

04-042

REUSE OF PAINT SLUDGE IN ASPHALT MIXES

Díaz Piloñeta, Marina ⁽¹⁾; Álvarez Cabal, Valeriano ⁽¹⁾; Terrados Cristos, Marta ⁽¹⁾; Alonso Arias, Celsa ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de Oviedo

Paint sludge generated in the manufacture of wind towers during painting and other coating works results in the emission of hazardous waste that is difficult to manage and whose final treatment usually ends up in landfill or incineration. In most cases, epoxy resin paint is used for this work. These resins are polymeric materials with very good adhesion and chemical resistance properties that have been increasingly studied to improve the performance of asphalt mixtures. In this work, the different applications and research currently proposed for the reuse of this waste are analysed and the possibility of incorporating them as a substitute additive for bitumen used in road pavement construction is studied

Keywords: circular economy; paint sludge; wind industry; asphalt mixes; waste recovery

REUTILIZACIÓN DE LODOS DE PINTURA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los lodos de pintura generados en la fabricación de torres eólicas durante las fases de pintado y aplicación de otros recubrimientos suponen la emisión de residuos peligrosos difíciles de gestionar cuyo tratamiento último normalmente termina siendo el vertedero o la incineración. En la mayoría de los casos se utiliza pintura con resina epoxi. Estas resinas son materiales poliméricos con muy buenas propiedades de adherencia y resistencia química que se han sido cada vez más objeto de estudio para mejorar el rendimiento de las mezclas asfálticas. Este trabajo analiza las distintas aplicaciones y rutas planteadas actualmente para la reutilización de estos lodos y estudia la posibilidad de incorporación de los mismos como un aditivo sustituto del betún empleado en la construcción de firmes.

Palabras clave: economía circular; lodos de pintura; industria eólica; mezclas asfálticas; valorización de residuos



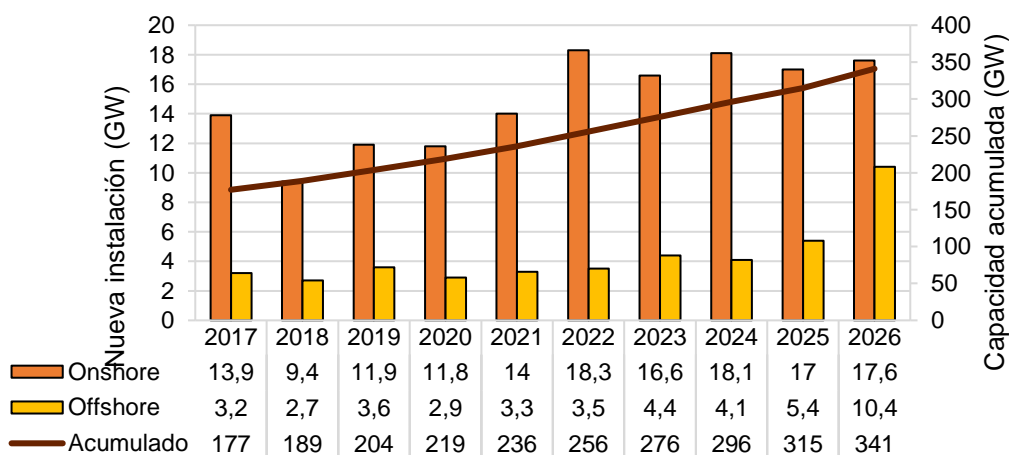
1 Introducción

Durante la aplicación de pinturas y recubrimientos a nivel industrial se generan diferentes residuos, principalmente lodos de pintura, catalogados como residuos peligrosos (080113* según el código LER) que requieren un tratamiento y transporte específicos por gestor especializados. Además, las propias empresas gestoras de residuos, durante sus procesos de tratamiento, clasificación y disposición, generan otros subproductos que en última instancia son también llevados al vertedero, con el consiguiente impacto derivado.

Las principales industrias generadoras de este tipo de residuos involucran procesos de recubrimiento de metales como la industria automovilística, de electrodomésticos y otras industrias manufactureras (Avci et al. 2017). Sin embargo, con el rápido crecimiento de la energía eólica y la producción de torres y turbinas, este sector también ha pasado a cobrar especial relevancia en la generación de este tipo de residuos.

En los últimos años ha habido un crecimiento considerable de la utilización de la energía eólica (Ozoemena, Cheung, y Hasan 2018). En 2021 se sumaron casi 94 GW de nueva potencia eólica en todo el mundo, y solo en 2019 se ejecutaron 22.893 aerogeneradores (Global Wind Energy Council 2022). A nivel europeo se instalaron 17,4 GW en 2021, un 18% más que en 2020, alcanzando una capacidad total de 236 GW y, de acuerdo con las últimas estimaciones (Wind Europe 2021). la cantidad de potencia instalada aumentará progresivamente año a año hasta 2026 ()

Figura 1. Nuevas instalaciones previstas para 2022-26 en Europa.



La composición de estos lodos está condicionada por la formulación de la pintura utilizada, y esta lo está por su finalidad. En este caso, el trabajo se enfoca en recubrimientos epoxi de superficies metálicas expuestas a condiciones de intemperie, con carácter de protectores antioxidantes. Los lodos generados a partir de la pintura con base disolvente representan el mayor problema debido a su alto contenido de materia volátil y metales pesados con bajo punto de inflamación, así como la presencia de solventes orgánicos y resinas de pintura sin curar que forman una película al calentarse, convirtiéndolo en un material pegajoso y muy difícil de eliminar (Liu et al. 2022).

De esta tipología son, por ejemplo, las pinturas empleadas en torres eólicas, que serían un ejemplo típico de estructura metálica de gran porte expuesta a intemperie. Este recubrimiento consiste en un sistema multicapa constituidos principalmente por dos tipos de recubrimientos: una imprimación, que mejora la resistencia a la corrosión, y una capa de pintura epoxi, que da el color y protección a la torre. Durante las operaciones de pintado, la pintura se pulveriza

y las partículas residuales son recogidas por un chorro de agua por lo que los residuos se transforman en lodo.

Al tratarse de un residuo peligroso, generalmente este material se vierte y acumula en grandes balsas o se elimina vía incineración, lo que implica procesos poco eficaces en la protección del medio ambiente y los seres vivos, representando también una amenaza significativa para la salud humana. Estudios preliminares desarrollados en otros sectores donde también se producen lodos de pintura similares a los tratados en el presente trabajo, han planteado la posibilidad de utilización del residuo como aglutinante dentro de mezclas bituminosas empleadas en la ejecución de capas de rodadura (Ruffino et al. 2011).

La construcción de carreteras es uno de los principales responsables del calentamiento global (Cass and Mukherjee 2011). Varias etapas contribuyen a la producción de GEI, pero la fase de extracción y producción de las materias primas ha sido identificada como la principal contribuyente a las emisiones totales de carbono y al consumo de energía (Jiang y Wu 2019). La elección de los materiales influye en la contaminación local y la degradación del medio ambiente (Bonoli, Degli Esposti, y Magrini 2020). A pesar de que, por cantidades, los áridos son el componente fundamental de cualquier mezcla asfáltica, no representan más que una pequeña parte del impacto medioambiental de los materiales utilizados en la construcción de carreteras. Investigaciones han comprobado que casi la totalidad del impacto generado se debe al betún (Ferreira et al. 2016).

Este trabajo analiza las distintas aplicaciones y rutas planteadas actualmente para la reutilización de los lodos de pintura y plantea la posible incorporación de estos como un aditivo sustituto del betún empleado en la construcción de firmes.

2 Estado del arte

La mayoría de las industrias llevan a cabo el proceso de pintado la aplicación de la pintura en forma de spray. La pintura residual, es decir, aquella que no se adhiere a la superficie, queda en el aire y es recogida a través de corrientes de agua a las que normalmente se añaden otros componentes como agentes de coagulación, generando de esta forma los lodos de pintura (Bhatia, Bhatia, y Vishnoi 2009).

Estos lodos son un residuo de composición compleja y naturaleza peligrosa, en los que pueden encontrarse elementos como resinas poliméricas, pigmentos, disolventes orgánicos, agentes de curado, agentes de flotación, etc. (Alonso Felipe 2016). En cuanto a su peligrosidad, pueden contar con un porcentaje importante de metales pesados y compuestos orgánicos, por lo que su depósito en vertedero supone, además de un elevado coste económico, un alto riesgo medioambiental.

La industria automovilística, siendo la principal generadora de lodos de pintura, ha llevado a cabo en los últimos años numerosas investigaciones con el objetivo de encontrar formas de valorizar y darle una salida a este residuo. Algunos de los estudios plantean el uso de los lodos en la fabricación de sellantes y adhesivos, como un ingrediente más junto con la resina de PVC, el plastificante y polímeros termoplásticos, como etilvinilacetato. Sin embargo, la cantidad reutilizada termina siendo muy baja, y la calidad del sellante final se ve fuertemente influida por la composición del lodo (Gerace y Gerace 1992) (Gerace, Landaburu, y Klosterman 2002) (Gerace, Gamboa, y Landaburu 1993).

Otra posibilidad estudiada es su valorización como compost gracias a la presencia de resina melamínica que, al tener un elevado contenido en nitrógeno (66,7%) y ser este un conocido nutriente biodegradable, puede tener un efecto positivo en el crecimiento de los cultivos (Tian et al. 2012). No obstante, el tratamiento para su síntesis es muy complejo y costoso, además

de que no quedan realmente claros los efectos del lodo sobre el terreno y los cultivos a largo plazo.

Las investigaciones más destacadas son aquellas que tratan de incorporar los lodos de pintura en la fabricación de materiales de construcción, como pueden ser el cemento, mortero o asfalto (Louis 1996), así como compuestos cerámicos que puedan convertirse en materiales de refuerzo, dando lugar a MMC's o plásticos reforzados (Nakouzi et al. 1998).

Todos los estudios indicados anteriormente basan sus investigaciones en lodos de pintura provenientes de la industria del automóvil, puesto que es el sector con mayores tasas de producción, pero este tipo de lodos se presentan también en otras industrias sobre las que no se han realizado ningún tipo de estudios.

Las principales infraestructuras de transporte actualmente son las carreteras y, es precisamente por su constante utilización, por lo que de forma continua se realizan trabajos de construcción y mantenimiento, utilizando de forma incesante mezclas bituminosas. Las mezclas asfálticas empleadas en las capas de rodadura se componen, comúnmente, de un 90% de áridos, un 3% de *filler*, un 2% de aditivos y un 5% de ligante (Poulikakos et al. 2017). De los diferentes elementos que componen las mezclas asfálticas, el betún es el que tiene un mayor impacto medioambiental a la vez que influye directamente en el comportamiento reológico de la mezcla, por lo que múltiples empresas e investigaciones tratan de modificar sus características y composición con la finalidad de realizar firmes más duraros y con mayor resistencia a la deformación que alarguen la vida útil de la carretera.

Existen numerosos trabajos centrados en desarrollar betunes modificados con polímeros para adaptar las carreteras a aquellas situaciones donde las exigencias de tráfico son mayores (Gómez et al. 2003) (Becker, Méndez, y Rodríguez 2000). Sin embargo, la creciente preocupación por el medio ambiente ha hecho que se valore la posibilidad de sustituir parte del betún por materiales de naturaleza polimérica provenientes del reciclaje de, por ejemplo, residuos electrónicos, residuos de polietileno y PVC (Rahman et al. 2013) o incluso elementos no metálicos separados de los circuitos impresos (polímeros termoestables, fibras de vidrio, retardantes de llama bromados) (Guo et al. 2009).

En la última década ha sido objeto de estudio el uso de resina epoxi como modificador de este tipo de mezclas (Abd El Rahman, EL-Shafie, y El Kholy 2012; Yu, Cong, y Wu 2009). Estas resinas son materiales poliméricos con muy buenas propiedades de adherencia, resistencia química y dureza, etc. frecuentemente empleadas en el sector de la construcción, bien como adhesivos, como recubrimientos impermeabilizantes, etc. Sus buenas propiedades hacen que sea un recurso caro y que por ello se utilice únicamente para aplicaciones que requieren una calidad o finalidad determinada (Alonso Felipe 2016).

Resulta, por lo tanto, de interés estudiar si los lodos de pintura epoxi podrían considerarse como una fuente de esta resina y, de ser así, su posible incorporación a las mezclas asfálticas como aditivo, así como sus efectos. Esto podría suponer, no solo una manera de obtener las ventajas de la resina epoxi de una forma mucho más económica, sino también una gestión de los lodos de pintura generados en la industria eólica medioambientalmente más favorable, algo que hasta ahora no se había planteado para este sector.

Por otro lado, el comportamiento reológico de los betunes asfálticos viene determinado fundamentalmente por su estructura, es decir, por su contenido en asfaltenos, aromáticos, resinas y saturados. La relación asfaltenos/resinas tiene un importante efecto en la viscosidad del betún, siendo mayor cuanto mayor sea el contenido en asfaltenos. Así mismo, para un mismo contenido en asfaltenos, se ha visto que aumentar la cantidad de resinas endurece el betún y reduce el índice de penetración, mientras que incrementando el contenido en saturados se produce un ablandamiento del material. Por otro lado, se ha observado también

que la variación en el porcentaje de aromáticos apenas afecta a la reología (Gómez et al. 2003) (Goodrich, Goodrich, y Kari 1986) (Juárez Leiva 2018).

Los lodos de pintura son ricos en asfaltenos por lo que su incorporación a una mezcla asfáltica podría suponer un aumento en la viscosidad del betún. Actualmente, existen betunes de alta viscosidad modificados con polímeros (MPB AV) y también modificados con caucho (BMAVC), que encuentran aplicación en situaciones donde se requiere una elevada resistencia a la reflexión de fisuras, alta resistencia a fatiga, al envejecimiento o ausencia de deformaciones plásticas.

La posibilidad de usar lodos de pintura de la industria automovilística en la construcción de carreteras se planteó en algunas investigaciones (Dalmazzo et al. 2016; Riviera et al. 2012; Ruffino et al. 2021; Zanetti et al. 2018) que analizaron la sustitución de parte del betún utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas por lodos de pintura previamente tratados. Las conclusiones de estos estudios son optimistas en cuanto al desempeño que pueda tener un betún modificado con pintura como sustituto del betún asfáltico convencional.

Incorporar lodos de pintura de base epoxi a la mezcla asfáltica puede llegar a suponer una mejora de las propiedades del asfalto. Por lo que en este trabajo se analiza la implicación que tendría dicha sustitución. Así, se pretende que este residuo utilizado como aditivo reduzca el contenido necesario de ligante gracias a las ventajas proporcionadas por la resina epoxi.

3 Implicaciones de su utilización en mezclas asfálticas

El sector de pinturas y barnices incrementó un 4,8% su facturación en 2021 respecto al año anterior, hasta alcanzar 1.600 millones de euros (Observatorio sectorial DBK 2021). La pintura se aplica en numerosas áreas de la industria por una amplia gama de razones y no solo para mejorar la apariencia visual.

La protección frente a la corrosión y la mejora de las cualidades de la superficie también son muy importantes. Por ello, el consumo de pintura se da en diversos sectores, desde el sector del automóvil, industria maderera y otras industrias que requieran la aplicación de recubrimientos (Tabla 1) (ASEPAFI 2022).

Tabla 1. Mercado del sector de las pinturas para la industria en España (2020-21).

Industria	2020 (ton)	2021 (ton)
Automóvil (pintado y repintado)	41.427	40.160
Coil Coatings	2.485	2.659
Madera	35.334	40.634
Marina	5.163	5.421
Metalográficos	21.148	23.263
Industria general	67.663	77.813
Recubrimientos protectores	11.790	12.498
Pintura en polvo	21.089	23.409
Total	206.100	225.857

Actualmente, los lodos de pintura representan la principal fracción de residuos peligrosos del sector eólico, reportando algunas empresas hasta 250 toneladas anuales con su correspondiente coste de gestión ambiental. Todo aprovechamiento favorecerá, por tanto, la

mitigación de los efectos nocivos derivados de su tratamiento. Este reto no incumbe únicamente a una empresa en concreto, sino que sería de aplicación también, en general, para cualquier recubrimiento utilizando resinas epoxi por imprimación aérea.

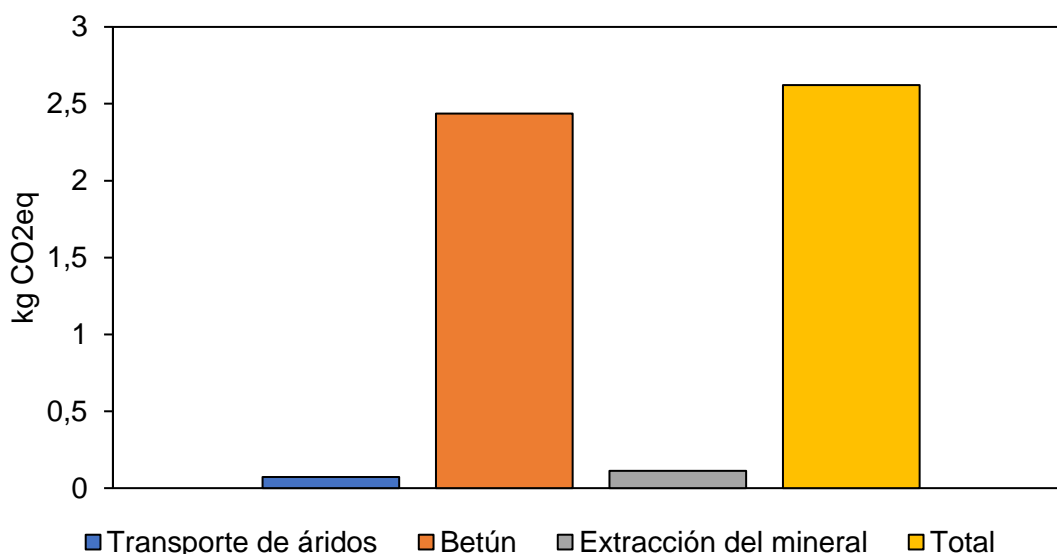
Las carreteras son la infraestructura de transporte dominante en Europa y un importante contribuyente a la economía. Casi tres cuartas partes del transporte interior de mercancías en Europa se realiza por carretera (Eurostat 2018). Además, cada año se construye una cantidad considerable de carreteras nuevas y rehabilitadas, lo que supuso la producción de más de 250 Mt de mezclas asfálticas en 2019 solo en Europa (European Asphalt Association (EAPA) 2019).

Esta red de carreteras implica no solo el consumo de materias primas, sino también el uso de energía (electricidad y combustibles), lo que conlleva un gran impacto medioambiental. El sector de la carretera es uno de los principales contribuyentes al calentamiento global (Cass y Mukherjee 2011). Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por metro y año asociadas a la construcción de infraestructuras viarias se han estimado en 14,7 kg de CO_{2eq}.

La composición de una mezcla asfáltica convencional es de aproximadamente un 93% de áridos, un 5% de ligante y un 2% de aditivos (Poulikakos et al. 2017). A pesar de que los áridos son el principal material utilizado en los pavimentos de las carreteras, las principales emisiones e impactos ambientales provienen del uso de betún como ligante (Ferreira et al. 2016). Tomando como referente la huella de carbono “de la cuna a la puerta” producto, entendida como la totalidad de los gases de efecto invernadero emitidas de forma directa o indirecta en la elaboración y de un producto.

Esta huella se calcula teniendo en cuenta todas las entradas y salidas del sistema llevando a su equivalente en kilogramos de dióxido de carbono. Si se hace un estudio de la huella de carbono por metro cuadrado de carretera construida se puede observar que el valor correspondiente al suministro de betún es el más importante, siendo totalmente decisivo. Este se debe principalmente al hecho de que el betún es de origen fósil, pero también por los impactos de su producción y transporte. En la Figura 2 se muestra una comparativa de la huella debida a los materiales utilizados, observándose claramente la predominancia del valor correspondiente al betún.

Figura 2. Emisiones de CO₂ por metro cuadrado de carretera construida.



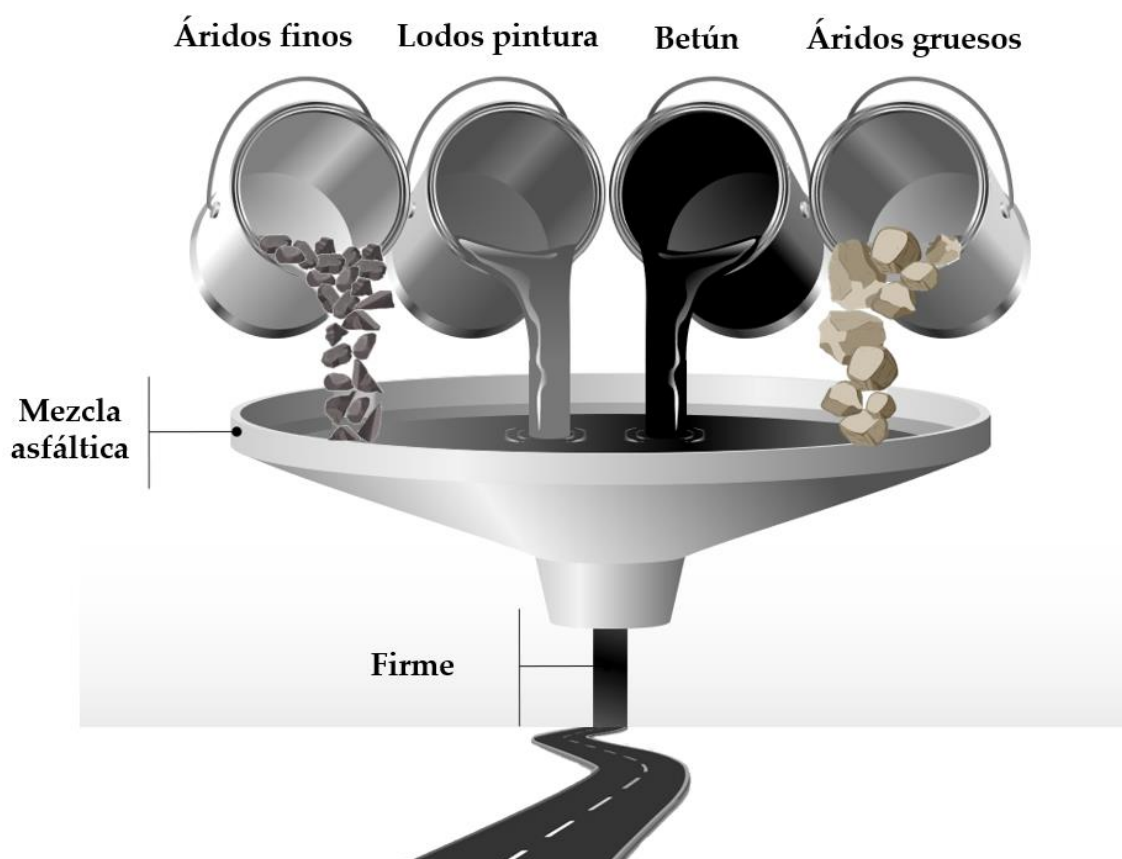
Los valores han sido calculados por los autores en función de los materiales de una carretera con firme T4, utilizando información procedente de la base de datos Ecoinvent aplicables a

Europa y utilizando la metodología IPCC 2013. De acuerdo con Eurobitumen, la producción de 1 tonelada de betún implica la emisión de, aproximadamente, 136 kg de CO₂ (Eurobitume 2019). La sustitución en una mezcla asfáltica convencional de una parte del betún (5,5% como valor normal) por un 1% de lodos de pintura implicaría el ahorro de 1kg de CO₂ por cada tonelada de mezcla ejecutada.

Para dar una mejor idea de las posibilidades de esta valorización se debe tener presente que para la capa de rodadura de un firme T42 (tráfico pesado de menos de 25 vehículos al día) se precian 6 kg de betún por cada m². En una calle de doble sentido de 6 metros de anchura se utilizarían 18.000 kg de betún por km. La sustitución de un mero 1 por ciento del betún en la mezcla evitaría el consumo de 180 kg de betún por kilómetro de vial construido.

La incorporación de un residuo, como son los lodos de pintura, a una mezcla asfáltica, tal y como se muestra en la Figura 3, para sustituir el betún lleva implícito un gran salto para ambas industrias en el impulso de la economía circular, abriendo las puertas a una nueva forma de valorización material de los lodos de pintura en una industria receptora que no está relacionada directamente con la actividad de la generadora del residuo.

Figura 3. Adición de lodos de pintura en la mezcla asfáltica.



El impacto sería relevante en ambos sectores. Por una parte, la industria generadora del residuo evita los costes económicos y medioambientales derivados de su tratamiento y gestión y, por otra parte, la industria receptora, tendrá acceso a una fuente continua, distribuida y no ligada a los incrementos de costes de los hidrocarburos.

Su aplicación sería un ejemplo perfecto de economía circular, reduciendo la necesidad de recursos y facilitando el desarrollo de un ecosistema industrial poniendo en relación sectores

tan diferentes como el de la construcción de torres eólicas, el de la pintura y el de las mezclas asfálticas.

Además, la cooperación entre empresas del mismo ámbito geográfico, pero con distinto mercado y productos, hace que la producción local se diversifique. Así se mejora la resiliencia del tejido industrial local, creando un marco de cooperación multidisciplinar que aumentará la competitividad de las empresas en el mercado exterior. Por otro lado, estos residuos se encuentran presentes en prácticamente cualquier tipo de localización y se generan de manera constante en el tiempo, al igual que el sector de construcción de carreteras, por lo que la distancia de transporte no representa una limitación para su utilización.

4 Conclusiones

Los lodos de pintura generados durante el recubrimiento de estructuras metálicas expuestas a la intemperie durante las fases de pintado y aplicación de otros recubrimientos suponen la emisión de materiales peligrosos difíciles de gestionar cuyo tratamiento último termina siendo el vertedero o la incineración. La posibilidad de utilización de estos residuos como aditivos empleados en mezclas asfálticas que permitan disminuir el contenido de betún requerido implicaría beneficios medioambientales y económicos tanto para la industria generadora del residuo, como para la industria receptora. La adición de un 1% de lodos de pintura a una mezcla asfáltica convencional (5,5% de betún) implicaría el ahorro de 1kg de CO₂ por tonelada de mezcla ejecutada y representaría, además, un claro ejemplo de economía circular.



5 Referencias

- Abd El Rahman, A. M. M., M. EL-Shafie, & S. A. El Kholy. (2012). 'Modification of Local Asphalt with Epoxy Resin to Be Used in Pavement'. *Egyptian Journal of Petroleum* 21(2):139–47. doi: 10.1016/j.ejpe.2012.11.006.
- Alonso Felipe, Jose Vicente. (2016). *Pinturas, barnices y afines: composición, formulación y caracterización*. E.T.S.I. Industriales (UPM).
- ASEPAFI. (2022). *Ventas de Pinturas y Tintas de Imprimir En España 2020-21. Estadísticas del sector. Asociación Española de Fabricación de Pinturas y Tintas de Imprimir*.
- Avci, Huseyin, Hamed Ghorbanpoor, Ilker Bekir Topcu, & Macid Nurbas. (2017). 'Investigation and Recycling of Paint Sludge with Cement and Lime for Producing Lightweight Construction Mortar'. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 5(1):861–69. doi: 10.1016/j.jece.2017.01.009.
- Becker, Yvonne, Maryro Méndez, & Yajaira Rodríguez. (2000). 'Polymer Modified Asphalt'. *Vision Tecnológica* 9.
- Bhatia, Raj Kumar, Vipen Kumar Bhatia, & Anand Shanker Vishnoi. (2009). 'Composition and Process for Conversion of Paint Sludge Into Reusable Paint'.
- Bonoli, Alessandra, Anna Degli Esposti, & Chiara Magrini. (2020). 'A Case Study of Industrial Symbiosis to Reduce GHG Emissions: Performance Analysis and LCA of Asphalt

- Concretes Made With RAP Aggregates and Steel Slags'. *Frontiers in Materials* 7. doi: 10.3389/fmats.2020.572955.
- Cass, Darrell, & Amlan Mukherjee. (2011). 'Calculation of Greenhouse Gas Emissions for Highway Construction Operations by Using a Hybrid Life-Cycle Assessment Approach: Case Study for Pavement Operations'. *Journal of Construction Engineering and Management* 137(11):1015–25. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000349.
- Dalmazzo, Davide, Arianna Vercelli, Ezio Santagata, Barbara Ruffino, & Maria Chiara Zanetti. (2016). 'Rheological Characterization and Performance-Related Evaluation of Paint Sludge Modified Binders'. *Materials and Structures* 50(1):74. doi: 10.1617/s11527-016-0945-y.
- Eurobitume. (2019). The Eurobitumen Life-Cycle Inventory for Bitumen. Bélgica.
- European Asphalt Association (EAPA). (2019). 'Asphalt in Figures 2019'. Retrieved (https://eapa.org/wp-content/uploads/2020/12/Asphalt-in-figures_2019.pdf).
- Eurostat. (2018). 'Freight Transport Statistics - Statistics Explained'. Retrieved 4 February 2021 (https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Freight_transport_statistics).
- Ferreira, Victor J., Aitana Sáez-De-Guinoa Vilaplana, Tatiana García-Armingol, Alfonso Aranda-Usón, Cristina Lausín-González, Ana M. López-Sabirón, and Germán Ferreira. (2016). 'Evaluation of the Steel Slag Incorporation as Coarse Aggregate for Road Construction: Technical Requirements and Environmental Impact Assessment'. *Journal of Cleaner Production* 130:175–86. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.094.
- Gerace, Michael J., Sevilla C. Gamboa, & Yasminka S. Landaburu. (1993). 'Method of Making Sludge Powder and Sealant from Paint Sludge and Sludge Powder and Sealant Compositions Produced Thereby'.
- Gerace, Michael J., & Janet M. Gerace. (1992). 'Method of Making a Filler from Automotive Paint Sludge, Filler, and Sealant Containing a Filler'.
- Gerace, Michael Joseph, Yasminka Landaburu, & Timothy P. Klosterman. 2002. 'Roof Sealant Composition and Method of Applying'.
- Global Wind Energy Council. (2022). *Global Wind Report 2022*.
- Gómez, Amador, Alejandro Martínez, Nazario Martín León, & Antonio Páez Dueñas. (2003). 'Betunes asfálticos: materiales muy utilizados y poco conocidos químicamente'. *Anales de Química de la RSEQ* (4):43–52.
- Goodrich, J. L., J. E. Goodrich, & W. J. Kari. (1986). 'ASPHALT COMPOSITION TESTS: THEIR APPLICATION AND RELATION TO FIELD PERFORMANCE'. in *Transportation Research Record*.
- Guo, Jiuyong, Jie Guo, Shifeng Wang, & Zhenming Xu. (2009). 'Asphalt Modified with Nonmetals Separated from Pulverized Waste Printed Circuit Boards'. *Environmental Science & Technology* 43:503–8. doi: 10.1021/es8023012.
- Jiang, Rui, & Peng Wu. (2019). 'Estimation of Environmental Impacts of Roads through Life Cycle Assessment: A Critical Review and Future Directions'. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 77:148–63. doi: 10.1016/j.trd.2019.10.010.
- Juárez Leiva, Bryan Alfonso. (2018). 'Caracterización de bitúmenes asfálticos vírgenes y modificados, utilizando la técnica de espectroscopía infrarroja con transformada de fourier (FTIR).'
- Liu, Zewei, Yusen Yan, Tianfeng Lv, Zechun Huang, Tingting Liu, Qifei Huang, Jinzhong Yang, Yu Chen, Youcai Zhao, & Tao Zhou. (2022). 'Comprehensive Understanding the Emission Characteristics and Kinetics of VOCs from Automotive Waste Paint Sludge in a Environmental Test Chamber'. *Journal of Hazardous Materials* 429:128387. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128387.
- Louis, Daniel M. St. (1996). 'Process for Producing Building Materials from Paint Sludge'.
- Nakouzi, S., D. Mielewski, J. C. Ball, B. R. Kim, I. T. Salemeen, D. Bauer, & C. K. Narula. (1998). 'A Novel Approach to Paint Sludge Recycling: Reclaiming of Paint Sludge Components as Ceramic Composites and Their Applications in Reinforcement of

- Metals and Polymers',. *Journal of Materials Research* 13(1):53–60. doi: 10.1557/JMR.1998.0008.
- Observatorio sectorial DBK. (2021). Estudio Sectores: Pinturas y Barnices. 200701.
- Ozoemena, Matthew, Wai M. Cheung, and Reaz Hasan. (2018). 'Comparative LCA of Technology Improvement Opportunities for a 1.5-MW Wind Turbine in the Context of an Onshore Wind Farm'. *Clean Technologies and Environmental Policy* 20(1):173–90. doi: 10.1007/s10098-017-1466-2.
- Poulikakos, L. D., C. Papadaskalopoulou, B. Hofko, F. Gschösser, A. Cannone Falchetto, M. Bueno, M. Arraigada, J. Sousa, R. Ruiz, C. Petit, M. Loizidou, & M. N. Partl. (2017). 'Harvesting the Unexplored Potential of European Waste Materials for Road Construction'. *Resources, Conservation and Recycling* 116:32–44. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.008.
- Rahman, Md Nobinur, Mohammad Ahmeduzzaman, M. A. Sobhan, & T. U. Ahmed. (2013). 'Performance Evaluation of Waste Polyethylene and PVC on Hot Asphalt Mixtures'. *American Journal of Civil Engineering and Architecture* 1(5):97–102. doi: 10.12691/ajcea-1-5-2.
- Riviera, Pier, Barbara Ruffino, Davide Dalmazzo, Ezio Santagata, & Maria Zanetti. (2012). 'Preliminary Performance Assessment of Asphalt Concrete with Paint Sludge from Automotive Industries'.
- Ruffino, Barbara, Davide Dalmazzo, Ezio Santagata, & Maria Zanetti. (2011). 'Preliminary Evaluation of the Potential Use of Paint Sludge in Bituminous Binders'. Proceedings Sardinia. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy: *CISA Publisher*.
- Ruffino, Barbara, Angela Farina, Davide Dalmazzo, Gianandrea Blengini, Mariachiara Zanetti, & Ezio Santagata. (2021). 'Cost Analysis and Environmental Assessment of Recycling Paint Sludge in Asphalt Pavements'. *Environmental Science and Pollution Research* 28(19):24628–38. doi: 10.1007/s11356-020-10037-2.
- Tian, Yongqiang, Liming Chen, Lihong Gao, Frederick C. Michel, Harold M. Keener, Michael Klingman, & Warren A. Dick. (2012). 'Composting of Waste Paint Sludge Containing Melamine Resin and the Compost's Effect on Vegetable Growth and Soil Water Quality'. *Journal of Hazardous Materials* 243:28–36. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.09.013.
- Wind Europe. 2021. Wind Energy in Europe. (2021) Statistics and the Outlook for 2022-26.
- Yu, Jianying, Peiliang Cong, & Shaopeng Wu. (2009). 'Laboratory Investigation of the Properties of Asphalt Modified with Epoxy Resin'. *Journal of Applied Polymer Science* 113(6):3557–63. doi: 10.1002/app.30324.
- Zanetti, Maria Chiara, Barbara Ruffino, Arianna Vercelli, Davide Dalmazzo, & Ezio Santagata. (2018). 'Reuse of Paint Sludge in Road Pavements: Technological and Environmental Issues'. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 36(11):1023–28. doi: 10.1177/0734242X18804628.