modificado según UNE 103.501
- Resistencia a la fragmentación según UNE-EN 1097-2
- Desgaste microdeval según UNE-EN 1097-1
- Porcentaje de caras de fractura del árido grueso según UNE-EN 933-5/99

ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS ÁRIDOS. SUBBALASTO			
PETICIONARIO: VÍAS Y CONSTRUCCIONES, S.A		Nº PETICIÓN: 2158	
DIRECCIÓN: Calle los Milanos nº 10. 10004 - CACERES		Nº TRABAJO: 1441/2576/27430-35	
OBRA: MONTAJE DE VÍA DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD		REF. OBRA: EXP-1441	
ÁREA DE ACREDITACIÓN: VSG		REFERENCIA MUESTRA: SUB-01	
TIPO DE MUESTRA Y ESTADO EN QUE LLEGA: Alterada (Saco)		FECHA DE ENTRADA MUESTRA: 02/08/2021	
IDENTIFICACIÓN DEL SUELO: SUBBALASTO		PROCEDENCIA: MACHAQUEO BALASTO	
CONDICIONES DE ENSAYO: Normales; según procedimiento de ensayo		ACOPIO JUSTO DUQUE	
ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDOS POR TAMIZADO UNE-EN 933-1 Y 2			
HUSO EMPLEADO		SUBBALASTO	
Tamices	% Pasa		
40	100,0		
31,5	90,1		
16	85,3		
8	70,9		
4	58,9		
2	50,3		
0,5	38,0		
0,2	23,6		
0,063	8,4		
		<p style="text-align: center;">TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS</p> <p style="text-align: center;">FRACCIÓN GRUESA FRACCIÓN FINA</p>	
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD $C_u = D_{60}/D_{10} =$ 40		ENSAYO DE COMPACTACIÓN PRÓCTOR MODIFICADO UNE 103.501	
COEFICIENTE DE CURVATURA $C_c = D_{30}^2 / (D_{10} \times D_{60}) =$ 2,5		DENSIDAD ÓPTIMA (g/cm³) = 2,19	
MATERIA ORGÁNICA. UNE 103.204. 0,10		% HUMEDAD ÓPTIMA = 6,80	
DETERMINACIÓN DEL EQUIVALENTE DE ARENA UNE-933-8 E.A. = 50		RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN. UNE-EN 1097-2. COEF. DESGASTE "LOS ANGELES" LA = 27	
COEFICIENTE PERMEABILIDAD SUBBALASTO (K) FOM/1269/2006 10-7 (m/s)		DESGASTE MICRODEVAL. UNE EN 1097-1. COEF. MICRODEVAL HUMEDO MDH = 21	
CONTENIDO EN SULFATOS SOLUBLES. UNE 103.201 % SO₄ = 0,001		PORCENTAJE DE CARAS DE FRACTURAS DE LAS PARTÍCULAS DE ÁRIDO GRUESO. UNE-EN 933-5/99 %PARTÍCULAS TOTALMENTE TRITURADA Ctc= 100	
		<p style="text-align: center;">Cáceres, 10 de Agosto de 2021</p> <p>El Técnico de Viales (VS): El Director de Laboratorio: </p>	

Imagen 33. Ensayos de caracterización de subbalasto a partir de balasto.

En la siguiente tabla se muestra las características exigidas por la Orden FOM/1269/2006.(Ministerio de Fomento, 2006) comparándolas con los resultados obtenidos del machaqueo del balasto para su validación como subbalasto.

Tabla 6. Tabla comparativa para validación de subbalasto.

TABLA COMPARATIVA PARA VALIDACIÓN DE SUBBALASTO			
Granulometría			CUMPLE
Tamiz	FOM	Muestra	
40	100	100	
31,5	90-100	90,1	
16	85-95	85,3	
8	65-80	70,9	
4	45-65	58,9	
2	30-50	50,3	
0,5	10-40	38	
0,2	5-25	23,6	
0,063	3-9	8,4	
Coeficiente de uniformidad	>14	40	CUMPLE
Coeficiente de curvatura	1-3	2,5	CUMPLE
Materia orgánica	<0,2	0,1	CUMPLE
Determinación del coeficiente de arena	>45	50	CUMPLE
Coeficiente de permeabilidad del subbalasto	<10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	CUMPLE
Contenido de sulfatos solubles	<0,2	0,001	CUMPLE
Ensayo del próctor modificado			
Densidad óptima		2,19	
Humedad óptima		6,8	
Coeficiente de desgaste LA	<28	27	CUMPLE
Microdeval húmedo	<22	21	CUMPLE
% de caras fracturadas	100	100	CUMPLE

Como se puede ver en la tabla, mediante el machaqueo del balasto, se consiguió llegar a cumplir los parámetros recogidos en la ORDEN FOM 1269/2006 (Ministerio de Fomento, 2006) para obtener un subbalasto que se utilizó como material granular en la sección propuesta por la ORDEN FOM 1631/2015 (Ministerio de Fomento, 2015a) según la Imagen 27.

6.7.2.Zahorra.

Los ensayos del material machacado para ver su idoneidad como zahorra se hicieron según la siguiente normativa:

- Análisis granulométrico según UNE-EN 933-1 Y 2
- Límites de Atterberg según UNE 103.103 y 103.104
- Determinación del Coeficiente de Arena según UNE 933-8
- Resistencia a la fragmentación según UNE-EN 1097-2
- Porcentaje de caras de fractura del árido grueso según UNE-EN 933-5/99
- Índice de lajas según UNE-EN 933-3/97
- Contenido en sulfatos solubles según UNE 103.201
- Ensayo de compactación Proctor Modificado según UNE 103.501

ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS ÁRIDOS. ENSAYOS PARA ZAHORRAS ARTIFICIALES.																									
PETICIONARIO: VÍAS Y CONSTRUCCIONES, S.A		Nº PETICIÓN: 2158																							
DIRECCIÓN: Calle los Milanos nº 10. 10004 - CACERES		Nº TRABAJO: 1441/2576/27430-35																							
OBRA: MONTAJE DE VÍA DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD		REF. OBRA: EXP-1441																							
ÁREA DE ACREDITACIÓN: VSG		REFERENCIA MUESTRA: ZA-01																							
TIPO DE MUESTRA Y ESTADO EN QUE LLEGA: Alterada (Saco)		FECHA DE ENTRADA MUESTRA: 02/08/2021																							
IDENTIFICACIÓN DEL SUELO: Zahorra Artificial		PROCEDENCIA: MACHAQUEO BALASTO																							
CONDICIONES DE ENSAYO: Normales; según procedimiento de ensayo		ACOPIO JUSTO DUQUE																							
ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDOS POR TAMIZADO UNE-EN 933-1 Y 2																									
HUSO EMPLEADO O.C. 10/14		ZA-032																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tamices</th> <th>% Pasa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>40</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>32</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>20</td><td>87,2</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>67,5</td></tr> <tr><td>8</td><td>53,2</td></tr> <tr><td>4</td><td>41,1</td></tr> <tr><td>2</td><td>33,2</td></tr> <tr><td>0,500</td><td>20,9</td></tr> <tr><td>0,250</td><td>15,9</td></tr> <tr><td>0,083</td><td>8,6</td></tr> </tbody> </table>	Tamices	% Pasa	40	100,0	32	100,0	20	87,2	12,5	67,5	8	53,2	4	41,1	2	33,2	0,500	20,9	0,250	15,9	0,083	8,6			
Tamices	% Pasa																								
40	100,0																								
32	100,0																								
20	87,2																								
12,5	67,5																								
8	53,2																								
4	41,1																								
2	33,2																								
0,500	20,9																								
0,250	15,9																								
0,083	8,6																								
ENSAYO: LÍMITES DE ATTERBERG UNE 103.103 y 103.104		ENSAYO DE COMPACTACIÓN PRÓCTOR UNE 103.500-501																							
LÍMITE LÍQUIDO:	N.P.	NORMAL	<input type="checkbox"/>																						
LÍMITE PLÁSTICO:	N.P.	MODIFICADO	<input checked="" type="checkbox"/>																						
ÍNDICE DE PLASTICIDAD:	N.P.	DENSIDAD OPTIMA (g/cm³) =	2,19																						
		% HUMEDAD OPTIMA =	6,80																						
AZUL DE METILENO UNE EN-933-9 AZUL DE METILENO=		DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN. UNE-EN 1097-2/98.																							
DETERMINACIÓN DEL EQUIVALENTE DE ARENA UNE-933-8 E.A. = 30		COEFICIENTE DE DESGASTE "LOS ANGELES" LA = 27																							
MATERIA ORGÁNICA. CONTENIDO EN HUMUS EN-1744-1/98.		DENSIDAD DE PARTICULAS Y ABSORCIÓN DE AGUA. UNE- EN 1097-6																							
OBSERVACIONES:																									

Imagen 34. Ensayos para caracterización de zahorra a partir de balasto.

ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y FÍSICAS DE LOS ÁRIDOS. ZAHORRA ARTIFICIAL.								
PETICIONARIO: VÍAS Y CONSTRUCCIONES, S.A	Nº PETICIÓN: 2158							
DIRECCIÓN: Calle los Milanos nº 10. 10004 - CACERES	REF. OBRA: EXP-1441							
OBRA: MONTAJE DE VÍA DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD	Nº TRABAJO: 1441/2576/27430-35							
ÁREA DE ACREDITACIÓN: VSG	REFERENCIA MUESTRA: ZA-01							
TIPO DE MUESTRA Y ESTADO EN QUE LLEGA: Alterada (Saco)	FECHA DE ENTRADA MUESTRA: 02/08/2021							
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: Zahorra Artificial	PROCEDENCIA: MACHAQUEO BALASTO							
CONDICIONES DE ENSAYO: Normales; según procedimiento de ensayo	ACOPIO JUSTO DUQUE							
DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARAS DE FRACTURAS DE LAS PARTÍCULAS DE ÁRIDO GRUESO. UNE-EN 933-5/99 Campo de aplicación: Se aplicará esta norma para la determinación del coeficiente de partículas con caras de fractura en una muestra de árido grueso. Se aplica a la grava y a las mezclas de áridos que contengan gravas, para las fracciones granulométricas entre 63 y 4 mm. Fracción granulométrica del ensayo = <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>%PARTÍCULAS TOTALMENTE TRITURADA Cte=</td> <td style="background-color: #f4a460; text-align: center;">100,0</td> <td>%PARTÍCULAS TRITURADA Ce=</td> </tr> <tr> <td>%PARTÍCULAS TOTALMENTE REDONDEADAS Ctr=</td> <td></td> <td>%PARTÍCULAS REDONDEADAS Cr=</td> </tr> </table>			%PARTÍCULAS TOTALMENTE TRITURADA Cte=	100,0	%PARTÍCULAS TRITURADA Ce=	%PARTÍCULAS TOTALMENTE REDONDEADAS Ctr=		%PARTÍCULAS REDONDEADAS Cr=
%PARTÍCULAS TOTALMENTE TRITURADA Cte=	100,0	%PARTÍCULAS TRITURADA Ce=						
%PARTÍCULAS TOTALMENTE REDONDEADAS Ctr=		%PARTÍCULAS REDONDEADAS Cr=						
DETERMINACIÓN DE LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS. ÍNDICE DE LAJAS. UNE-EN 933-3/97. Campo de aplicación: Se aplicará esta norma para la determinación del índice de lajas de los áridos de origen natural o artificial, incluidos áridos ligeros, desde la fracción granulométrica 63/80 a 4/5 mm. ÍNDICE DE LAJAS GLOBAL IL = 13,8								
DETERMINACIÓN DE LA LIMPIEZA SUPERFICIAL DEL ÁRIDO GRUESO. UNE-EN 146130/00 COEFICIENTE DE LIMPIEZA DEL ÁRIDO =								
DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN. UNE-EN 1097-2/98. Campo de aplicación: Se aplicará esta norma para la determinación de la resistencia a la fragmentación del árido grueso. Se definen dos métodos: el de referencia, ensayo Los Angeles y el alternativo, ensayo de Impacto. COEFICIENTE DE DESGASTE "LOS ANGELES" LA = 27								
EVALUACIÓN DE FINOS. ENSAYO DE AZUL DE METILENO. UNE-EN 933-9/99. Campo de aplicación: Se aplicará esta norma para determinar el valor de azul de metileno (MB) de la fracción granulométrica 0/2 mm de los áridos finos o de la mezcla total de los áridos. También es aplicable a la fracción 0/0,125 mm (MB ₀). VALOR DE AZUL DE METILENO MB =								
ENSAYO DE COMPACTACIÓN. PRÓCTOR MODIFICADO, UNE 103.501. DENSIDAD MÁXIMA: gr/cm³ % HUMEDAD ÓPTIMA:								
DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE C.B.R. EN EL LABORATORIO. UNE 103.502. <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>95 % COMPACTACIÓN PRÓCTOR</td> <td>DENSIDAD:</td> <td>ÍNDICE C.B.R.</td> </tr> <tr> <td>100 % COMPACTACIÓN PRÓCTOR</td> <td>DENSIDAD:</td> <td>ÍNDICE C.B.R.</td> </tr> </table>			95 % COMPACTACIÓN PRÓCTOR	DENSIDAD:	ÍNDICE C.B.R.	100 % COMPACTACIÓN PRÓCTOR	DENSIDAD:	ÍNDICE C.B.R.
95 % COMPACTACIÓN PRÓCTOR	DENSIDAD:	ÍNDICE C.B.R.						
100 % COMPACTACIÓN PRÓCTOR	DENSIDAD:	ÍNDICE C.B.R.						
OBSERVACIONES:								

Imagen 35. Ensayos para caracterización de zahorras a partir de balasto.

En la Tabla 7 se muestra las características exigidas por el PG-3 comparándolas con los resultados obtenidos del machaqueo del balasto para su validación como zahorra.

Tabla 7. Tabla comparativa para la validación de zahorras.

TABLA COMPARATIVA PARA VALIDACIÓN DE ZAHORRA			
Granulometría			APROBADO POR LA PROPIEDAD
Tamiz	PG3	Muestra	
40	100	100	
32	88-100	100	
20	65-90	87,2	
12,5	52-76	67,5	
8	40-63	53,2	
4	26-45	41,1	
2	15-32	33,2	NO CUMPLE
0,5	7-21	20,9	
0,25	4-16	15,9	
0,063	0-9	8,6	
Caras fracturadas árido grueso	>70%	100	CUMPLE
Índice de lajas	<35	13,8	CUMPLE
Límites de Atterberg		N.P.	CUMPLE
Determinación del equivalente de arena	>30	30	CUMPLE
Contenido de sulfatos solubles	<0,05	0,001	CUMPLE
Ensayo del próctor modificado			
Densidad óptima		2,19	
Humedad óptima		6,8	
Coefficiente de desgaste LA	<30	27	CUMPLE

Como se puede ver en la tabla, mediante el machaqueo del balasto, se consiguió llegar a cumplir los parámetros recogidos en el PG 3 (Ministerio de Fomento, 2015b) para obtener una zahorra que se utilizó en la adecuación de los caminos de acceso y relleno de andenes.

6.7.3. Capa de forma.

Los ensayos del material machacado para ver su idoneidad como capa de forma se hicieron según la siguiente normativa:

- Análisis granulométrico según UNE 103.101
- Límites de Atterberg según UNE 103.103 y 103.104
- Determinación del Coeficiente de Arena según UNE 933-8
- Contenido de materia orgánica según UNE 103.204
- Resistencia a la fragmentación según UNE-EN 1097-2
- Ensayo de compactación Proctor Modificado según UNE 103.501
- Desgaste microdeval según UNE-EN 1097-1
- Determinación del Índice CBR según UNE 103.502

ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN, ESTADO Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS																																																		
OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN: Determinar características y propiedades geométricas, físicas, químicas y mecánicas para clasificarlos y evaluar su comportamiento para su uso en obra civil.																																																		
PETICIONARIO: VIAS Y CONSTRUCCIONES				Nº PETICIÓN: 2158																																														
DIRECCIÓN: C/ de los milanos n º10 , 10004 Cáceres				REF. OBRA: EXP-1441																																														
OBRA: ADECUACION DE VIAS PLASENCIA Y MONFRAGUE				Nº TRABAJO: 1441/2576/27430-35																																														
ÁREA DE ACREDITACIÓN: VSG				REFERENCIA MUESTRA: CF-01																																														
TIPO DE MUESTRA Y ESTADO EN QUE LLEGA: Alterada en saco				FECHA DE ENTRADA MUESTRA: 02/08/2021																																														
IDENTIFICACIÓN DEL SUELO: suelo				PROCEDENCIA: MACHAQUEO BALASTO																																														
CONDICIONES DE ENSAYO: Normales; según procedimiento de ensayo				PROFUNDIDAD MUESTRA (m.): -																																														
ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO. UNE 103.101.																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tamices</th> <th>% Pasa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>80</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>63</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>50</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>40</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>25</td><td>93,6</td></tr> <tr><td>20</td><td>88,0</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>67,5</td></tr> <tr><td>10,0</td><td>64,4</td></tr> <tr><td>8,3</td><td>54,0</td></tr> <tr><td>5,0</td><td>41,1</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>33,6</td></tr> <tr><td>1,25</td><td></td></tr> <tr><td>0,63</td><td></td></tr> <tr><td>0,40</td><td>23,2</td></tr> <tr><td>0,16</td><td></td></tr> <tr><td>0,08</td><td>13,2</td></tr> </tbody> </table>		Tamices	% Pasa	100	100,0	80	100,0	63	100,0	50	100,0	40	100,0	25	93,6	20	88,0	12,5	67,5	10,0	64,4	8,3	54,0	5,0	41,1	2,0	33,6	1,25		0,63		0,40	23,2	0,16		0,08	13,2	<table border="1"> <thead> <tr> <th>BOLOS</th> <th>GRAVA GRUESA</th> <th>GRAVA MEDIA</th> <th>GRAVA FINA</th> <th>ARENA GRUESA</th> <th>ARENA MEDIA</th> <th>ARENA FINA</th> </tr> </thead> </table>						BOLOS	GRAVA GRUESA	GRAVA MEDIA	GRAVA FINA	ARENA GRUESA	ARENA MEDIA	ARENA FINA
Tamices	% Pasa																																																	
100	100,0																																																	
80	100,0																																																	
63	100,0																																																	
50	100,0																																																	
40	100,0																																																	
25	93,6																																																	
20	88,0																																																	
12,5	67,5																																																	
10,0	64,4																																																	
8,3	54,0																																																	
5,0	41,1																																																	
2,0	33,6																																																	
1,25																																																		
0,63																																																		
0,40	23,2																																																	
0,16																																																		
0,08	13,2																																																	
BOLOS	GRAVA GRUESA	GRAVA MEDIA	GRAVA FINA	ARENA GRUESA	ARENA MEDIA	ARENA FINA																																												
		<p style="text-align: center;">TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS</p> <p style="text-align: center;">FRACCIÓN GRUESA FRACCIÓN FINA</p>																																																
LÍMITES DE ATTERBERG. UNE 103.103 Y 103.104				COMPACTACIÓN PRÓCTOR. UNE 103. 500 - 501																																														
LÍMITE LÍQUIDO:		N.P		RESULTADO PRÓCTOR: NORMAL																																														
LÍMITE PLÁSTICO:		N.P		MODIFICADO		X																																												
ÍNDICE DE PLASTICIDAD:				DENSIDAD OPTIMA (g/cm) =		2,19																																												
				% HUMEDAD OPTIMA =		6,80																																												
MATERIA ORGÁNICA. UNE 103.204.		0,10		DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE C.B.R. UNE 103.502																																														
SALES SOLUBLES. NLT-114.				COMPACTACIÓN PROCTOR																																														
SULFATOS SOLUBLES. UNE 103.201-202				ÍNDICE C.B.R.																																														
				95 % 100 %																																														
RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN. UNE-EN 1097-2.				AGUA ABSORBIDA (%)																																														
COEF. DESGASTE "LOS ANGELES" LA =		27		HINCHAMIENTO (%)																																														
DESGASTE MICRODEVAL. UNE EN 1097-1.																																																		
COEF. MICRODEVAL HUMEDO MDH		21		CLASIFICACIÓN DE SUELOS																																														
HUMEDAD POR SECADO EN ESTUFA				CLASIFICACIÓN FOM 1382/02:																																														
UNE 103.300				CLASIFICACIÓN CASAGRANDE:																																														
% HUMEDAD =				CLASIFICACIÓN HBR:																																														
				CLASIFICACIÓN USCS:																																														

Imagen 36. Ensayo para caracterización de capa de forma a partir de balasto.

En la Tabla 8 se muestra las características exigidas por el PG-3 comparándolas con los resultados obtenidos del machaqueo del balasto para su validación como capa de forma.

Tabla 8. Tabla comparativa para validación de capa de forma.

TABLA COMPARATIVA PARA VALIDACIÓN DE CAPA DE FORMA			
Granulometría			CUMPLE
Tamiz	PG3	Muestra	
40	100	100	
25		93,6	
20		88	
12,5		67,5	
10		64,4	
6,3		54	
5		41,1	
2		33,6	
1,25			
0,63			
0,4		23,3	
0,16			
0,08	15	13,2	
Límites de Atterberg		N.P.	CUMPLE
Materia orgánica	<0,2	0,1	CUMPLE
Coeficiente de desgaste LA	<30	27	CUMPLE
Microdeval húmedo	<25	21	CUMPLE
Ensayo del próctor modificado			
Densidad óptima		2,19	
Humedad óptima		6,8	
Índice CBR			
Compactación próctor	100%	100%	
INDICE CBR	>10	56,3	CUMPLE
Agua Absorbida		0,25	
Hinchamiento	<0,2	0,15	CUMPLE

Como se puede ver en la tabla, mediante el machaqueo del balasto, se consiguió llegar a cumplir los parámetros recogidos en el PG3 (Ministerio de Fomento, 2015b) para obtener una capa de forma que se utilizó como material granular en la sección propuesta por la ORDEN FOM 1631/2015 (Ministerio de Fomento, 2015a) según la Imagen 27.

En resumen, esta transformación del balasto retirado de la vía se utilizó en forma de zahorra para la adecuación de caminos y relleno de andenes, como capa de forma en relleno de andenes y mejora de explanada ferroviaria y como subbalasto en terminación de plataforma ferroviaria generando un gran ahorro del coste tanto económico como ambiental.

6.8. Análisis del coste.

6.8.1. Análisis del coste económico.

A continuación, se analiza el ahorro de coste económico asociado a esta transformación de balasto.

Tabla 9. Coste económico sin reciclado de balasto por Km de renovación de vía simple.

COSTE SIN RECICLADO DE BALASTO POR KM DE RENOVACIÓN							
MATERIAL	MEDICIÓN	TRANSPORTE			MATERIAL		TOTAL COSTE
	Tn (Por cada Km de renovación)	Transporte €*Tn/km	Distancia (km)	Total transporte (€)	Precio Cantera (€/Tn)	Total (€)	
Balasto	2.720,00	0,20	15,00	8.160,00	3,00	8.160,00	16.320,00
Capa de forma	2.737,50	0,20	25,00	13.687,50	8,00	21.900,00	35.587,50
Subbalasto	3.285,00	0,20	25,00	16.425,00	10,00	32.850,00	49.275,00

TOTAL COSTE (€) POR KM DE RENOVACIÓN SIN TRANSFORMACIÓN DE BALASTO

101.182,50 €

Tabla 10. Coste económico con reciclado de balasto por Km de renovación de vía simple.

COSTE CON RECICLADO DE BALASTO POR KM DE RENOVACIÓN							
MATERIAL	MEDICIÓN	TRANSPORTE			MATERIAL		TOTAL COSTE
	Tn (Por cada Km de renovación)	Transporte €*Tn/km	Distancia (km)	Total transporte (€)	Precio Transformación (€/Tn)	Total (€)	
Balasto	2.720,00	0,20	3,00	1.632,00	0,00	0,00	1.632,00
Capa de forma	2.737,50	0,20	6,00	3.285,00	3,50	9.581,25	12.866,25
Subbalasto	3.285,00	0,20	6,00	3.942,00	4,50	14.782,50	18.724,50

TOTAL COSTE (€) POR KM DE RENOVACIÓN CON TRANSFORMACIÓN DE BALASTO

33.222,75 €

Como se deduce de las tablas anteriores (Tabla 9 y Tabla 10) la transformación mediante machaqueo del balasto en las capas granulares para ser utilizadas dentro de la misma obra supone un ahorro económico importante.

Estos resultados dependen del método de renovación utilizada, la distancia de la obra al acopio para el machaqueo de balasto y de la distancia de la obra a las distintas canteras que pudieran aportar este material, así como el canon de vertido que varía según la situación geográfica de la obra.

6.8.2. Análisis del Coste ambiental basándonos en la generación de CO₂e

A continuación, se analiza la reducción del CO₂e

Para calcular el CO₂e se considera:

- Producción del árido en cantera: 8,9 Kg CO₂e por cada Tonelada producida.
- Transporte del árido por carretera: 0,55 Kg CO₂e por cada Tonelada y Kilómetro transportada (AECOC, 2017)
- Transformación del balasto en material granular: 0,5 Kg de CO₂e.

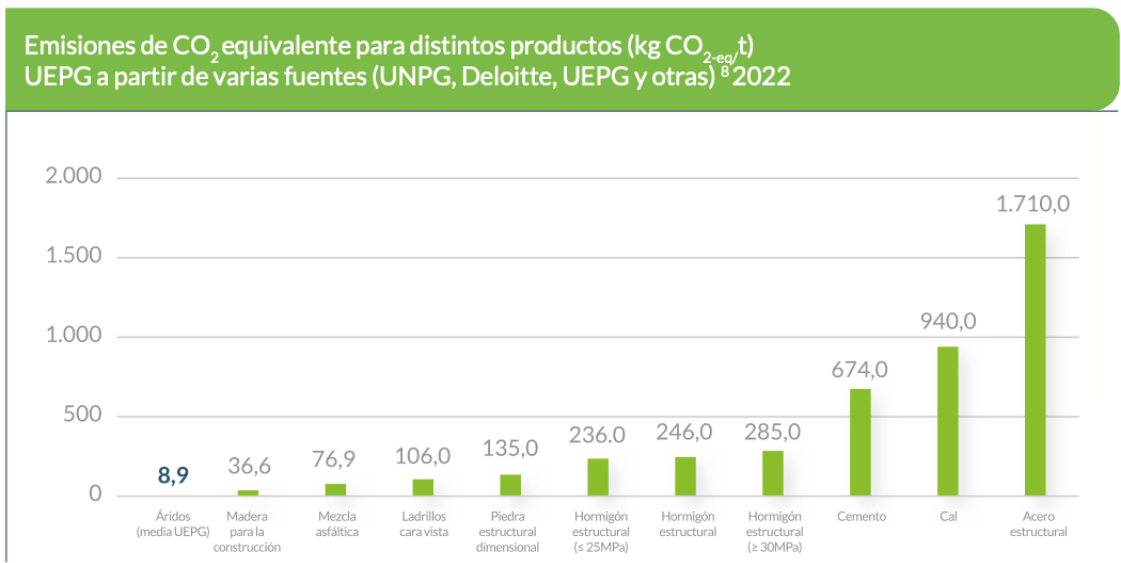


Imagen 37. Emisiones de CO₂eq para distintos productos utilizados en la construcción. (Aggregates Europe & Federación de áridos, 2023)

Como se observa en las siguientes tablas (Tabla 11 y Tabla 12) la reducción del CO₂eq por cada km de obra de renovación de vía simple es muy significativo, llegando a ser de más del 80%.

Tabla 11. Coste sin reciclado de balasto por km de renovación de vía simple.

COSTE SIN RECICLADO DE BALASTO POR KM DE RENOVACIÓN							
MATERIAL	MEDICIÓN	TRANSPORTE			FABRICACIÓN		TOTAL COSTE
	Tn (Por cada Km de renovación)	Kg CO2e*Tn/km	Distancia (km)	Total transporte (CO2 EQ)	CO2 EQ (Kg/tn)	Total (CO2 EQ)	
Balasto	2.720,00	0,55	15,00	22.440,00	8,90	24.208,00	46.648,00
Capa de forma	2.737,50	0,55	25,00	37.640,63	8,90	24.363,75	62.004,38
Subbalasto	3.285,00	0,55	25,00	45.168,75	8,90	29.236,50	74.405,25

TOTAL KG CO₂e SIN RECICLADO DE BALASTO
POR KM DE RENOVACIÓN

183.057,63 kg
CO₂e

Tabla 12. Coste con reciclado de balasto por km de renovación de vía simple.

COSTE CON RECICLADO DE BALASTO POR KM DE RENOVACIÓN							
MATERIAL	MEDICIÓN	TRANSPORTE			TRANSFORMACIÓN		TOTAL COSTE
	Tn (Por cada Km de renovación)	Kg CO2e*Tn/km	Distancia (km)	Total transporte (CO2 EQ)	CO2 EQ (Kg/tn)	Total (CO2 EQ)	
Balasto	2.720,00	0,55	3,00	4.488,00	0,50	1.360,00	5.848,00
Capa de forma	2.737,50	0,55	6,00	9.033,75	0,50	1.368,75	10.402,50
Subbalasto	3.285,00	0,55	6,00	10.840,50	0,50	1.642,50	12.483,00

TOTAL KG CO2e CON RECICLADO DE BALASTO POR KM DE RENOVACIÓN

28.733,50 kg CO2e

7. Interpretación de los resultados.

Al aplicar la metodología propuesta para este caso de estudio se ve que la clasificación de la línea según el código de tráfico era P5 y que se quería convertir en una Línea de Alta Velocidad con código de tráfico P1.

Debido a la gran diferencia entre estos dos tipos de línea, con unos cambios tanto en velocidad como en trazado bastantes significativos, la posibilidad de encontrar materiales que se puedan reutilizar en la misma obra es bastante complicado.

A la hora de analizar los materiales existentes en la línea a renovar, se pudo observar que debido a la interoperabilidad de la línea, lo único interoperable era el carril y el balasto, pero el carril, salvo de manera puntual, no cumplía con los parámetros establecidos en las normas anteriormente mencionadas debido al desgaste, y el balasto, que aunque con un cribado previo sí que hubiera sido posible su reutilización, esta opción no fue aprobada por la propiedad debido a que en proyecto se recogía la sustitución total de este material. La reutilización del balasto mediante un cribado previo hubiera supuesto un mayor ahorro tanto a nivel económico como a nivel medioambiental, dado que la transformación de este balasto en material granular conlleva un procesamiento in situ, y la necesidad de aportación de balasto nuevo que es un recurso natural.

De igual modo, las traviesas de hormigón no se pudieron reciclar en obra para utilizarlas como árido reciclado debido a que la demolición de éstas en obra no estaba recogida en el proyecto. Se debería tener en cuenta que a pesar de que el machaqueo de estas traviesas no supone un gran volumen de árido reciclado sí que es importante el coste en emisiones de GEI debido al transporte de las traviesas a su lugar de procesado y un coste económico debido al canon de vertido.

El reciclaje del balasto en los distintos tipos de material granular necesarios para otras unidades de obra sí que se le pudo dar un encaje dentro del proyecto de ejecución. Esto supuso un gran ahorro en términos de sostenibilidad como se puede comprobar en las tablas 9 -12. Esto puede ser observado en el análisis de los costes económicos. La transformación del balasto en material granular conllevaría un ahorro de hasta un 70% en la compra del nuevo material granular necesario para la ejecución del proyecto. Por otra parte, teniendo en cuenta los costes ambientales se observa una disminución muy importante de la aportación de GEI de hasta un 85% en esas mismas partidas.

Como se puede ver en las diferentes tablas y ensayos, los resultados de la trituración del balasto para reciclarlo en subbalasto, zahorra y capa de forma fueron satisfactorios y se consiguieron mediante un machaqueo en una planta de machaqueo móvil sin la necesidad de aportación de ningún otro tipo de material lo que supone una diferencia sustancial en la sostenibilidad de este tipo de obras ya que minimiza la compra de recursos naturales y disminuye la generación de residuos.

En resumen, esta metodología propuesta es de fácil aplicación ya que los ensayos para caracterizar el material existente en las vías a renovar son muy accesibles y se pueden realizar de manera sencilla en laboratorios e incluso, algunos de ellos, se pueden realizar in situ sin incrementos significativos de costes en la ejecución del proyecto.

Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, la falta de definición de estas unidades de obra dentro de los proyectos constructivos impide la correcta gestión de los materiales existentes en este tipo de obras encaminados a la sostenibilidad.

8. Conclusiones.

- Las emisiones de GEI a nivel mundial suponen un grave problema para la salud de la población. Por este motivo, desde la UE se está legislando y proponiendo objetivos concretos para poder alcanzar una neutralidad de carbono en el 2050, pero lo cierto es que esas previsiones y objetivos hoy en día no se están cumpliendo debido a la dificultad que existe para desligar el crecimiento económico del consumo de recursos naturales.
- Con el objetivo de desligar este crecimiento económico del uso de recursos naturales se está potenciando la economía circular desde la UE. Esta economía circular pretende, además de la disminución del consumo de recursos naturales, la disminución de la generación de residuos, que es otra fuente muy importante en la generación de GEI. Esta disminución de los residuos también se antoja difícil debido al constante aumento de la población y por lo tanto al aumento de bienes por parte de ésta.
- Se está haciendo un gran esfuerzo, tanto por parte de UE como de los gobiernos nacionales para adecuar las leyes a esta nueva situación que demanda la sociedad, y por los investigadores que a través de multitud de estudios intentan dar una segunda vida a los residuos generados por distintas actividades e industrias intentando potenciar la economía circular.

- El presente trabajo tiene el propósito de contribuir a facilitar la incorporación de la economía circular en las obras de renovación ferroviaria. Para ello se propone una metodología enfocada a la reutilización, valorización y reciclaje del material existente en la línea a renovar para su utilización, siempre que sea posible, dentro de la misma línea, evitando así costes innecesarios de extracción de recursos naturales, transformaciones de éstos y transportes.
- Mediante la metodología desarrollada se pueden identificar los distintos tipos de materiales existentes en las líneas ferroviarias a renovar y sus posibles usos dentro de la misma línea, pero existen limitaciones tanto normativa, según se ha visto en el apartado 5.2, como en los procedimientos de ejecución y características particulares de cada obra como se ha mencionado en el apartado 5.2.4 para el uso de éstos.
- En el caso de estudio propuesto se ve que, debido a la antigüedad de la línea a renovar y que ésta debe de ser interoperable no hay ningún elemento que se pueda reutilizar, pero sí que habría elementos que se podrían reciclar y utilizar dentro de la misma obra y que, además, supondrían un ahorro importante tanto a nivel económico como ambiental, como es el reciclaje del balasto en los distintos materiales granulométricos como son el subbalasto, zahorras y capa de forma necesarios para la adaptación de la explanada a las nuevas necesidades de tráfico ferroviario.
- Es cierto que en muchas ocasiones el intento de seguir las directrices para favorecer la economía circular en este tipo de obras debería venir precedido en fases más iniciales que en la fase de proyecto de ejecución.

Esta forma de trabajar estaría alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la Organización de las Naciones Unidas. En la siguiente tabla se encuentran los principales ODS con los que estaría alineados esta manera de entender la obra civil.

Tabla 13. Alineación del trabajo con los ODS

	ODS	METAS ODS SEGÚN EL ALTO COMISIONADO PARA LA AGENDA 2030
	Trabajo decente y crecimiento económico	8.1 Mantenimiento del crecimiento económico. 8.2 Elevar la productividad a través de la diversificación, tecnología e innovación. 8.4 Mejora de la producción y consumo eficiente y respetuoso.
	Industria, innovación e infraestructura	9.1 Desarrollo de Infraestructura sostenible. 9.2 Promoción de industria inclusiva y sostenible. 9.4 Modernización de la infraestructura, tecnología limpia. 9.A Apoyo a infraestructuras sostenibles y resilientes.
	Ciudades y comunidades sostenibles	11.6 Reducción del impacto ambiental en ciudades.
	Producción y consumo responsables	12.2 Lograr el uso eficiente de recursos naturales. 12.4 Gestión de desechos y productos químicos. 12.5 Prevención reducción reciclado y reutilización de desechos 12.6 Adopción de prácticas sostenibles en empresas.
	Vida de ecosistemas terrestres	15.1 Asegurar la Conservación y uso sostenibles de los ecosistemas. 15.3 Lucha contra la desertificación. 15.9 Integración de planes sensibles a medioambiente.

9. Futuras líneas de investigación.

Como se ha mencionado en las conclusiones, una línea de investigación interesante para seguir profundizando en esta manera de conseguir un futuro sostenible para este tipo de obras de renovación ferroviaria sería como implementar de manera efectiva esta manera de hacer las obras desde fases mucho más tempranas a la ejecución de las obras.

¿Qué se podría hacer para conseguir una mayor economía circular durante las fases de anteriores a la ejecución del proyecto? Esa pregunta sería muy interesante tenerla en cuenta durante todas las fases anteriores a la fase de ejecución de la obra, y sobre todo durante la fase de redacción del proyecto que es

donde se debería de hacer todo el trabajo en lo relativo al estudio de los materiales existentes y sus posibles usos en una obra de renovación quedando todo esto recogido en los distintos documentos del proyecto para así facilitar la labor de la ejecución.

Bibliografía

- ADIF. (2007). NAV 3-4-0.1 CANTERAS SUMINISTRADORAS. PRESCRIPCIONES GEOTÉCNICAS Y DE INSTALACIONES DE FABRICACIÓN.
- ADIF. (2015). NAV 3-4-3.0 Montaje de vía en balasto para obra nueva.
- ADIF. (2022a). ET 03.360.004.0 Especificación Técnica. Balasto.
- ADIF. (2022b). NAV 7-1-3.9 Reutilización del material ferroviario de vía procedente de desinstalaciones.
- ADIF. (2023a). NAP 1-2-0.1. ÍNDICE Y CONTENIDO TIPO DE LOS PROYECTOS DE PLATAFORMA FERROVIARIA.
- ADIF. (2023b). NAP 1-2-4.0 Geología, geotecnia y estudio de los materiales.
- ADIF. (2024). NAP 1-2-1.0. Metodología para el diseño del trazado ferroviario.
- AECOC. (2017). Guía para el cálculo de la huella de carbono del transporte de mercancías por carretera.
https://www.ace-cargadores.com/wp-content/uploads/2020/04/Boletin_864/Guia%20calculo%20CO2%20AECOC.pdf
- Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria. (2022). NOTA TÉCNICA. UTILIZACIÓN DE MATERIAL DE SEGUNDO USO EN INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS.
- Agencia Europea del medio ambiente. (2016). Hacia una movilidad limpia e inteligente Hacia una movilidad limpia e inteligente Transporte y medio ambiente en Europa.
<https://doi.org/10.2800/120042>
- Aggregates Europe, & Federación de áridos. (2023). ÁRIDOS NEUTROS 2050 HOJA DE RUTA PARA LA NEUTRALIDAD CLIMÁTICA EN LA INDUSTRIA DE LOS ÁRIDOS.
<https://www.euskalarido.com/Documents/uepg-hoja-de-ruta-sobre-el-cambio-climatico-lite.pdf>
- Agrela, F., González-Gallardo, F., Rosales, J., Tavira, J., Ayuso, J., & Cabrera, M. (2020). Complete real-scale application of recycled aggregates in a port loading platform in Huelva, Spain. *Materials*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/ma13112651>
- Ahmed, A. A., & Abouzeid, A. Z. M. (2009). POTENTIAL USE OF PHOSPHATE WASTES AS AGGREGATES IN ROAD CONSTRUCTION. In *Journal of Engineering Sciences* (Vol. 37, Issue 2).
- Amrani, M., Taha, Y., Kchikach, A., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2019). Valorization of phosphate mine waste rocks as materials for road construction. *Minerals*, 9(4).
<https://doi.org/10.3390/min9040237>
- Arias, M., Nuñez, A., Barral, M. T., & Díaz-Fierros, F. (1998a). Pollution potential of copper mine spoil used for road making. *Science of The Total Environment*, 221(2–3), 111–116.
[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00245-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00245-9)
- Arias, M., Nuñez, A., Barral, M. T., & Díaz-Fierros, F. (1998b). Pollution potential of copper mine spoil used for road making. *Science of The Total Environment*, 221(2–3), 111–116.
[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00245-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00245-9)
- Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., & Prongmanee, N. (2014). Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials

- in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials*, 58, 245–257. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.02.025>
- Arulrajah, A., Naeini, M., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S., & Leong, M. (2020). Recovered plastic and demolition waste blends as railway capping materials. *Transportation Geotechnics*, 22, 100320. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2020.100320>
- Banerjee, L., Chawla, S., & Kumar Dash, S. (2020). Application of geocell reinforced coal mine overburden waste as subballast in railway tracks on weak subgrade. *Construction and Building Materials*, 265, 120774. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120774>
- Barbudo, A., Agrela, F., Ayuso, J., Jiménez, J. R., & Poon, C. S. (2012). Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials*, 28(1), 129–138. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.07.035>
- Campaña, O., Galeas, S., & Guerrero, V. (2016). Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del reciclaje de neumáticos de Automotores. *Revista Politécnica*, 36.
- Cardone, F., Grilli, A., Bocci, M., & Graziani, A. (2015). Curing and temperature sensitivity of cement–bitumen treated materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(10), 868–880. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.966710>
- Cescon, J. T. A. M., Silva, B.-H. de A. e, Marques, M. E. S., & Santos, R. P. dos. (2021). Evaluation of the viability of recycling railroad ballast for reusing in railroads. *Research, Society and Development*, 10(13), e277101321231. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i13.21231>
- Chiu, C. Te, & Lu, L. C. (2007). A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1027–1033. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2006.02.005>
- Comisión Europea. (2000). DECISIÓN DE LA COMISIÓN de 3 de mayo de 2000 que sustituye a la Decisión 94/3/CE por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos y a la Decisión 94/904/CE del Consejo por la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos. *Diario Oficial de Las Comunidades Europeas*.
- Comisión Europea. (2014). DECISIÓN DE LA COMISIÓN - de 18 de diciembre de 2014 - por la que se modifica la Decisión 2000/ 532/ CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/ 98/ CE del Parlamento Europeo y del Consejo - (2014/ 955/ UE).
- Comisión europea. (2014). REGLAMENTO (UE) No 1299/2014 DE LA COMISIÓN de 18 de noviembre de 2014 relativo a las especificaciones técnicas de interoperabilidad del subsistema «infraestructura» en el sistema ferroviario de la Unión Europea.
- Comisión Europea. (2023a). La Comisión se congratula de la finalización de la legislación clave «Objetivo 55», que pone a la UE en vías de superar los objetivos para. *Comunicado de Prensa*.
- Comisión Europea. (2023b). Reglamento de Ejecución (UE) 2023/... de la Comisión, de 10 de agosto de 2023, por el que se modifican los Reglamentos (UE) n.o 321/2013, (UE) n.o 1299/2014, (UE) n.o

- 1300/2014, (UE) n.o 1301/2014, (UE) n.o 1302/2014 y (UE) n.o 1304/2014 y el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/777. Diario oficial de la Unión Europea.
- Consejo Europeo. (2019). Economía circular - Consilium.
<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/circular-economy/>
- Consideraciones medioambientales | CEDEX. (n.d.). Retrieved March 6, 2025, from
<https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/27/esteriles-de-carbon/92/consideraciones-medioambientales.html>
- ConstruGomes. (n.d.). Retrieved February 26, 2025, from
<https://www.construgomes.com/es/proyectos/puente-sobre-el-rio-turia>
- Economía circular - Consilium. (n.d.-a). Retrieved April 8, 2025, from
<https://www.consilium.europa.eu/es/topics/circular-economy/>
- Economía circular - Consilium. (n.d.-b). Retrieved April 7, 2025, from
<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/circular-economy/#design>
- El trabajo de la UE para la gestión sostenible de residuos | Temas | Parlamento Europeo. (n.d.). Retrieved March 25, 2025, from <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20180328STO00751/el-trabajo-de-la-ue-para-la-gestion-sostenible-de-residuos>
- European Coincil. (n.d.). European Green Deal - Consilium. Retrieved February 13, 2025, from
<https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/>
- Eurostat. (n.d.). Waste statistics - Statistics Explained. Retrieved February 13, 2025, from
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation
- Fang, X., Garcia-hernandez, A., & Lura, P. (2016). Overview on cold cement bitumen emulsion asphalt. RILEM Technical Letters, 1, 116–121. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.23>
- Frías, M., Rodríguez, O., & Sánchez De Rojas, M. I. (2015). Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials. A review. Construction and Building Materials, 74, 37–48. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.10.007>
- Frías, M., Vigil De La Villa, R., García, R., De Soto, I., Medina, C., & Sánchez De Rojas, M. I. (2014). Scientific and technical aspects of blended cement matrices containing activated slate wastes. Cement and Concrete Composites, 48, 19–25.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2014.01.002>
- Galceranb-Vercher, M., & Bouchet, M. (2023). THE GREEN, DIGITAL AND SOCIAL TRANSITIONS: Towards a New Eco-Social Pact. CIDOB briefings, March.
- Grilli, A., Graziani, A., & Bocci, M. (2012). Compactability and thermal sensitivity of cement–bitumen-treated materials. Road Materials and Pavement Design, 13(4), 599–617.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2012.742624>
- Guo, Y., Xie, J., Fan, Z., Markine, V., Connolly, D. P., & Jing, G. (2022). Railway ballast material selection and evaluation: A review. In Construction and Building Materials (Vol. 344). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128218>

- Hu, L., Wu, H., Zhang, L., Zhang, P., & Wen, Q. (2017). Geotechnical Properties of Mine Tailings. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001736](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001736)
- Ibrahim, M. R., Katman, H. Y., Karim, M. R., Koting, S., & Mashaan, N. S. (2013). A review on the effect of crumb rubber addition to the rheology of crumb rubber modified bitumen. In *Advances in Materials Science and Engineering* (Vol. 2013). <https://doi.org/10.1155/2013/415246>
- Indicators | European Environment Agency's home page. (n.d.). Retrieved March 25, 2025, from <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators>
- Indraratna, B., Gasson, I., & Chowdhury, R. N. (2011). Utilization of compacted coal tailings as a structural fill. *https://doi.org/10.1139/T94-074*, 31(5), 614–623. <https://doi.org/10.1139/T94-074>
- Indraratna, B., Qi, Y., & Heitor, A. (2018). Evaluating the Properties of Mixtures of Steel Furnace Slag, Coal Wash, and Rubber Crumbs Used as Subballast. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002108](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002108)
- Indraratna, B., Qi, Y., Malisetty, R. S., Navaratnarajah, S. K., Mehmood, F., & Tawk, M. (2022). Recycled materials in railroad substructure: an energy perspective. *Railway Engineering Science*, 30(3), 304–322. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00267-6>
- Indraratna, B., Salim, W., & Rujikiatkamjorn, C. (2011). Advanced rail geotechnology - Ballasted track. *Advanced Rail Geotechnology - Ballasted Track*, 1–410. <https://doi.org/10.1201/B10861/ADVANCED-RAIL-GEOTECHNOLOGY-BALLASTED-TRACK-BUDDHIMA-INDRARATNA-WADUD-SALIM-CHOLACHAT-RUJIKIATKAMJORN/ACCESSIBILITY-INFORMATION>
- INE. (n.d.). Tabla de equivalencias LER-CER-Stat Rev-4.
- Instituto Nacional de Estadística. (2024). INE Estadísticas sobre generación de residuos. https://www.ine.es/dyngs/INEbase/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176841&menu=ultiDatos&idp=1254735976612
- Jefatura del estado. (2011). Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Jefatura del estado. (2013). Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Jia, W., Markine, V., Guo, Y., & Jing, G. (2019). Experimental and numerical investigations on the shear behaviour of recycled railway ballast. *Construction and Building Materials*, 217, 310–320. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.05.020>
- Jiménez, J. R., Ayuso, J., Agrela, F., López, M., & Galvín, A. P. (2012). Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 88–97. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.10.012>
- Jing, G., Wang, J., Wang, H., & Siahkouhi, M. (2020). Numerical investigation of the behavior of stone ballast mixed by steel slag in ballasted railway track. *Construction and Building Materials*, 262, 120015. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120015>

- Konieczna, K., Pokorski, P., Sorociak, W., Radziszewski, P., Żymelka, D., & Król, J. B. (2020). Study of the stiffness of the bitumen emulsion based cold recycling mixes for road base courses. *Materials*, 13(23), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ma13235473>
- Leite, F. D. C., Motta, R. D. S., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2972–2979. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>
- Martínez Fernández, P., Hidalgo Signes, C., Villalba Sanchís, I., Pérez Mira, D., & Insa Franco, R. (2018). Real scale evaluation of vibration mitigation of sub-ballast layers with added tyre-derived aggregate. *Construction and Building Materials*, 169, 335–346. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.027>
- Martínez García, R., Andrés Juan Valdés, D., & Julia M^a Morán del Pozo, D. (2021). Evaluación del uso de áridos reciclados de hormigón en la fabricación de hormigones autocompactantes y morteros de cemento. Universidad de León.
- Ministerio de Fomento. (2006). ORDEN FOM/1269/2006, de 17 de abril, por la que se aprueban los Capítulos: 6.–Balasto y 7.–Subbalasto del pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios (PF). BOE.
- Ministerio de Fomento. (2015a). Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio, por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal. <http://www.boe.es>
- Ministerio de Fomento. (2015b). Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3).
- Ministerio de la presidencia. (2008). Real Decreto 105/2008 por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. BOE.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Serie 1990-2023. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1>.
- MITECO. (2024). Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de la organización. <https://cpage.mpr.gob.es/>
- MITECO. (2025). Minería y Explosivos. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/mineria-explosivos.html>
- MITMA. (2023). ORDEN CIRCULAR OC 2/2023 SOBRE REUTILIZACIÓN DE CAPAS DE FIRMES Y PAVIMENTOS BITUMINOSOS. <https://sede.mitma.gob.es>
- Morata Royes, M. (2016). Nuevo árido reciclado de alto rendimiento para capas de asiento ferroviario. *Ciencia y Técnica*.
- Neto, M. L. Q., Amorim, E. F., De França, F. A. N., & Medeiros, M. K. S. (2020). Evaluation of an experimental hot asphalt concrete urban paving section using construction and works demolition waste (CDW) as a coating layer. *Revista de Gestao Ambiental e Sustentabilidade*, 9(1). <https://doi.org/10.5585/GEAS.V9I1.16108>
- Obras realizadas | CEDEX. (n.d.). Retrieved March 7, 2025, from <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/25/escorias-de-aceria-de-horno-de-arco-electrico/valorizacion/55/obras-realizadas.html>

- ONU, 2. (2015). Acuerdo de París Naciones Unidas 2015. Onu, 29.
https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- Panghal, H., & Kumar, A. (2024). Sustainable Concrete: Exploring Fresh, Mechanical, Durability, and Microstructural Properties with Recycled Fine Aggregates. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 68(2), 543–558. <https://doi.org/10.3311/PPci.22711>
- Park, T. (2003). Application of Construction and Building Debris as Base and Subbase Materials in Rigid Pavement. *Journal of Transportation Engineering*, 129(5), 558–563.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:5\(558\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:5(558))
- Parlamento europeo. (2018). REGLAMENTO (UE) 2018/841 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 30 de mayo de 2018. *Diario oficial de la unión europea*, 1–38.
- Parlamento Europeo. (2023). ¿Qué es la neutralidad de carbono y cómo alcanzarla para 2050?
<https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20190926STO62270/Que-Es-La-Neutralidad-de-Carbono-y-Como-Alcanzarla-Para-2050>, 1–4.
- Parlamento Europeo. (2024, November 20). ¿Cómo avanza la UE contra el cambio climático? (infografía) | Temas | Parlamento Europeo.
<https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20180706STO07407/como-avanza-la-ue-contra-el-cambio-climatico-infografia>
- Pérez Pérez, I., & María, A. (n.d.). Mezclas asfálticas dosificadas con RCD para carreteras de bajo tráfico. *Piedra ornamental | CEDEX*. (n.d.). Retrieved March 6, 2025, from
<https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/41/piedra-ornamental/>
- Poon, C. S., & Chan, D. (2006). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials*, 20(8), 578–585.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2005.01.045>
- Qi, Y., Indraratna, B., Heitor, A., & Vinod, J. S. (2018). Effect of Rubber Crumbs on the Cyclic Behavior of Steel Furnace Slag and Coal Wash Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001827](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001827)
- Ranganathan, J., Smith, B., Aksel, H., Norsk, H., Vicki, H., Cochran, A., Murphy, A. J., Gupta, S., Eaton, R., McMahon, M., Don, B. P., Dow, H., Canada, C., Vanderborght, B., Melanie, H., Kjell, E. K., Norsk, O., Laurent, H., Pricewaterhousecoopers, S., ... Camobreco, V. (n.d.). PROTOCOLO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO.
- Royes, M. M., Iribarren, J. P., & Pujol, V. F. (2022). New sustainable materials for ballast, subballast and form layer in railway infrastructures. *Geotecnia*, 2022(155), 55–75. https://doi.org/10.14195/2184-8394_155_3
- Santana, M., & Estaire, J. (2022). The problem of the CDW environmental characterization for their use in earthworks in Spain. *Geotecnia*, 2022(155), 77–101. https://doi.org/10.14195/2184-8394_155_4
- Secretaría de Estado de Infraestructura. (2003). ORDEN FOM/3460/2003, DE 28 DE NOVIEMBRE, POR LA QUE SE APRUEBA LA NORMA 6.1 IC SECCIONES DE FIRME, DE LA INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS (BOE DE 12 DE DICIEMBRE DE 2003).
- Segui, P., Safhi, A. el M., Amrani, M., & Benzaazoua, M. (2023). Mining Wastes as Road Construction Material: A Review. In *Minerals* (Vol. 13, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/min13010090>

- Sharma, V. K., Fortuna, F., Mincarini, M., Berillo, M., & Cornacchia, G. (2000). Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment. *Applied Energy*, 65(1–4), 381–394.
[https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00085-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00085-9)
- Silva, Y., Robayo, R., Matthey, P., & Delvasto, S. (2015). OBTENCIÓN DE CONCRETOS AUTOCOMPACTANTES EMPLEANDO RESIDUOS DE DEMOLICIÓN. In *Rev. LatinAm. Metal. Mat* (Vol. 35, Issue 1). www.rlmm.org
- Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2014). Viability of using end-of-life tire pads as under sleeper pads in railway. *Construction and Building Materials*, 64, 150–156.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.04.013>
- Statista. (n.d.). Reducción de emisiones: objetivos de la UE 2013-2050. Retrieved March 25, 2025, from <https://es-statista-com.eu1.proxy.openathens.net/estadisticas/578998/objetivos-de-la-ue-de-reduccion-de-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero/>
- Statista. (2024a). Global Energy Monitor. (July 1, 2024). Countries and territories with the largest number of operational coal power plants worldwide as of July 2024 [Graph]. Statista.
<https://www.statista.com/statistics/859266/number-of-coal-power-plants-by-country/>
- Statista. (2024b, July 1). Number of coal power plants by country 2024 | Statista. Statista. <https://www-statista-com.eu1.proxy.openathens.net/statistics/859266/number-of-coal-power-plants-by-country/>
- Suárez Maldonado, R. J., & Pájaro Miranda, C. A. (2024). Coal ash as a natural additive for subgrade stabilization in the construction of low-volume traffic roads. *Earth Sciences Research Journal*, 28(1), 73–78. <https://doi.org/10.15446/esrj.v28n1.110855>
- Sultan, H. A. (1979). Stabilized Copper Mill Tailings for Highway Construction.
- Thom, N., & Dawson, A. (2019). Sustainable road design: Promoting recycling and non-conventional materials. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 21). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/su11216106>
- UNE-EN_ISO_14064-1=2019. (n.d.).
- Unión Europea. (2016).
DIRECTIVA (UE) 2016/ 797 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO - de 11 de mayo de 2016 - sobre la interoperabilidad del sistema ferroviario dentro de la Unión Europea. *Diario oficial de la unión europea*.
- Unión Europea. (2021). REGLAMENTO (UE) 2021/1119 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 30 de junio de 2021 o por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática y se modifican los Reglamentos (CE) n. 401/2009 y (UE) 2018/1999. *Diario Oficial de La Unión Europea*, 2021(2), 1–17.
- Ural, N., & Yakş, G. (2020). Utilization of marble piece wastes as base materials. *Open Geosciences*, 12(1), 1247–1262. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0197>
- Yagüe García, S., & González Gaya, C. (2020). Durability analysis of pozzolanic cements containing recycled track ballast: Sustainability under extreme environmental conditions. *Construction and Building Materials*, 242, 117999. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.117999>

