

**Reciclaje de residuos industriales como una alternativa sostenible para las mezclas
asfálticas**

Autor

John Sebastián Mora Álvarez

ID: 318510

Proyecto de grado presentado para optar al título de:
INGENIERO CIVIL

Director

Norma Cristina Soltarte Vanegas

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

**Reciclaje de Residuos Industriales como una alternativa sostenible para las Mezclas
Asfálticas**

Autor

John Sebastián Mora Álvarez

ID: 318510

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

Tabla de contenido

Introducción	10
1 Planteamiento del Problema	11
2 Antecedentes.....	12
3 Objetivos.....	15
3.1 Objetivo General	15
3.2 Objetivos Específicos	15
4 Marco Referencial	16
4.1 Marco Teórico	16
4.1.1 Material Asfáltico.....	16
4.1.2 Mezclas Asfálticas.....	16
4.1.3 Residuos Industriales.....	17
4.2 Marco Legal Vigente.....	20
5 Metodología.....	21
5.1 Alcance de la Investigación.....	21
5.2 Diseño de la investigación.....	21
5.3 Población.....	22
5.3.1 Tamaño de la Población	22
5.3.2 Muestra	22
5.4 Métodos.....	22

5.4.1	Planificación	23
5.4.2	Búsqueda de la Información	24
5.4.3	Organización de la Información	25
5.4.4	Análisis de la información.....	25
6	Identificación de las Prácticas Nacionales e Internacionales para el manejo y usos de residuos industriales en la elaboración de mezclas asfálticas: Revisión Sistemática	26
6.1	Realización de la revisión	26
6.2	Análisis e Interpretación de Datos	28
6.2.1	Prácticas Internacionales	28
6.2.2	Prácticas Nacionales	32
6.3	Tendencias de Uso de Materiales Reciclados En mezclas Asfálticas a Nivel Mundial	33
7	Caracterización	36
7.1	Asfalto Caliente.....	36
7.1.1	Prácticas de Incorporación de Material Reciclado (MR)	39
7.2	Asfalto Espumado	42
7.2.1	Prácticas de Incorporación de Material Reciclado	43
7.3	Asfalto Masilla de Piedra	43
7.3.1	Prácticas de Incorporación de Material Reciclado	45
7.4	Hormigón Asfáltico.....	45

7.4.1	Prácticas de Incorporación de Material Reciclado	47
7.5	Asfalto Frio Y Templado	48
7.5.1	Prácticas de Incorporación de Material Reciclado	50
7.6	Asfalto Poroso	50
7.6.1	Prácticas de Incorporación de Material Reciclado	52
8	Materiales más Comunes a Ser Reciclados en Mezclas Asfálticas	53
8.1	Residuos industriales reciclados a través de la elaboración de mezclas asfálticas	
	53	
8.2	Idoneidad de los Materiales en el Uso en Mezclas Asfáltica	54
8.2.1	Neumáticos Reciclados	55
8.2.2	Desecho de construcción y demolición_ Concreto reciclado (RCA)	55
8.2.3	Pavimento asfáltico recuperado (RAP)	56
8.2.4	El polvo de los hornos de arco eléctrico (EAFD).....	56
8.2.5	Escoria de Cobre y de acero	57
9	Conclusiones.....	60
	Bibliografía	62
	Anexos	¡Error! Marcador no definido.

Lista de Tablas

Tabla 1. Ecuación de Búsqueda	25
Tabla 2 Hoja de vida práctica y herramientas	27
<i>Tabla 3.</i> Compilación de Documentos Analizados.....	28
Tabla 4. Caracterización de residuos usados para Asfalto Caliente.....	37
Tabla 5. Diseño de las Mezclas Asfálticas Calientes Con MR.....	39
Tabla 6. Caracterización de residuos usados para Asfalto Espumado	42
Tabla 7. Diseño de las Mezclas Asfálticas Espumadas Con MR.....	43
Tabla 8. Caracterización de residuos usados para Asfalto de Masilla de Piedra	44
Tabla 9. Diseño de las Mezclas Asfálticas de Masilla de Piedra Con MR	45
Tabla 10. Caracterización de residuos usados para Hormigón Asfáltico.....	46
Tabla 11. Diseño de las Mezclas de Hormigón Asfáltico Con MR	47
Tabla 12. Caracterización de residuos usados para Asfaltó Frio y Templado	49
Tabla 13. Diseño de las Mezclas de Mezclas Asfálticas Frías y Templadas Con ...	50
Tabla 14. Caracterización de residuos usados para Asfaltó Poroso.....	51
Tabla 15. Diseño de las Mezclas de Asfalto Poroso Con MR	52
Tabla 16. Materiales Reciclables Más Usados en Mezclas Asfálticas.....	53

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Tendencia de publicaciones por año	34
Ilustración 2. Distribución geográfica.....	35

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: Reciclaje de Residuos Industriales como una alternativa sostenible para las mezclas asfálticas

AUTOR(ES): John Sebastián Mora

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Norma Cristina Soltarte Vanegas

RESUMEN

Esta investigación busca mediante de una revisión bibliográfica conocer las diferentes prácticas desarrolladas a nivel mundial del reusó y reciclaje de desechos industriales que poseen grandes potenciales y que pueden ser utilizados en el desarrollo de mezclas asfálticas. Para esto se realizó el análisis de 41 artículos científicos que arrojaron información relevante para la investigación, en ellos se evidenciaron prácticas y resultados positivos de desarrollo de pavimentos basados en el reciclaje de residuos para seis diferentes tipos de asfalto, así como las características y propiedades de estos desechos dentro de las mezclas. A través del desarrollo de esta investigación se pudo concluir que el uso de diversos desechos en mezclas asfálticas es una opción viable no solo ambientalmente sino también económica y de mejora, es por esto que debe ser más estudiada y aplicada, en pro de una infraestructura vial sostenible. El uso de neumáticos y pavimentos recuperados son los materiales más usados a nivel mundial, y brindan características beneficiosas a las diferentes mezclas en las cuales pueden ser empleados

PALABRAS CLAVE:

Mezclas Asfálticas, Residuos Industriales, Practicas, Reciclaje

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Recycling of industrial waste as a sustainable alternative to asphalt mixtures

AUTHOR(S): John Sebastián Mora

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Norma Cristina Soltarte Vanegas

ABSTRACT

This research seeks through a literature review to know the different practices developed worldwide for the reuse and recycling of industrial wastes that have great potential and can be used in the development of asphalt mixtures. For this purpose, an analysis of 41 scientific articles that yielded relevant information for the research was carried out, in which practices and positive results of pavement development based on the recycling of waste for six different types of asphalt were evidenced, as well as the characteristics and properties of these wastes within the mixtures. Through the development of this research, it was possible to conclude that the use of diverse wastes in asphalt mixtures is a viable option not only environmentally but also economically and for improvement, which is why it should be further studied and applied, in favor of a sustainable road infrastructure. The use of recovered tires and pavements are the most widely used materials worldwide and provide beneficial characteristics to the different mixtures in which they can be used.

KEYWORDS:

Asphalt mixes, industrial wastes, practices, recycling.

Introducción

A nivel Europa se estima que el 16% de las cantidades de residuos disponibles se podrían ser reciclados para la fabricación de carreteras (Poulikakos et al., 2017). Es por esto que en búsqueda de generar estrategias sostenibles en el ámbito de la ingeniería civil y más enfocado en la construcción de infraestructuras de transporte se desarrolló esta investigación, la cual tiene por objetivo principal el de realizar una compilación de experiencias nacionales e internacionales mediante una revisión bibliográfica del manejo de residuos industriales reciclados a través de la elaboración de mezclas asfálticas.

En primera instancia para la implementación de la revisión bibliográfica se definieron unas bases de datos, las cuales arrojaron alrededor de 296 documentos científicos, y de los cuales luego de un análisis inicial de contenido se excluyeron 252 que no tenían la relevancia para la investigación. Posterior al análisis inicial y ya con la muestra definida se procedió a caracterizar las diferentes prácticas, residuos y sus características, dividiéndolas en seis tipos diferentes de mezclas asfálticas halladas en la investigación y a las cuales se les han realizado modificaciones o agregados de los diferentes residuos reciclados.

Finalmente, para dar respuesta al último objetivo de la investigación se hizo una clasificación de los materiales reciclados más usados dentro de las mezclas asfálticas y la idoneidad de su uso y los beneficios que aporta la implementación de esta mezcla en los pavimentos a nivel mundial.

1 Planteamiento del Problema

Los residuos industriales en la actualidad representan un problema que involucra a toda la sociedad, pero de una manera directa a las autoridades ya que estas son las encargadas de regular y mitigar los impactos que estos residuos traen consigo, uno de los objetivos debe ser reciclarlos y reutilizarlos con el fin de contribuir en el cuidado del ambiente y la contribución a la salud pública. Según el DANE para el año 2016, la generación de residuos sólidos producto de las actividades económicas ascendió a 11,5 millones de toneladas y para ese mismo año todos aquellos residuos sin tratamiento adecuado; ascendieron a 268.328 toneladas.

La Ingeniería Civil no es ajena a esta problemática ya que su campo de acción es muy amplio y se puede dividir en diferentes áreas. La infraestructura vial es una de estas áreas y los proyectos que se llevan a cabo en esta área en todas sus etapas y su funcionamiento, hacen parte fundamental del desarrollo económico del país, ya que gracias a este se aporta toda la estructura de transporte de bienes y pasajeros y la comunicación a nivel nacional e internacional, lo que es la base de la economía. A pesar de lo antes descrito, la inversión económica que esta actividad requiere hace estructurar y crear estrategias que tengan como propósito generar valor y que la preocupación principal de los encargados de planificar y ejecutar este tipo de proyectos se centre en la reducción de costos y la poca probabilidad de incurrir en pérdidas, y en la mayoría de las veces dejan de lado otros factores tales como el análisis de riesgos ambientales y sociales.

2 Antecedentes

La acumulación de residuos desde sus inicios ha sido una problemática social y cultural y es de vital importancia la transformación de los hábitos de aprovechamiento de los residuos sólidos que genera toda la industria ya que dichos residuos conllevan a la generación de miles de afectaciones tanto hacia el ser humano como así el medio ambiente (Minambiente, 2018). Es por esto que se busca la implementación y transformación de estos materiales en las mezclas asfálticas y así poder entre muchos beneficios, el de reducir costos y contribuir en la mitigación del daño medioambiental generado por la industria.

Como base para esta investigación se parte del análisis de cinco estudios previos en los cuales se constatan casos y métodos utilizados como marco de referencia en la implementación y usos de algunos residuos en mezclas asfálticas; a continuación se realizará una breve exposición de cada uno de ellos:

Acosta, Zapata, Rodríguez, & Schroeder en el año 2018 realizaron un estudio en México de las propiedades, usos y beneficios obtenidos del aprovechamiento de los residuos de los diversos sectores manufactureros, en el cual establecieron que estos permiten reducir la demanda acelerada de los recursos naturales y mantener la capacidad de producción para satisfacer las necesidades de la población y las industrias. Destacaron varias opciones que se han usado para la revalorización de estos residuos como materia prima en la elaboración de mezclas asfálticas. Y como los residuos que se generan en grandes volúmenes (llantas, plásticos, concretos y pavimentos envejecidos), son reciclados para elaborar este tipo de producto empleado en el mantenimiento y construcción de carreteras.

El segundo estudio se desarrolló en Ecuador en el año 2019 y hace énfasis en el uso de residuos provenientes de la industria automovilística y lo que puede ser reciclado para la

elaboración de mezclas asfálticas, su autor Navarrete Schettini tuvo como propósito en su investigación el diseño de mezclas asfálticas con la integración de residuos sólidos de neumáticos de desecho (elastómero) y pavimento asfáltico. En este estudio se tuvo como resultado que las granulometrías media y fina, en el diseño de mezclas asfálticas con pavimento asfáltico envejecido, contribuyen al buen comportamiento con la reutilización del elastómero y el pavimento de asfalto, y que este material se puede utilizar en el nivel de campo en mezclas de asfalto.

En Bolivia en el año 2014, Torres, Flores, Flores, Flores, & Mairon realizaron un artículo con el cual buscaban comprobar la posibilidad de elaborar una mezcla asfáltica con material de los residuos de construcción y demolición, y que fuera susceptible de ser empleada en la reparación o bacheo de pavimentos. En este estudio los resultados hallados en cuanto al comportamiento mecánico de estas mezclas se encontraron dentro de los rangos aceptados por norma y para la parte económica se efectuó un análisis de costos por metro cúbico de muestra reciclada que reveló un ahorro del 14% en relación a una mezcla tradicional a costo directo.

Colombia no ha sido ajena a estos estudios y por ende en el año 2009 en la Universidad EAFIT, los estudiantes Diana Metaute y Daniel Casas realizaron el proyecto desarrollo de una Mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos, donde el objetivo principal era el de la formulación de una mezcla modificada con las computadoras residuales de plástico y similares, investigando el efecto de la dosis de polímero incrustada en la mezcla de asfalto y en el método de incorporación del polímero en las propiedades mecánicas de interés.. Este proyecto se ejecutó en la ciudad de Medellín y tuvo como resultados que de acuerdo con los puntos de fusión de los polímeros y la viabilidad del proceso, el mejor método para incorporar el material de polímero a la mezcla de asfalto se encuentra en el contexto de los agregados y que al analizar los pasos de

proceso necesarios en la producción de mezclas modificadas de asfalto. La mezcla no constituye un obstáculo técnico para su implementación, debido a la existente tecnología disponible en apoyo con relativas facilidad

Para el año 2019 en la Universidad Nacional se realizó un estudio realizado por D. Torres, Mosquera, Torres, Gallego, & Alvarez y el objetivo era el de llevar a cabo un estudio preparatorio de la viabilidad técnica y ambiental de la aplicación de una escoria de fundición de plomo secundario en mezclas de asfalto, con el propósito de beneficiar y agregar valor a ese residuo. Mediante una metodología específica que incluía el desarrollo de ensayos técnicos, se pudo establecer que la escoria secundaria de plomo tiene potencial para ser utilizada en mezclas asfálticas, cumpliendo con los estándares límites de toxicidad.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

- ✓ Realizar una compilación de experiencias nacionales e internacionales mediante una revisión bibliográfica del manejo de residuos industriales reciclados a través de la elaboración de mezclas asfálticas

3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Identificar las prácticas nacionales e internacionales utilizadas para el manejo y usos de residuos industriales en la elaboración de mezclas asfálticas por medio de una búsqueda sistematizada de la literatura científica.
- ✓ Recopilar la Caracterización de los diferentes materiales reciclados de acuerdo con el tipo de residuo y la actividad económica que lo produce, a partir de un análisis de contenido de la revisión de la literatura.
- ✓ Escoger de acuerdo a la recopilación los materiales más comunes a ser reciclados, los casos de éxito y la idoneidad de estos en el uso en mezclas asfáltica

4 Marco Referencial

4.1 Marco Teórico

4.1.1 Material Asfáltico

Es un mineral derivado de varios componentes, casi todos naturales. Este material es líquido, viscoso, negro u gris oscuro. Está compuesto por hidrocarburos y derivados. Además, es un material comúnmente llamado asfalto y se compone de una serie de fases orgánicas de alto peso molecular, que dan propiedades de la viscosidad, la impermeabilidad, la adhesión, el color y la estabilidad química. Su consistencia depende de la temperatura. Respecto a la duración, sus propiedades se mantienen a pesar del tiempo y de los efectos de los elementos de envejecimiento (Metatute & Orozco, 2009). Entre las fases orgánicas se encuentran:

- **Asfáltenos:** Que constituyen del 5 al 25% del asfalto. Es la fase pesada del asfalto, compuesto principalmente de sólidos negros y amorfos que contienen, además del carbono y el hidrógeno, el nitrógeno, el azufre y el oxígeno. Esta fase son compuestos aromáticos muy polares con pesos moleculares que van desde 4000 g/mol a 7000 g/mol.
- **Maltenos:** Fase ligera del asfalto, con pesos moleculares de 700 g/mol a 4000 g/mol. Se puede decir que esta fase los diluye, que se presenta en forma de micelas o adiciones de coloides separadas. Estos se dividen en: resinas, cíclicas y saturadas. (Metatute & Orozco, 2009).

4.1.2 Mezclas Asfálticas

Son una combinación de agregados minerales (grava y arena), aglomerados mediante un ligante asfáltico (asfáltenos), las cuales son usadas en la elaboración de pavimentos en su

mayoría en las zonas urbanas, que deben cumplir con características particulares que garanticen su durabilidad y manejabilidad (Acosta et al., 2018).

4.1.2.1 *Elaboración de mezclas asfálticas*

Existen dos procesos para la elaboración de mezclas asfálticas estos son: frío y caliente; este último permite la integración de residuos, en donde los compuestos se mezclan y se secan antes de ser calentados a una temperatura de 150 °C, luego se añade el ligante (asfalto) a la mezcla en proporciones que oscilan de 5 a 10 % en peso con la técnica de preparación en continuo en un tambor rotativo o de forma intermitente (Acosta et al., 2018)

4.1.3 Residuos Industriales

Todos son derivados de los procesos de producción, la conversión, el uso, el consumo, la limpieza o el mantenimiento generados por la actividad industrial , el material final del concepto de ciclo principal de un producto o ciclo de explotación de algún material(Leonardo, 2018).

El tipo y la cantidad de residuos que se reciclan para la construcción están relacionados con la producción local y el tipo de industria en el país. Asimismo, estos materiales se utilizan generalmente de acuerdo con la proximidad de los sitios de producción y rara vez se transportan distancias largas debido al alto costo de transportarlas en comparación con el valor inherente del material (López, 2014).. Se pueden clasificar en una primera categoría por el proceso que los genera en:

Residuos provenientes de procesos termales

Residuos provenientes de trabajos de demolición

Residuos provenientes de otras fuentes

4.1.3.1 Residuos utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas

Para establecer si un residuo es apto para ser reciclado en el proceso de elaboración de una mezcla asfáltica, deben tomarse en cuenta algunas consideraciones de ingeniería tales como estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos, gravedad específica, así como también las ambientales y económicas (Acosta et al., 2018). Entre los diferentes tipos de residuos que pueden ser considerados para su reutilización en las carreteras y autopistas están:

- **Residuos de demolición y construcción (RDC).** Este tipo de materiales son habituales en la mayoría de los países para su reutilización y reciclaje. Este tipo de materiales se utilizan principalmente sin tratamiento previo, pero es necesario determinar sus propiedades para obtener información sobre su comportamiento, ya que se constituye de diferentes componentes (ladrillo, madera, concreto, etc.) (López, 2014)
- **Llantas.** La incorporación del el caucho recuperado pueden proporcionar ciertas propiedades deseables a las carpetas de asfalto y concreto, lo que lo hace factible para esta práctica, específicamente para carreteras con delimitaciones de tránsito bajas u obras de acompañamiento como capas de nivelación, paredes de acera, entre los demás. El objetivo principal de incorporar estos residuos es reducir la contaminación que esto produce (López, 2014)
- **Cenizas volátiles.** Se generan a partir de la pulverización de los residuos de combustión en las plantas, son partículas sólidas silícicas que se llevan hacia la superficie por los gases de combustión y se recogen en dispositivos de control de emisiones en la atmósfera (López, 2014)

- **Cenizas del fondo de horno.** Las partículas de los incineradores en los que las plantas de combustión se utilizan generalmente como un método de eliminación de sólidos municipales (RSM) y se encuentran en la parte inferior de los hornos. Significa que no son cenizas consistentes en material de combustión, que son materiales inertes, tales como metales, cenizas volátiles que se arrastraron al fondo y el concreto. Tan pronto como se eliminan los materiales metálicos, las cenizas de la parte inferior del horno de combustión se consideran material apropiado, que se reutiliza en la construcción de carreteras. (López, 2014)
- **Escorias de fundición.** Estas son las partículas generadas al mismo tiempo que la oxigenación básica en los hornos para la fabricación de acero (OECD, 1997). Estas partículas son duras, densas y resistentes a la abrasión.
- **Plásticos.** Estos residuos son otra alternativa para la industria de la pavimentación debido a que compactación de estas mezclas han mostrado una buena adhesión, igualmente con un mayor porcentaje de este residuo, aumentó la resistencia. Lo anterior permite reducir la demanda de betún en un 10 % y reducir los costos de elaboración de pavimentos (Acosta et al., 2018)
- **Pavimento asfáltico envejecido.** Para ser utilizado se retiran las capas del pavimento mediante fresado o demolición, posteriormente es transportado a la planta, acopiado, caracterizado, procesado, y finalmente mezclado en caliente con áridos vírgenes, betún nuevo y agentes rejuvenecedores (Cardona & López, n.d.) Esta mezcla mayormente es empleada para la rehabilitación del mismo sitio.
- **Aceite de motor usado.** Estas mezclas mostraron mejor sensibilidad al agua, mayor resistencia y durabilidad que las mezclas sin aditivos, siendo factible su uso

principalmente por su bajo costo en el mercado. Sirve como aditivo para elaboración mezclas asfálticas, con el propósito de rejuvenecer el ligante envejecido, y para estabilizarlo utilizaron 4 % de polietileno de alta densidad.

(Acosta et al., 2018)

4.2 Marco Legal Vigente

Todo lo relacionado con la construcción de infraestructura vial está normalizado por el INVÍAS en Colombia.

Artículo 450-07 del documento técnico: “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras”, la cual reglamenta las especificaciones de mezclas asfálticas en caliente (concreto asfáltico y mezcla de alto módulo)

5 Metodología

5.1 Alcance de la Investigación

La investigación tiene un alcance Exploratorio Descriptivo, ya que busca observar, analizar y documentar una compilación de experiencias nacionales e internacionales del manejo de residuos industriales reciclados a través de la elaboración de mezclas asfálticas, sus características y la idoneidad de su uso. En el desarrollo del proyecto se llevarán a cabo en tres fases: Análisis y Documentación.

Fase 1 Análisis: Se revisarán y organizarán los aspectos relevantes acerca de la Caracterización de los diferentes materiales reciclados de acuerdo al tipo de residuo y la actividad económica que lo produce, con base en los artículos seleccionados por criterios de calidad.

Fase 2 Documentación: Todo el proceso de observación y análisis se documentará para efectos de conocer y exponer los materiales más comunes a ser reciclados, los casos de éxito y la idoneidad de estos en el uso en mezclas asfáltica

5.2 Diseño de la investigación

Debido a que en el presente estudio se busca obtener información importante acerca de las prácticas utilizadas para el manejo y usos de residuos industriales en la elaboración de mezclas asfálticas, no se harán proposiciones debido a que la investigación tiene un diseño de tipo exploratorio.

5.3 Población

5.3.1 Tamaño de la Población

Dentro del marco del proyecto y el desarrollo investigativo, se tomara de la base datos SCOPUS los artículos relevantes al tema de investigación; los cuales serán identificados mediante una ecuación de búsqueda donde se incluyen todos los criterios de estudio mediante este proceso se obtendrá una cantidad de artículos, los cuales a continuación serán evaluados excluyendo los de poco aporte o temas no significativos y/o relevantes este proceso se realizara a descarte sin ningún método estadístico.

5.3.2 Muestra

La muestra de la base de datos SCUPUS se tomará como un muestreo no probabilístico ya que la definición de esta técnica de muestreo se fundamenta en que tan conveniente, accesible y próximo son los datos para el investigador (Otzen & Manterola, 2017). Para esta investigación se utilizó este tipo de muestreo por conveniencia ya que se tendrán en cuenta solo los artículos de mayor influencia, relevancia y aporte real del estudio los cuales serán definidos por una cantidad de parámetros claves del estudio.

5.4 Métodos

La metodología de revisión bibliográfica se compone de tres pasos: i). Planificación ii). Búsqueda de la información iii). Organización de la Información y iv). Análisis de la información.

5.4.1 Planificación

A continuación, se establecen los métodos, donde se incluyen los términos clave a utilizar en la ecuación de búsqueda, los criterios de inclusión y exclusión, los criterios de calidad, y las clases de estudios a evaluar.

5.4.1.1 *Términos Clave*

Las palabras claves utilizadas en la ecuación de búsqueda en las bases de datos SCOPUS son las relacionadas con:

- Mezclas Asfálticas: Mixture asphalt, Mix asphalt, Blending asphalt, Intermixture asphalt
- Residuos Industriales: industrial waste, manufacturer waste
- Practicas: practice, practicing, activity, process, tool, project, procedure, practical application, application, method, technique
- Reciclaje: recycling, recycling waste

5.4.1.2 *Criterios de inclusión*

Los criterios de inclusión de la revisión Bibliográfica son:

- **Campos de búsqueda:** Título, resumen y palabras claves, hablen de Mezclas Asfálticas
- **Periodo de la revisión sistemática:** Todos los artículos de diez años atrás, es decir, desde el año 2010 hasta el año 2020.
- **Idiomas:** Inglés y español.
- **Tipos de documentos:** Artículos y Tesis.

5.4.1.3 *Criterios de exclusión*

Los criterios de exclusión de la revisión sistemática son:

- El documento expresa que la práctica y/o los materiales usados tuvo un impacto negativo en el resultado obtenido de la mezcla asfáltica.
- Aquellos documentos que no hagan referencia a evidencias en los estudios realizados acerca del tema de análisis.
- No se tienen en cuenta estudios teóricos y/o revisiones sistemáticas o de literatura

5.4.1.4 Criterios de calidad

Los artículos analizados cumplen como mínimo con los siguientes criterios:

- Los artículos comprendidos entre los años 2010 al 2020, deben haber sido citados al menos una vez.
- Solo comprende áreas de: Engineering (Ingeniería), Economy (Economía) y Social Sciences (Ciencias sociales), pues estos son los campos de acción que generan mayor impacto en el desarrollo del proyecto.

5.4.2 Búsqueda de la Información

Una búsqueda bibliográfica debe estar hecha de puntos de vista estructurados y profesionales para definir el dominio de la investigación, se deben hacer uso ecuaciones de búsqueda que incluyan criterios clave del tema a investigar, además, se deben estudiar los patrones semánticos y de citación e identificar en primera la estructura cognitiva determinando las principales líneas de investigación desarrolladas en el mundo para el estudio del tema. (Gómez et al., 2014). De acuerdo con lo antes descrito y los criterios definidos en la de planeación, se procede con la construcción de la ecuación para hacer la búsqueda electrónica de artículos científicos. (Ver Tabla 1) A continuación se realiza la búsqueda, en las bases de datos Scopus. Para realizar la respectiva investigación de la literatura, de la ecuación de búsqueda, ingresándola en el sistema de búsqueda en una fecha específica, esto con el propósito de tener un

mejor control en el número de artículos que se puedan encontrar. Para realizar la selección de los artículos que se van a tomar como base para esta investigación, se aplican los criterios de calidad mencionados anteriormente.

Tabla 1
Ecuación de Búsqueda

TITLE	Mixture asphalt, Mix asphalt OR Blending asphalt OR Intermixture asphalt
AND	industrial waste OR manufacturer waste
AND	Practice OR practicing OR activity OR process OR tool OR project, procedure OR practical OR application OR application OR method OR technique
AND	recycling OR recycling waste OR recycle

Nota: Elaboración Propia

5.4.3 Organización de la Información

Consiste en organizar de manera sistemática y ordenada la documentación encontrada. Se realiza de manera específica. La información es ordenada en una plantilla de Excel y con apoyo del software Mendely el cual permite organizar fácilmente la información por título, autor, revista y aporte y en este caso se organizaran por categorías los documentos seleccionados.

5.4.4 Análisis de la información

Inicialmente se realiza un análisis para determinar los criterios de inclusión o exclusión propuestos, donde se hizo una lectura detallada del título, resumen y palabras clave. Posterior al análisis inicial, con la muestra final ya establecida, se procede a extraer la información relevante en una plantilla de análisis de datos elaborada con el software Excel, para así realizar la observación de contenido con el fin de detectar los datos de interés de los artículos directamente relacionados con las ideas más importantes y los aspectos relevantes para el problema del

estudio. Además, se realiza un análisis cuantitativo en el que se estudian aspectos como el número de documentos por año, documentos, citas de autor, documentos e investigaciones realizadas por país.

6 Identificación de las Prácticas Nacionales e Internacionales para el manejo y usos de residuos industriales en la elaboración de mezclas asfálticas: Revisión Sistemática

6.1 Realización de la revisión

Teniendo en cuenta los términos clave se efectúa la construcción de la ecuación para hacer la búsqueda electrónica de artículos científicos (Ver Anexo 1. Ecuación de Búsqueda).

Posteriormente se lleva a cabo la búsqueda, en la cual se identifican y seleccionan los estudios de acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión establecidos. Se documenta las razones de dichas decisiones en un archivo de Excel el cual incluye el análisis de cada documento. Ya teniendo el número total de documentos seleccionados se les realiza la evaluación de calidad en la cual se determina la validez del estudio. Finalmente, luego de aplicar todos estos filtros a los documentos se realiza una síntesis de datos utilizando una ficha u hoja de vida diligenciada en Excel para cada experiencia o práctica hallada y sus herramientas (Ver Tabla 2); con el fin de obtener la misma cantidad de información para cada una de ellas.

Tabla 2
Hoja de vida práctica y herramientas

Requisitos	Descripción
Autor	
Título	
Año	
Relevancia para la investigación	
País	
Método de investigación	
Teoría y conceptos	
Palabras clave	
¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	
¿Qué práctica desarrolló para la implementación?	
¿Qué actividad económica Produjo este residuo?	
¿Cuál es el método de integración de estos residuos en las mezclas asfálticas?	
¿Cómo se evidenció la idoneidad de este material utilizado en las mezclas asfálticas producidas a partir de él?	

Resultados

Nota: Elaboración Propia

6.2 Análisis e Interpretación de Datos

Al realizar el proceso de búsqueda de artículos en la base de datos Scopus, se obtienen un total de 296 artículos, a los cuales se les realiza una valoración y se filtran de acuerdo con los criterios de inclusión y criterios de calidad que se han establecido, de este filtro inicial resultan 76 documentos; de igual forma al realizar la búsqueda y descarga de los artículos para ser analizados, no se encontraron disponibles 15 artículos. Finalmente, al realizar el análisis de contenido se excluyeron 20 documentos, los cuales no mostraron referencia a información y/o evidencias en los estudios realizados acerca del tema de análisis; la investigación se desarrolló con un total de 41 artículos finales.

En la Tabla 3 se muestra la compilación de los 37 documentos analizados para la identificación de las diversas prácticas desarrolladas a nivel mundial para el reciclaje de residuos industriales en mezclas asfálticas y en la Tabla 4 se presentan 4 documentos analizados en el ámbito nacional en este mismo tema.

6.2.1 Prácticas Internacionales

En la Tabla 3, se muestra la compilación de prácticas internacionales identificados

Tabla 3
Compilación de Documentos Internacionales Analizados

Autor	Año	País	Practica Identificada
(Arulrajah., Piratheepan , Disfani, y Bo, 2013)	2013	India	En términos de uso en subbase de pavimentos, Se encontró que RCA y WR tienen propiedades de ingeniería geotécnica equivalentes o superiores a las de los materiales de subbase granulares de cantera típicos

(Yazoghli, Vulcano, Cantegrit, Friteyre y Jullien, 2014)	2014	Francia	Este artículo presenta el análisis químico de este subproducto, la formulación de un material de sub-grado y su comportamiento de lixiviación evaluado mediante el monitoreo del sitio experimental. Esta investigación demuestra que esta arena de fundición se puede utilizar en capas de carreteras como materiales de carreteras.
(Chen , Xiao, Putman, Leng y Wu, 2014)	2014	Irán	Investigar las propiedades reológicas a altas temperaturas del aglutinante de asfalto envejecido rejuvenecedor con aceites rejuvenecedores, residuos de cocina y aceites de semillas de algodón.
(Lusher y Richardson, 2015)	2015	Estados Unidos	El objetivo del estudio fue determinar la viabilidad de utilizar materiales a base de guayule como agentes de reciclaje en HMA con altos contenidos de RAP y / o RAS. De los muchos materiales a base de guayule investigados, un extraíble con acetona,
(Behnood et al., 2015)	2015	Irán	Investigar la viabilidad del uso de escoria de cobre y agregado de hormigón reciclado (RCA) como sustitutos de los agregados vírgenes en la modificación de la gradación de mezclas recicladas en frío elaboradas con material RAP
(Hoy, Horpibulsuk y Arulrajah, 2016)	2016	Tailandia	Este artículo investiga el desarrollo de la resistencia del geopolímero de pavimento asfáltico reciclado (RAP) -Fly Ash (FA) como material de construcción de carreteras
(Xu, Xiao, Han , Amirkhanian y Wang, 2016)	2016	China	Analizar las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos modificados en función de los efectos del tipo de ligante base y otros cinco polímeros o ácidos combinados con una dosificación de caucho de neumáticos triturado (GTR) al 7% a alta temperatura.
(Oluwasola & Hainin, 2016)	2016	Malasia	Evaluar las características de desempeño de SMA incorporando escoria de acero de horno de arco eléctrico (EAF) y relaves de mina de cobre (CMT).
Autor	Año	País	Practica Identificada
(Al-Hdabi, 2016)	2016	Irak	Investigar el uso de Rice Husk Ash (RHA) en lugar del relleno mineral convencional en mezclas de asfalto caliente.
(Skaf, Ortega, Fuente-, Santamaría, & Manso, 2016)	2016	España	El objetivo de este artículo es demostrar la idoneidad de la escoria de horno de cuchara (LFS) en sustitución de agregado fino para su uso en la fabricación de mezclas bituminosas porosas.

(Fatemi & Imaninasab, 2016)	2016	Irán	En este estudio, se evaluó el efecto de la utilización de materiales de desecho C&D en la resistencia a la rodadura y la susceptibilidad a la humedad en mezclas asfálticas
(Sangiorgi, Tataranni, Simone, Vignali, Lantieri y Dondi, 2016)	2016	Italia	Evaluar el desempeño de la Arcillas blanqueadoras AF, en términos de características físicas y mecánicas, en comparación con la asfalto poroso (PA) tradicional.
(Sienkiewicz, Borzędowska, Zalewski y Janik, 2017)	2017	Polonia	Efecto del método de pulido de caucho de neumáticos sobre las propiedades del aglutinante caucho-asfalto
(Rasool ,Wang, Zhang , Li y Zhang , 2017)	2017	China	Investigar el efecto del contenido y el tipo de HRR, el grado de recuperación y la vulcanización sobre las morfologías, las propiedades físicas y el comportamiento de envejecimiento del asfalto modificado con SBS.
(Poulikakos, et. all, 2017)	2017	Suiza	Compilación de diversos materiales para ser reciclados en mezclas asfálticas
(Santos, Flintsch y Ferreira, 2017)	2017	Estados Unidos	Desarrolló un modelo de evaluación del ciclo de vida- costeo del ciclo de vida del pavimento integral e integrado para investigar, desde una perspectiva del ciclo de vida completo , hasta qué punto varios trabajos de ingeniería de pavimentos
(Sayadi & Hesami, 2017)	2017	Irán	Este artículo propone un tratamiento eficaz y eficiente que utiliza EAFD como relleno en la mezcla asfáltica. En consecuencia, el rendimiento de la fatiga y el potencial de autocuración en la masilla junto con dos rellenos comunes que incluyen granito y cal hidratada se comparan mediante una prueba de barrido de tiempo con / sin período de descanso utilizando un dispositivo DSR.
Autor	Año	País	Practica Identificada
(J. Zhang et al., 2018)	2018	China	En este trabajo, se investigaron las condiciones experimentales más apropiadas para preparar cerámica de calentamiento por microondas (MHC) a partir de cenizas de piritas de bajo grado.
(Padhan & Sreeram, 2018)	2018	India	Investigar el efecto combinado del polímero de polioctenámico y un agente reticulante para superar las deficiencias tradicionales como la baja recuperación elástica y la

			estabilidad de almacenamiento a alta temperatura en el asfalto modificado con PE
(Yuliestyan et al., 2018)	2018	España	Desarrollar mezclas asfálticas con pavimentos asfálticos 100% regenerados (RAP) como fuente de agregados y emulsiones bituminosas estabilizadas por lignina funcionalizada con amina.
(Zhang ,Leng, Zou, Wang , Chen y Tsang, 2018)	2018	China	Desarrollar una medida innovadora para solucionar este problema de disposición de residuos mediante la síntesis de zeolita A partir del SSA y su uso como oaditivo Warm MixAsphalt (WMA), que puede disminuir la temperatura de construcción del pavimento asfáltico, reduciendo así la consumo de energía y emisión de contaminantes
(Vila, Lastra, Calzada, & Indacoechea, 2018)	2018	España	El objetivo principal de este estudio era disminuir la cantidad de betún utilizada en las mezclas asfálticas sin comprometer su comportamiento, con el fin de permitir la realización de un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) para comparar los impactos ambientales de las mezclas reducidas en betún y las convencionales.
(Fernandes ,Silva y Oliveira, 2019)	2019	Portugal	Evaluar las emisiones de dióxido de carbono y posibles lixiviados de mezclas asfálticas de masilla de piedra producidas con altas tasas de diferentes materiales de desecho para la modificación del aglomerante o el reciclaje de materiales.
(Costa, Silva, Peralta y Oliveira, 2019)	2019	Portugal	Se estudiaron polímeros reciclados como alternativa al SBS virgen para la modificación del aglutinante
(Singh, Adhikari, Maurya, Srivastava y Chhabra, 2020)	2020	India	Capa base para pavimento rígido modificada
(Abbaspour, Narani, Aflaki y Nejad , 2020)	2020	Irán	Fibras para mejorar todas las propiedades geotécnicas del suelo en estado estático.
Autor	Año	País	Practica Identificada
(Hasan, Whyte y Al Jassmi, 2020)	2020	Emiratos Árabes	Una evaluación integral del ciclo de vida de un tramo de autopista de los EAU
Rabab'Ah, Al Hattamleh, Aldeeky, Aljarrah y Al Qablan, 2020)	2020	Jordania	Mejorar las propiedades de resistencia y deformación del suelo de la subrasante
(Yu, Leng, Zhang , Li y Zhang, 2020)	2020	China	Absorción selectiva de caucho hinchable en fracciones de aglutinante de asfalto calientes

(Wang, Wang, Tseng, Huang y Li, 2020)	2020	China	Modelo de predicción de suavizado exponencial triple para predecir el suministro de neumáticos de desecho en 2019-2023 y la demanda de estos neumáticos en tres escenarios de construcción de carreteras.
(Nciri, Shin, Kim, Caron, Ismail y Cho, 2020)	2020	Corea	Potencial rejuvenecedor de base biológica para pavimentos de asfalto reciclado
(Rahman & Mohajerani, 2020)	2020	Australia	Reciclaje de Colillas de Cigarrillo (CBs) encapsulados en betún en asfalto de masilla de piedra (SMA).
(Terrones, Iglesias, Corpas y Martínez, 2020)	2020	España	Incorporación de escoria de hornos cuchara en pavimentos de asfalto recuperado (RAP) para ejecutar el reciclaje de pavimento asfáltico in situ con emulsión bituminosa.
(Beycioğlu et al., 2020)	2020	Turquía	Evaluar el uso sustentable de polvo de desecho de tubería de poliéster reforzado con fibra de vidrio (GRP) (GRP-WP), obtenido del proceso de corte y fresado de la producción de tubería de PRFV, utilizándolo en mezclas asfálticas como relleno. en pruebas de laboratorio
(Jiménez del Barco, Subhy, Izquierdo y Lo, 2020)	2020	Reino Unido	Diseñar un betún modificado con una combinación de caucho líquido (LR), una mezcla homogénea de 50-70% de RTR preprocesado en combinación con aceites pesados y una cera denominada Etileno Bis Estearamida (EBS).
(You, Yan, Yue y Yu, 2020)	2020	China	Desarrollar una mezcla en caliente de asfalto de agregado reciclado (RAHMA) reciclando la capa base de pavimentos semirrígidos y evaluar el rendimiento del RAHMA natural y de solución salina sódica de ácido metanosilicónico (MASS) mejorado.
(Islam , Ransinchung y Choudhary, 2020)	2020	India	Presenta un enfoque novedoso para utilizar JS como relleno en mezclas asfálticas

Nota: Elaboración Propia

6.2.2 Prácticas Nacionales

En la Tabla 4, se muestra la compilación de prácticas nacionales identificadas

Tabla 4
Compilación de Documentos Nacionales Analizados

Autor	Año	País	Practica Identificada
(Loaiza & Colorado, 2018)	2018	Colombia	Presenta una forma económica y eficaz de tratar los residuos de DFA mediante una tecnología denominada solidificación/estabilización, que es una forma de resolver el problema de la eliminación de residuos sólidos mediante la mezcla con cualquier material que tenga características cementantes
(Sanchez-Cotte et al., 2020)	2020	Colombia	Influencia del Concreto reciclado (RCA) en las propiedades mecánicas y el rendimiento de las mezclas de HMA modificado con RCA frente a una mezcla de control de mezclas asfálticas en caliente (HMA) sin ningún RCA
(Figueroa Infante & Fonseca Santanilla, 2020)	2020	Colombia	Estudia la adhesión, la cohesión, la fatiga y el ahuellamiento pavimento asfáltico reciclado-RAP rejuvenecido para incorporarlo en mezclas nuevas sin afectar su desempeño.
(Bastidas-Martínez, Rondón-Quintana, Contreras-Zartha, Forero-Castaño, & Rojas-Rozo, 2021)	2021	Colombia	Analiza el impacto de la incorporación de Agregados Reciclados de Concreto (RCA) en una mezcla asfáltica en tres escenarios: i) sustitución de la fracción gruesa, ii) fina y iii) 100% de la granulometría del agregado convencional (AC).

Nota: Elaboración Propia

6.3 Tendencias de Uso de Materiales Reciclados En mezclas Asfálticas a Nivel Mundial

A nivel mundial en la última década se han venido desarrollando estrategias para la construcción sostenible de infraestructura vial, de igual manera los países han establecido normativas y políticas que exige la disminución y reutilización de materiales de desecho. En la Figura 1 se puede evidenciar que el 40% de las publicaciones se centran en el año 2020 y que la tendencia a investigar y desarrollar mezclas asfálticas modificadas o con agregados que sustituyen los materiales originales viene a partir del año 2015. Esta tendencia indica que existe un aumento en la presión sobre los retos medioambientales mundiales, los cuales exigen

respuestas inmediatas, tal y como se aborda en la agenda de desarrollo de la ONU (Yuliestyan et al., 2018)

Ilustración 1

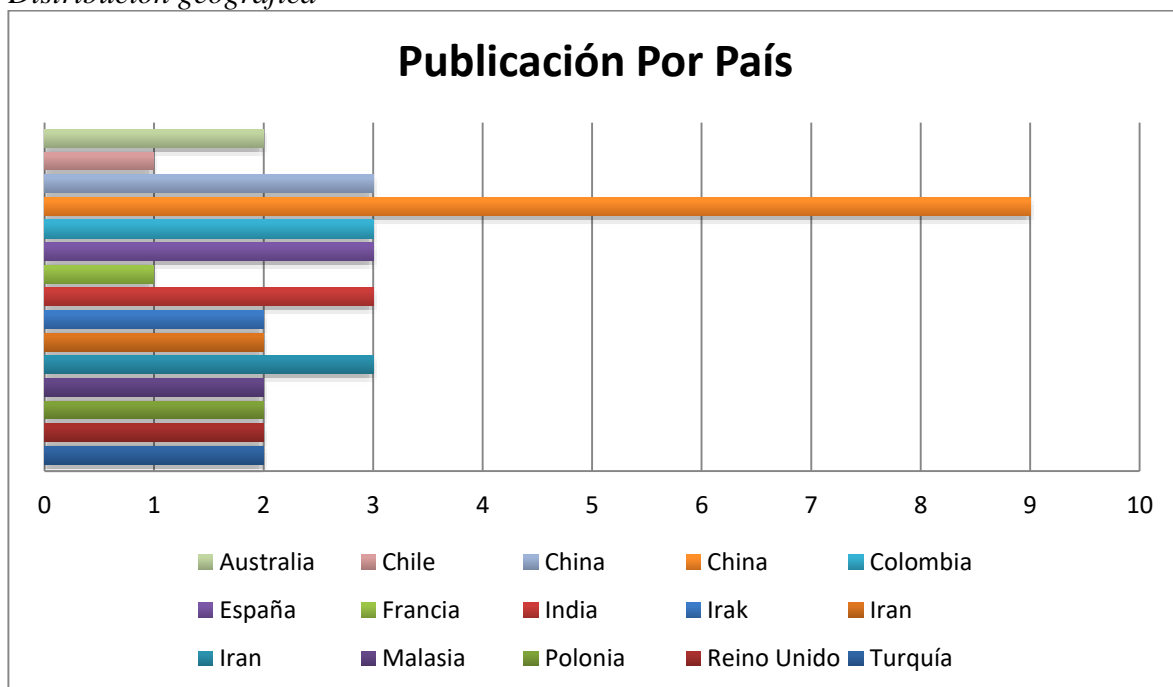
Tendencia de publicaciones por año



Nota: Elaboración Propia

En cuanto a la distribución geográfica en la Figura 2 se muestra los países que reportan estudios realizados en relación con el desarrollo de mezclas asfálticas con materiales reciclados dentro de la muestra, también se evidencia que esta es una tendencia a nivel mundial y que han existido diferentes pruebas o ensayos para analizar y abordar esta práctica de reutilización de desechos. Resaltando China como el país donde más investigación se realiza sobre este tema, con un total de 12 investigaciones (30%), a nivel América solo se encontró investigaciones del tema que corresponden al sur del continente, entre estos destaca Colombia con tres investigaciones y Chile con una. Estos resultados sugieren que a nivel de implementación de normativas y legislaciones, Asia y Europa le llevan ventaja a este continente, y que se debe ahondar más en investigaciones de este tipo en busca de soluciones efectivas en contra de la contaminación medioambiental.

Ilustración 2
Distribución geográfica



Nota: Elaboración Propia

7 Caracterización

En la última etapa de reporte y difusión propuesta por Tranfield, Denyer y Smart se realiza a través de la caracterización de las experiencias y buenas prácticas internacionales realizadas para manejos, reciclado y reusó de materiales para la creación de mezclas asfálticas dentro de los diferentes materiales de acuerdo con el tipo de residuo y la actividad económica que lo produce, previamente identificados. También se clasificaron de acuerdo con su nivel de idoneidad para su aplicación en mezclas asfálticas.

Para la caracterización se realizó una asignación de categorías de acuerdo con el tipo de asfalto y el residuo reciclado para la elaboración de la mezcla asfáltica. Se escogieron diferentes categorías atendiendo los temas principales planteados en la investigación, tal como se detallan a continuación:

7.1 Asfalto Caliente

Hace referencia a la combinación de áridos el cual incluye polvo mineral con un ligante. El proceso para la fabricación de este tipo de asfalto consta de calentar un agregado pétreo y el ligante a una temperatura elevada, muy por encima de la temperatura ambiente (Zúñiga, 2015).

Tabla 5
Caracterización de residuos usados para Asfalto Caliente

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Características	¿Qué actividad económica Produjo este residuo?
Residuos de carburo de calcio (CCR)	La cal de carburo (torta de cal) utilizada en este estudio primero se sometió a una molienda con un mortero durante 15 minutos. Este proceso evita la aglomeración de partículas y tiene en cuenta la sostenibilidad (Dulaimi et al., 2020)	Gases Industriales (BOC UK & Ireland)
Desecho de construcción y demolición_ Concreto reciclado (RCA)	Hormigón y materiales de desecho de construcción como áridos en las mezclas, sustituyendo la fracción gruesa de los agregados naturales en proporciones (Sanchez-Cotte et al., 2020) (Fatemi & Imaninasab, 2016)	Industria de la construcción
Neumáticos Reciclados	Caucho en migajas (CR) Polvo de caucho activado Goma de neumático El caucho de neumáticos se utilizó después de un proceso de molienda que produjo un tamaño medio de partícula ya sea en migajas o polvo (Jamal & Giustozzi, 2020) (Liu et al., 2020) (Agudelo et al., 2019) (Yan et al., 2016) (Ge et al., 2016) (Liang et al., 2015)	Automotriz
Lodo Reciclado de Molinos de Papel (RPMS)	El RPMS en forma de grumos húmedos y grisáceos se obtuvo de una empresa local. Para garantizar la consistencia de su contenido, se recogió un total de 40 kg de RPMS durante 5 días. Los grumos de RPMS secados al horno, no eran aptos para ser incorporados a la producción de mezclas asfálticas. Por lo tanto, se requirió un tratamiento simple mediante procesos de molienda y tamizado antes de su aplicación posterior para garantizar que estuviera libre de humedad y sin disminuir las propiedades beneficiosas del RPMS (Chew et al., 2020)	Industria del papel
Tres tipos de chatarra, a saber, virutas de acero, fibras de acero de neumáticos recicladas y relleno de escoria de cbre.	La adición de partículas metálicas en las mezclas asfálticas produce una serie de efectos beneficiosos, como la mejora de sus prestaciones mecánicas, su durabilidad y su conductividad eléctrica, haciendo posibles aplicaciones como la fusión de hielo/nieve y la curación de grietas por inducción electromagnética (Fakhri et al., 2020) (Ajam et al., 2018)	Metalúrgica
¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Características	¿Qué actividad económica Produjo este residuo?

Aceite de motor residual (WEO)	Debido a la similitud de la estructura molecular del WEO con el asfalto, se han hecho varios intentos de utilizar el WEO junto con el ligante asfáltico. La utilización de WEO como sustituto parcial dentro del sistema de ligante asfáltico para superar la mayor rigidez causada por el uso de ligante asfáltico envejecido. Además, el WEO puede utilizarse como alternativa para sustituir a los aditivos disponibles en el mercado (Qurashi & Swamy, 2018)	Automotriz
Cenizas de cáscara de arroz (RHA)	El RHA se obtuvo a partir de la combustión controlada de cáscara rica en una mufla. Se debe suministrar suficiente aire y la temperatura de combustión debe estar en el rango de 500 °C y 700 °C durante el proceso de combustión de 2 horas, evitando la carbonización de la cáscara de arroz. Posteriormente, la ceniza de cáscara de arroz quemada se molió en un molino de bolas durante 30 minutos, y la RHA utilizada se obtuvo tamizando la ceniza molida a través del tamiz de 0,075 mm de apertura (Han et al., 2017)	Alimenticia
Escoria de Acero	El reciclaje de la escoria de acero en la mezcla asfáltica es una forma prometedora de ahorrar recursos naturales y reducir la contaminación ambiental. Las revisiones de la literatura demuestran que las mezclas de asfalto con escoria de acero poseen no sólo una mayor rigidez y una menor deformación permanente, sino también una mejor resistencia a la fatiga, al envejecimiento y a la abrasión en contraste con las mezclas de asfalto convencionales (Gao et al., 2017).	Metalúrgica
Pavimento asfáltico recuperado (RAP)	Aparte del uso del RAP para las capas de sub-base de la mezcla en frío, el endurecimiento de los arcenes o el refuerzo de las carreteras de tierra, este material puede utilizarse con éxito para la construcción de nuevas capas bituminosas con parámetros comparables a los construidos con materiales no renovables. Hay estudios bien conocidos en los que se utiliza hasta el 100% de RAP en la mezcla asfáltica de composición. Las ventajas del RAP en las nuevas mezclas incluyen la reducción de la cantidad de material virgen, el ahorro de costes y recursos naturales y un menor daño medioambiental (Zhu et al., 2020) (Wróbel et al., 2021) (Ajam et al., 2018)	Construcción de infraestructuras de transporte
¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Características	¿Qué actividad económica Produjo este residuo?
Lodo de escoria de horno de oxígeno básico BOF	Las escorias de los altos hornos (BF) y las escorias básicas de los hornos de oxígeno (BOF) son subproductos de las operaciones metalúrgicas. Durante la producción de acero en el horno básico de oxidación, se generan aproximadamente entre 7 y 15 kg de polvo por tonelada de acero producido.	Metalúrgica

	Su eliminación inadecuada, incluyendo el acopio y el vertido, provoca una grave contaminación ambiental y la ocupación del suelo. i se da una definición generalizada, el lodo BOF es la sustancia sólida mezclada recuperada del enjuague BOF. Con el lavado de agua y la separación magnética, los residuos de hierro y polvo de BOF son conducidos a estanques de sedimentación. Los lodos BOF se componen principalmente de partículas BOF y lodos complejos obtenidos de la planta de limpieza de gases del horno básico de oxígeno (Xie et al., 2017)	
Residuo de cera y el polietileno reciclado (RPE)	El residuo de cera (WR) es un subproducto de la síntesis de Fischer-tropsch (FTS), que actualmente se elimina como residuo sólido común y se utiliza con poco valor agregado y serviría para la utilización como compatibilizador para asfalto. Mientras tanto, se han enfocado el caucho de llantas molidas (GTR) y el polietileno reciclado (RPE) como modificadores de bajo costo para la modificación del asfalto (Liang et al., 2020)	Hidrocarburos
Polietileno (PE)	En lo que respecta a la modificación del ligante, en la actualidad es habitual que se utilicen ligantes modificados con polímeros en las aplicaciones de pavimentos asfálticos, ya que ofrecen ventajas considerables sobre los ligantes no modificados en relación con las propiedades reológicas y de resistencia al envejecimiento. La adición de polímeros como el estireno-butadieno-estireno (SBS), el acetato de etilo y vinilo (EVA), el cloruro de polivinilo (PVC), el polietileno (PE), el polioctámero y el tereftalato de polietileno (PET) en el asfalto ha sido bien investigada y sus beneficios ampliamente reconocidos (Padhan & Sreeram, 2018)	Varias
Polvo de desecho de carbón y su ceniza	Los residuos de carbón son un subproducto que se produce en las plantas de lavado de carbón. La acumulación de residuos de carbón en la naturaleza provoca varios problemas ecológicos y ambientales. El polvo de residuos de carbón (CWP) y sus cenizas (CWA) en sustitución del polvo de piedra caliza (LS) (Modarres et al., 2015)	Minera

Nota: Elaboración propia

7.1.1 Prácticas de Incorporación de Material Reciclado (MR)

Tabla 6

Diseño de las Mezclas Asfálticas Calientes Con MR

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Diseño de las mezclas asfálticas
--	----------------------------------

Residuos de carburo de calcio (CCR)	Las mezclas de asfalto se prepararon utilizando diferentes proporciones de CCR (0%, 3% y 6%) por peso seco agregado (Dulaimi et al., 2020)
Concreto reciclado (RCA)	Para el método de diseño de mezcla Marshall se produjeron utilizando agregados NA y RCA agregados con ligante asfáltico Pen 60/70. Una mezcla HMA contenían agregados de hormigón sustituyendo la fracción gruesa de los agregados naturales en proporciones de 15%, 30% y 45% de control fue producida con un NMA (Tamaño máximo nominal de los áridos) de 25 mm (HMA-25) utilizando contenidos de ligante asfáltico de 4,0%, 4,5%, 5,0% y 5,5% respectivamente, con respecto al peso total de la mezcla HMA (AASHTO T-245) (Sanchez-Cotte et al., 2020)
Neumáticos Reciclados	En este estudio se evaluó la influencia de los parámetros de mezcla en las propiedades reológicas del CRMB. Se añadió CR en una dosis del 7,5% (en peso de betún) en el betún a 177+10C, se utilizaron dos velocidades de mezclado por cizallamiento; a saber, 700 rpm (baja) y 3500 rpm (alta) para evaluar los beneficios e inconvenientes asociados a la velocidad de mezclado (Jamal & Giustozzi, 2020). El TRSMA, cuyo contenido de caucho era del 9% en peso, se preparó en un impulsor de cuatro palas (IKA-20) fabricado en Alemania. El asfalto base cuantificado se calentó primariamente en un recipiente cilíndrico a 170 C y, a continuación, se añadió caucho de desecho de neumáticos en la matriz de asfalto a una velocidad de rotación de 1200 rpm (Liang et al., 2015).
Lodo Reciclado de Molinos de Papel (RPMS)	Las mezclas asfálticas con RPMS, el RPMS se mezcla y se calienta junto con los áridos. Los lotes calentados se mezclan en una mezcladora precalentada con una cantidad determinada de ligante asfáltico. La mezcla asfáltica se transfiere a una bandeja y se acondiciona durante dos horas a 150 C para simular las condiciones de almacenamiento en el silo de la planta y permitir la absorción del ligante (Chew et al., 2020)
Tres tipos de chatarra, a saber, virutas de acero, fibras de acero de neumáticos recicladas y relleno de escoria de cobre.	Los áridos se calentaron a una temperatura de 130 C durante 24 h en el horno antes del proceso de mezcla. El betún y la mezcladora Para reducir la aglomeración, las virutas de acero y las fibras de acero de neumáticos reciclados se añaden gradualmente al betún, de modo que en cada etapa toda la superficie de las virutas o las fibras se cubren con betún. Para separar las virutas de acero y las fibras de acero de neumático reciclado con el fin de evitar la aglomeración, los agregados se añadieron en cuatro grupos, empezando por las partículas más grandes. Una vez que cada grupo de partículas estaba completamente cubierto con betún fresco, se añadía a la mezcla el siguiente grupo, que contenía partículas más pequeñas. Por último, se añadió a la mezcla el relleno de cal o escoria de cobre, que se mezcló durante 15 minutos a una temperatura de 125e135 C (Fakhri et al., 2020) (Ajam et al., 2018).
Pavimento asfáltico recuperado (RAP) y neumáticos de desecho	Se utilizó un contenido de asfalto del 5,7% y del 50% de RAP basado en el diseño real de la mezcla .La temperatura de precalentamiento es de 120 C para el RAP, 180 C para el para los áridos vírgenes y de 170 C para el asfalto. El tiempo de precalentamiento es de 2 h para el RAP, 4 h para el árido virgen y 1,5 h para el asfalto. El RAP se mezcló primero con agregado virgen y luego se agregó el asfalto engomado (Zhu et al., 2020) (Wróbel et al., 2021) (Ajam et al., 2018)
¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Diseño de las mezclas asfálticas
Residuo de cera, caucho de llantas molidas (GTR) y el polietileno reciclado (RPE)	El GTR se pre-secó en un horno a una temperatura de 105 C durante 2 h. Las mezclas de GTR/RPE o GTR/RPE/ WR se compusieron mutuamente en una extrusora de doble husillo co-rotante (SHJ-20 Nanjing) a 180 C. Todos los componentes se dosificaron directamente en la tolva con un rendimiento constante de 1,25 kg/h. rendimiento constante de 1,25 kg/h (Liang et al., 2020).

Polietileno (PE)	El ligante asfáltico por 100 unidades, en forma de flujo libre, se mezcló con una proporción 2:1 de PE y TPOR a unos 165 C durante 1 hora a una velocidad de mezcla de 4000 r/min con la ayuda de un mezclador de alto cizallamiento para sintetizar PE-TPOR. Posteriormente, se mezclaron tres porcentajes de agente reticulante, es decir, azufre al 0,1%, 0,5% y 1% se mezcló con PE-TPOR durante otros 30 minutos (Padhan & Sreeram, 2018).
Aceite de motor residual (WEO)	La preparación de las mezclas asfálticas implicó la adición de 250g de ligante envejecido (extraído del RAP) a 1000g de ligante base (VG30). Esto se tradujo en alrededor de un 25% de ligante de RAP con respecto al peso del ligante base. La mezcla resultante se agitó continuamente durante 30 minutos a 160°C. Se utilizó un hilo de cobre helicoidal como agitador. Esta mezcla uniforme se transfirió a recipientes de vidrio de 100 g de capacidad y se añadió posteriormente el WEO. Se utilizó una pipeta de vidrio para transferir una cantidad predeterminada de WEO a los recipientes de 100g designados, y se agitó/removió bien hasta obtener una mezcla homogénea. El porcentaje de WEO en esta investigación varió entre el 0% y el 8% en incrementos del 2% (Qurashi & Swamy, 2018).
Lodo de escoria de horno de oxígeno básico BOF	Primero se calentó el asfalto a 110 C hasta que se convirtió en un fluido en un recipiente de hierro. Las cargas se añadieron al asfalto lentamente con una velocidad de agitación constante de 200 RPM. A continuación, el aglutinante asfáltico se sometió a un mezclador de alto cizallamiento con una velocidad de cizallamiento de 4000 RPM durante 40 minutos. Para cubrir toda la gama de proporciones de relleno/ asfalto en la mezcla, se diseñaron cuatro proporciones de relleno/ asfalto en base al volumen: 0,22, 0,37, 0,55 y 0,59, respectivamente. La gradación de la mezcla asfáltica se diseñó mediante el método estándar método Marshall. Se seleccionó una mezcla con un tamaño máximo de árido 13,2 mm se seleccionó siguiendo una gradación densa continua hasta que los agregados de basalto fueron fundamentalmente probados (Xie et al., 2017).
cenizas de cáscara de arroz (RHA)	Debido a la superficie altamente específica de RHA, el premezclado del RHA calentado y el aglutinante de asfalto son necesarios para una mezcla más fácil. Primero, base asfalto y preparado RHA estaba calentado a 150 ° C en horno y Preservado por 2 h. Después premezclado, a alta velocidad mezclador estaba adaptado para hacer que el RHA se mezcle de manera más uniforme con el asfalto base permaneciendo bajo velocidad de mezcla de 1000 r / min para 5 minutos y una más alta velocidad de 3000 r / min por 15 minutos después (Han et al., 2017)
Escoria de acero	Debido a la mayor densidad específica en comparación con la piedra caliza, el principio de sustitución es reemplazar la piedra caliza en volumen con los tamaños más efectivos de escorias de acero. Se realizaron pruebas Marshall para determinar la proporción óptima de agregados asfálticos para SS-0 (mezcla sin escoria de acero y Escoria de acero), luego el peso del asfalto para SS-0 se mantuvo sin cambios en el resto de los especímenes (Gao et al., 2017).
¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Diseño de las mezclas asfálticas
Polvo de desecho de carbón y su ceniza	En este estudio, se utilizó el método Marshall para preparar las muestras basadas en la norma ASTM-D1559. Para cada tipo de relleno, se prepararon seis contenidos diferentes de betún entre el 3,5 y el 6% del peso total de la mezcla en incrementos del 0,5%. El contenido óptimo de betún para las mezclas que contienen los rellenos ZP, CP, CWP, LS y CWA fueron iguales a 5,4, 5,1, 5,2, 5,0 y 5,2% del peso total de la mezcla, respectivamente (Modarres et al., 2015).

Nota: Elaboración Propia

7.2 Asfalto Espumado

También denominado como asfalto celular, se consigue a través del proceso de inyección de una porción pequeña de agua fría (1 a 2% del peso del asfalto) y aire comprimido a una masa de asfalto caliente (160° C - 180° C), dentro de una cámara de expansión generando espontáneamente espuma (THENOUX & JAMET, 2015)

Tabla 7

Caracterización de residuos usados para Asfalto Espumado

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Características	¿Qué actividad económica produjo este residuo?
Agregados de hormigón reciclado (RCA)	Sustituir la fracción gruesa natural, (sustituyendo en masa los áridos naturales gruesos) por la fracción gruesa RCA en las proporciones del 25%, 50%, 75% y 100% para el hormigón HMA. Se destaca que, a pesar de tener una mayor absorción de agua, menor densidad y menor resistencia a la abrasión, las mezclas de RCA se comporta satisfactoriamente, cumpliendo con las especificaciones estándar estipuladas para la capa superficial de hormigón asfáltico para carreteras de bajo volumen. Además, una mejora en la adhesividad de la mezcla de RCA (Monu et al., 2020)	Construcción
Aceite de motor residual (WEO)	La estructura del WEO se asemeja a las estructuras moleculares del asfalto con suficiente contenido aromático, lo que conduce a una unión coherente alterando los constituyentes y rejuveneciendo el asfalto envejecido. Según las últimas investigaciones, el WEO no sólo permite aumentar la cantidad de adición de RAP en las mezclas de nuevo diseño, sino que también ajusta sus propiedades, como: La resistencia a la fatiga, la trabajabilidad, la resistencia a la tracción indirecta y la susceptibilidad a la humedad, además de reducir el rendimiento dúctil. El aceite de motor usado también puede sustituir parcialmente al ligante asfáltico virgen. La adición de WEO provoca un efecto de ablandamiento, mejora la elasticidad y recupera las propiedades del asfalto base (Wozzuk et al., 2019)	Automotriz

Nota: Elaboración Propia

7.2.1 Prácticas de Incorporación de Material Reciclado

Tabla 8

Diseño de las Mezclas Asfálticas Espumadas Con MR

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Diseño de las mezclas asfálticas
Agregados de hormigón reciclado (RCA)	Las mezclas en proporción 40% RCA y 20% RAP=20% RCA , fueron reforzadas con fibras de propileno en proporciones de 0,05%, 0,10% y 0,15% en peso del total de agregados. Las fibras se añadieron entre la adición óptima de agua y la espuma de betún y se mezclaron durante unos 10 s (Monu et al., 2020).
Aceite de motor residual (WEO)	Para el asfalto con aditivos de WEO y zeolitas empapadas en agua. Después de calentar el asfalto en el horno hasta la temperatura de prueba, se añadió aceite a la muestra y se mezcló manualmente hasta que la mezcla se hizo homogénea. A continuación, se añadió la zeolita empapada en agua y se volvió a mezclar manualmente (Woszuk et al., 2019)

Nota: Elaboración Propia

7.3 Asfalto Masilla de Piedra

El asfalto de masilla de piedra (SMA), también llamado asfalto de matriz de piedra, contiene un alto contenido de agregado grueso que se entrelaza para formar un esqueleto de piedra resistente a la deformación permanente. El esqueleto de piedra es rellenado con una masilla de betún y relleno al cual se le añaden fibras para proporcionar una estabilidad adecuada del betún y así evitar el drenaje del aglomerante durante el transporte y la colocación. La composición típica de SMA consiste en 70-80% de agregado grueso, 8-12% de relleno, 6.0-7.0% de aglutinante y 0.3% de fibra. Proporciona un material de superficie duradera y resistente a la deformación, adecuado para carreteras con mucho tráfico (Carpintero, 2020).

Tabla 9*Caracterización de residuos usados para Asfalto de Masilla de Piedra*

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Características	¿Qué actividad económica Produjo este residuo?
Colillas de Cigarrillo (CB)	Las colillas quemadas contienen nicotina, alquitrán, CO, arsénico y muchas otras sustancias químicas tóxicas. Encapsulan de los CB con betún en laboratorio. El procesamiento de las colillas mediante el secado y la eliminación del tabaco, la encapsulación de las CB con betún y la compresión para eliminar el exceso de betún (Rahman & Mohajerani, 2020)	Tabacalera
El polvo de los hornos de arco eléctrico (EAFD)	El polvo de horno de arco eléctrico (EAFD) es uno de los subproductos peligrosos y críticos de la industria siderúrgica. Contiene principalmente una serie de metales pesados y otros materiales nocivos como el carbono (Cr), el plomo (Pb), el zinc (Zn), el cobre (Cu) y el cadmio (Cd). El uso de este relleno en la mezcla de asfalto disminuye los efectos secundarios ambientales además de la reducción de costos de fabricación y mejora los aspectos económicos de la producción de asfalto (Sayadi & Hesami, 2017) (Oluwasola & Hainin, 2016).	Metalúrgica
Relaves de mina de cobre (CMT)	El relave es un sólido finamente molido, que se descarta en operaciones de las minas de cobre. Es un material bajo en cobre compuesto de materiales finos (arenas y limos). En la mezclas asfálticas sirve como como agregados gruesos y finos (Oluwasola & Hainin, 2016).	Minería
Residuos de basalto	Residuos de la explotación de canteras de basalto los cuales son ricos en silicatos de magnesio y hierro y en sílice. La utilización de basaltos residuales como áridos y materiales de relleno en el SMA reducirá el coste unitario de la construcción de carreteras, además de contribuir a la protección del medio ambiente (Karakuş, 2011).	Minería

Nota: Elaboración Propia

7.3.1 Prácticas de Incorporación de Material Reciclado

Tabla 10

Diseño de las Mezclas Asfálticas de Masilla de Piedra Con MR

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Diseño de las mezclas asfálticas
Colillas de Cigarrillo	La mezcla de asfalto de piedra y masilla se preparó utilizando agregados seleccionados según la gradación, 6% de rellenos minerales, 0,3% de fibras de celulosa y 6,5% de betún PMB clase A10E. La mezcla asfáltica se preparó a 170°C (Rahman & Mohajerani, 2020).
El polvo de los hornos de arco eléctrico (EAFD)	En este estudio, se utilizaron rellenos de EAFD con un peso especial de 0,987 gr/cm ³ , Granito con un peso específico de 1,2 gr/cm ³ , y Cal hidratada con un peso especial de 2,653 gr/cm ³ (Sayadi & Hesami, 2017).
Relaves de mina de cobre (CMT)	Se elaboraron tres mezclas con contenido de CMT. La mezcla 1 consistió en 100% de granito; La mezcla 2 era 80% de granito, 20% de CMT; La mezcla 3 consistió en un 80% de escoria de acero EAF y un 20% de CMT; y la Mezcla 4 era 40% de escoria de acero EAF, 40% de granito y 20% de CMT (Oluwasola & Hainin, 2016).
Residuos de basalto	En el estudio experimental se utilizaron residuos de polvo de basalto en una proporción del 10,1% del total de la mezcla como relleno mineral. Los áridos utilizados se clasifican principalmente en tres tamaños de grano diferentes como agregado grueso (+4,75-16,0 mm), agregado fino (+0,075- 4,75 mm) y el relleno mineral (0,075 mm). Esta mezcla está compuesta por un 68,1% de áridos gruesos, un 21,8% de áridos finos y 10,1% de relleno mineral en peso (Karakuş, 2011).

Nota: Elaboración Propia

7.4 Hormigón Asfáltico

El hormigón asfáltico consiste principalmente en agregados de asfalto y materiales minerales los cuales representan una mezcla de varios tamaños de áridos y finos, estos se mezclan unidos, se extienden en capas y se compactan. Básicamente es una combinación de grava (Áridos) con cierta granulometría y un material bituminoso derivado del petróleo color

negro el cual se mezcla con la piedra en caliente o frío, para posteriormente ser compactado. Este tipo de asfalto posee diversos beneficios en términos de durabilidad de superficie, soporte de neumático, eficiencia de frenado y disminución de ruido (Beycioğlu et al., 2020)

Tabla 11

Caracterización de residuos usados para Hormigón Asfáltico

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Características	¿Qué actividad económica Produjo este residuo?
Desecho de tubería de poliéster GRP	Este desecho es obtenido del proceso de corte y fresado de la producción de tubería de polvo fino de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), utilizándolo en mezclas asfálticas como relleno en pruebas de laboratorio debido a su influencia en la durabilidad de los productos cementicios (Beycioğlu et al., 2020)	Industrial
Jarosita (JS)	La jarosita es un mineral, rico en sulfato de potasio y hierro con hidroxilos. La jarosita (JS) es un subproducto sólido de las fundiciones de zinc, que se produce a través de la extracción de zinc de su concentrado de mineral mediante operaciones hidrometalúrgicas. El residuo de jarosita representa aproximadamente el 60% de la cantidad total de zinc fabricado. Se estima que cada año se generan aproximadamente 0,60 y 0,25 millones de toneladas de jarosita en las plantas de extracción de zinc. El uso de jarosita en combinación con lodos de residuos minerales mostró una buena resistencia a la compresión no confinada y podría utilizarse como material de baja resistencia controlada (Islam et al., 2021)	Hidrometalúrgicas
Polvo del horno de arco eléctrico (EAFD)	El Polvo de Horno de Arco Eléctrico (EAFD), es un residuo subproducto de la industria metalúrgica y se ha utilizado en el cemento asfáltico mostrando mejoras en algunas características como la viscosidad, la penetración y el punto de ablandamiento. El polvo de horno eléctrico se produce en el proceso de fabricación de acero en millones de toneladas en todo el mundo, aproximadamente entre 16.000 y 32.000 toneladas al año, y está considerado como un residuo peligroso por la EPA (Agencia de Protección Ambiental), debido a su alto contenido en óxidos de metales pesados. El polvo de los hornos de arco eléctrico puede producirse a temperaturas de hasta 1.800 °C en el proceso de fabricación del acero, extraído como material particulado volatilizado por los extractores de humos y luego eliminado en sistemas de bolsas (Loaiza & Colorado, 2018).	Metalúrgica

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Características	¿Qué actividad económica Produjo este residuo?
Poliestireno (PS)	El poliestireno es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno monómero. Posee capacidades de proporcionar propiedades aislantes y de aligeramiento. la sustitución de parte del betún por polímeros podría reducir los impactos ambientales de las mezclas asfálticas, teniendo en cuenta el aumento esperado de su ciclo de vida proporcionado por la presencia de plásticos (Vila-Cortavitarte et al., 2018)	
Ceniza de cáscara de arroz (RHA)	La ceniza de cáscara de arroz (RHA) es un material subproducto de la combustión de la cáscara de arroz. La cáscara de arroz se genera a partir de la producción de arroz. La cáscara del arroz se elimina en el proceso de cultivo antes de su venta y consumo. Constituye el 20% de los aproximadamente 500 millones de toneladas de arroz que se producen en el mundo. La idea es el uso de Rice Husk Ash (RHA) en lugar del relleno mineral convencional en mezclas de asfalto (Al-Hdabi, 2016).	Alimenticia

Nota: Elaboración Propia

7.4.1 Prácticas de Incorporación de Material Reciclado

Tabla 12

Diseño de las Mezclas de Hormigón Asfáltico Con MR

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Diseño de las mezclas asfálticas
Desecho de tubería de poliéster GRP	Junto con los agregados finos y gruesos a base de piedra caliza, se usó GRP-WP, un material de desecho producido durante el corte y fresado de tuberías de GRP, como reemplazo del relleno en diferentes proporciones. Para utilizar GRP-WP como relleno, primero se tamizó el GRP-WP a través de un tamiz de 0,075 mm y el polvo que pasaba a través del tamiz se utilizó como relleno en mezclas asfálticas cementicios (Beycioğlu et al., 2020).
Jarosita (JS)	Las mezclas de asfalto que contienen JS se diseñaron según el diseño de mezcla de Marshall. La temperatura de mezcla y compactación de las muestras se tomó como 155 C y 150 C según el protocolo MS-2. El OAC se considera como el contenido de asfalto corresponde a un 4% de vacío de aire. La jarosita se incorporó a las mezclas de hormigón asfáltico sin ninguna modificación física o química (Islam et al., 2021).

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Diseño de las mezclas asfálticas
Polvo del horno de arco eléctrico (EAFD)	El asfalto modificado con EAFD se fabricó mezclando aglomerante asfáltico 60/70 con 1, 5, 10 y 20% en peso. Las muestras de concreto asfáltico se fabricaron con asfalto modificado con EAFD y agregados minerales con 0.0 (asfalto puro), 10 y 20% en peso de EAFD (Loaiza & Colorado, 2018)
Poliestireno (PS)	Los materiales se combinaron en un mezclador de laboratorio. La cantidad de material utilizado para las mezclas, que era de unos 300 kg, se dividida en los tres tipos de muestras diferentes utilizados en el estudio. Los áridos y el betún se calentaron a 170 C y 155 C respectivamente. Las materias primas de las mezclas de referencia se añadieron al el tambor en el siguiente orden: áridos gruesos, áridos finos y el betún. Tras un minuto de mezcla, se añadió el relleno y todos los materiales se mezclaron durante 4 minutos más aproximadamente (Vila-Cortavitate et al., 2018).
Ceniza de cáscara de arroz (RHA)	Todos los áridos es decir, grueso, fino y el relleno mineral RHA se han calentado en el horno a 150 C antes de mezclarlos con el cemento asfáltico. Mientras que el cemento asfáltico de grado de penetración 40-50 se mantuvo en el horno a 150 C antes de antes de mezclarlo con los áridos (Al-Hdabi, 2016).

Nota: Elaboración Propia

7.5 Asfalto Frio Y Templado

Las mezclas de asfalto templado se definen según la temperatura de fabricación y puesta en obra, que en este caso son aquellas que no superan 100 °C para su fabricación y debido a esto son utilizadas para carreteras de baja intensidad de tráfico (Asfaltia, 2018). Las mezclas asfálticas en frio al igual que las templadas son usadas para carreteras de bajo tráfico y en algunos casos para arreglar pequeños desperfectos en pavimentos estropeados, su proceso de fabricación se realiza a temperatura ambiente con el uso de emulsiones como ligante bituminoso (Asfaltia, 2016).

Tabla 13*Caracterización de residuos usados para Asfaltó Frio y Templado*

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Características	¿Qué actividad económica Produjo este residuo?
Pavimento asfáltico recuperado (RAP)	Al ser empleado el pavimento de asfalto recuperado (RAP) se obtiene una reducción del 15% en el agotamiento de los fósiles. También se ha informado de una reducción del 13-14% en la demanda energética acumulada para un 15% de RAP reciclado. Además de estos beneficios, el rendimiento mecánico, el módulo de rigidez y la resistencia a las roderas podrían mejorarse (Yuliestyan et al., 2018).	Construcción de infraestructuras de transporte
Escoria de cobre y áridos de hormigón reciclado	El CS se ha utilizado ampliamente como herramienta abrasiva para el balasto de los ferrocarriles, los gránulos para techos y las industrias del cemento y el hormigón. También se puede utilizar en amplios ámbitos de la construcción de carreteras, incluyendo las capas superficiales y en bases o subbases no ligadas. Los áridos de hormigón recogidos en las obras de demolición se han utilizado ampliamente en las mezclas asfálticas. Las propiedades de los ACR son diferentes a las de los áridos naturales debido al mortero adherido a la superficie de las partículas de ACR. Las propiedades del ACR pueden variar de una fuente a otra (Behnood et al., 2015).	Metalúrgica y Construcción
Zeolita proveniente de Cenizas de lodos de depuradora (SSA)	Las cenizas de los lodos de depuradora (SSA) son de gran cantidad (aproximadamente 296 toneladas diarias) y suponen una carga medioambiental y económica inevitable. Se han investigado varias opciones con el fin de recuperar los recursos beneficiosos de los SSA, el SSA se utilizó para sintetizar la zeolita y la zeolita derivada del SSA se aplicó como aditivo de la Mezcla templada de Asfalto (WMA) (Y. Zhang et al., 2018).	Plantas de tratamiento de aguas residuales

Nota: elaboración propia

7.5.1 Prácticas de Incorporación de Material Reciclado

Tabla 14

Diseño de las Mezclas de Mezclas Asfálticas Frías y Templadas Con MR

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Diseño de las mezclas asfálticas
Pavimento asfáltico recuperado (RAP)	El mezclado se realizó en dos pasos: primero la adición de agua para humedecer la superficie del RAP y después la adición de la emulsión de betún para un tiempo total de mezclado de 2,5 minutos. La compactación, además del estudio de compactación con compactador giratorio, se realizó con compactador de rodillos de neumáticos. Una vez compactadas, las losas se dejaron curar durante tres días a 50 C (Yuliestyan et al., 2018).
Escoria de cobre y áridos de hormigón reciclado	Las mezclas de CIR se diseñaron basándose en el método Marshall modificado (ASTM D1559), aceptado por la AASHTO. Siguiendo este método, las mezclas se prepararon de tal manera que contenían un 3% de agua. Esta agua está compuesta por el agua de la emulsión, el agua del RAP y el agua añadida a la mezcla. La emulsión de betún se añadió a las mezclas en porcentajes que oscilaban entre el 2,5% y el 4,5% en peso de la mezcla total en incrementos de 0,5% (Behnood et al., 2015)..
Zeolita proveniente de Cenizas de lodos de depuradora (SSA)	El producto de zeolita sintetizado en las condiciones óptimas se utilizó como aditivo de WMA para producir una mezcla de WMA. La composición de la mezcla es la típica mezcla de asfalto de 10 mm de capa de rodadura. Los áridos gruesos, así como los agregados finos y el relleno mineral procedían de rocas de granito locales. El aglutinante utilizado era betún de pluma de grado 60/70. Se aplicó el método Marshall para diseñar la mezcla HMA y preparar las muestras (Y. Zhang et al., 2018).

Nota: elaboración propia

7.6 Asfalto Poroso

Los pavimentos porosos son esencialmente una combinación de agregados gruesos uniformemente ajustados, con un contenido bajo de arena y un cementante, que puede ser una mezcla bituminosa o cemento, logrando un porcentaje de vacíos entre 15% y 20%. Este tipo de asfalto es considerado como un sistema de drenaje alternativo. Este tipo de pavimento permeable se dividen principalmente en dos clases según Azzout, Barraud, Cres, & Alfakih, (1994) y citado en Quiroz & López, (2013): “ i) pavimentos con revestimiento drenante; ii) pavimentos con revestimiento impermeable. Estos dos tipos de pavimentos porosos pueden ser de evacuación

distribuida (pavimentos drenantes de infiltración) y/o de evacuación localizada (pavimentos drenantes de retención)” (p. 15).

El pavimento poroso cuenta con una gran cualidad y es que permiten la percolación de líquidos a través de su estructura, lo que retarda la escorrentía generada por los eventos de lluvia, para posteriormente liberar de manera diferida el volumen de agua en el medio natural (río, acuífero, humedal, etc.) o en las estructuras de drenaje complementarias y/o convencionales (Quiroz & López, 2013).

Tabla 15
Caracterización de residuos usados para Asfaltó Poroso

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Características	¿Qué actividad económica Produjo este residuo?
Escoria de horno cuchara (LFS)	Por cada tonelada de acero refinado se recuperan aproximadamente entre 60 y 80 kg de SLF. Normalmente se reintroducen cantidades variables de SLF en el proceso de producción de acero, tanto en los hornos de arco eléctrico como en los hornos básicos de oxígeno. A pesar de esto el vertido de escorias LFS en vertederos supera las 400.000 toneladas anuales, lo que ha motivado la búsqueda de usos alternativos que reduzcan este volumen de residuos y el excesivo relleno del terreno. Una de las principales propiedades de los LFS es su hidraulicidad, resultante de su composición química, que le confiere propiedades cementantes. La hidratación también puede provocar la disolución de algunos elementos y la expansión volumétrica. La LFS suele contener ciertos minerales inestables (principalmente en forma de cal libre y periclase). Estos minerales se transforman en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y/o $\text{Mg}(\text{OH})_2$ en presencia de humedad, que ocupan un volumen mayor que los componentes primarios (Skaf et al., 2016)	Metalúrgica

Nota: elaboración propia

7.6.1 Prácticas de Incorporación de Material Reciclado

Tabla 16

Diseño de las Mezclas de Asfalto Poroso Con MR

¿Qué tipo de residuo se utilizó como material reciclado?	Diseño de las mezclas asfálticas
Escoria de horno cuchara (LFS)	Cada muestra se fabricó de acuerdo con las especificaciones de la norma EN 12697-35 ¹ (AEN, 2017) sobre materiales, preparación y mezcla denominada PA-LL, con la escoria de horno de cuchara como agregado fino y como relleno. El betún modificado con polímeros se aplicó según las temperaturas recomendadas por el fabricante: 160 C para la mezcla y 155 C para la compactación (Skaf et al., 2016).

Nota: elaboración propia

¹ Métodos de ensayo. Parte 35: Mezclado en laboratorio, describe el proceso de mezclado en laboratorio de materiales bituminosos para la fabricación de probetas. La norma especifica las temperaturas de referencia en la compactación para mezclados basados en el tipo de ligante en el caso de betunes de pavimentación y betunes duros de pavimentación (Skaf et al., 2016).

8 Materiales más Comunes a Ser Reciclados en Mezclas Asfálticas

La industria produce cada día grandes cantidades de residuos, especialmente en sectores como la construcción, la minería y las canteras y la industria manufacturera. Los enfoques de eliminación inadecuados no pueden resolver a fondo la contaminación ambiental de los residuos, siendo uno de los principales medios por los que los metales y/o lixiviados producidos en diferentes sectores industriales llegan al suelo y a las aguas subterráneas. Estos pueden migrar a los ecosistemas circundantes y biomagnificarse en las plantas y los animales, llegando finalmente a los seres humanos a través de la cadena alimentaria (Ajam et al., 2018).

El reciclaje de dichos residuos en las mezclas asfálticas proporciona en gran medida una solución a la disposición final eficiente, ya que la sociedad está en constante crecimiento y con ello el desarrollo de la infraestructura vial; estos residuos pueden ser utilizados en las mezclas asfálticas como reemplazo de materiales convencionales, aditivos o en algunos casos como modificadores en pro de brindar mejoras a las mezclas asfálticas.

8.1 Residuos industriales reciclados a través de la elaboración de mezclas asfálticas

A partir de la revisión bibliográfica se pudo identificar que los materiales reciclados más usados para las mezclas asfálticas son los derivados de sector automotriz, metalúrgico, de infraestructura vial y desechos de la construcción.

Todos los autores concuerdan en que el uso de estos materiales brinda ventajas no solo medioambientales al minimizar más el impacto en el medio ambiente, sino también beneficios de tipo económico, ya que con la utilización de desechos se consigue una reducción en costos de producción de mezclas asfálticas.

Tabla 17

Materiales reciclables más usados en Mezclas Asfálticas

Material	Descripción
----------	-------------

Neumáticos Reciclados	Es utilizado de diversas formas y se aprovecha el caucho y las fibras metálicas que lo componen. Dentro de las mezclas de asfalto el caucho tiene la función fundamental de modificación del ligante asfáltico.
Desecho de construcción y demolición_ Concreto reciclado (RCA)	Estos desechos son utilizados en las mezclas asfálticas como reemplazo de los áridos finos y/o gruesos.
Pavimento asfáltico recuperado (RAP)	Mezclas asfálticas con pavimentos asfálticos 100% recuperados (RAP) como fuente de agregados y emulsiones bituminosas.
El polvo de los hornos de arco eléctrico (EAFD)	Dentro de la fabricación cumple la función de relleno o en sustitución de agregados fino para su uso en la fabricación de mezclas asfálticas.
Escoria de Cobre y de acero	Escoria de acero y cobre como agregado de mezclas asfálticas en reemplazo parcial del agregado convencional tal como la piedra caliza, el principio de sustitución es reemplazar la piedra caliza o algunas partículas de relleno en volumen con los tamaños más efectivos de escorias.

Nota: elaboración propia

8.2 Idoneidad de los Materiales en el Uso en Mezclas Asfáltica

Entre las principales motivaciones para utilizar materiales reciclados se encuentran la de ahorrar recursos, mejorar las propiedades del material y por supuesto la contribución a la disminución de contaminantes. En la categoría de recursos, se puede nombrar la reutilización de pavimentos viejos o de materiales no pavimentados, tales como materiales de construcción y demolición (C&D) o materiales marginales que son de baja calidad, en pavimentos nuevos. En lo que respecta a la mejora de los materiales, se pueden enumerar los siguientes: sustitución de componentes tradicionales, como el betún, por polímeros; adaptación del rendimiento del pavimento utilizando materiales seleccionados para cumplir los requisitos de aumento del

rendimiento; utilización de materiales tradicionales para reunir diferentes propiedades (Poulikakos et al., 2017). Teniendo en cuenta lo anterior se describe de acuerdo a cada material las respuestas obtenidas en cuanto a la idoneidad de su uso.

8.2.1 Neumáticos Reciclados

- Mejora el rendimiento de los surcos al tiempo que facilita el reciclaje de neumáticos al final de su vida útil (Jamal & Giustozzi, 2020).
- Mejora la estabilidad de almacenamiento y la compatibilidad del asfalto (Liang et al., 2020)
- Es eficaz para la reducción del consumo de energía, emisiones y coste en la producción de asfalto (Liang et al., 2020)
- Mejora el rendimiento a altas temperaturas y la resistencia a la formación de surcos de los ligantes de asfalto o deformaciones permanentes (Yan et al., 2016) (Ge et al., 2016) (Liang et al., 2015)
- Las ventajas de utilizar virutas de neumáticos son, entre otras, la reducción de la densidad, la mejora de las propiedades de drenaje y el buen aislamiento térmico (Poulikakos et al., 2017).
- Mejorar significativamente las propiedades de rendimiento de las mezclas asfálticas en caliente. Además, puede utilizarse para diferentes tipos de mezclas asfálticas (Poulikakos et al., 2017).

8.2.2 Desecho de construcción y demolición_ Concreto reciclado (RCA)

- Tienen un comportamiento similar al de las mezclas convencionales de asfalto, pero con mayores beneficios ambientales y ahorros potenciales de costos a través del reciclaje y reutilización de agregados de concreto de desecho (Sanchez-Cotte et al., 2020)

- Mejoran la resistencia a la formación de surcos (Monu et al., 2020).
- Mejora la resistencia al daño por humedad con el aumento de materiales de desecho (Monu et al., 2020).
- Ayuda a disminuir la cantidad de vertidos, reduciendo el uso de recursos naturales y aumentando el rendimiento en los pavimentos (Poulikakos et al., 2017)

8.2.3 Pavimento asfáltico recuperado (RAP)

- Mayor resistencia a las fisuras por baja temperatura y deformaciones permanentes (Wróbel et al., 2021).
- Tienen el potencial de curar grietas mediante calentamiento por microondas (Yuliestyan et al., 2018).
- Minimizar el impacto en el medio ambiente (González et al., 2018).
- Puede tener un rendimiento mecánico similar al de una mezcla hecha con todos los componentes vírgenes (Poulikakos et al., 2017).

8.2.4 El polvo de los hornos de arco eléctrico (EAFD)

- Aumento en la estabilidad, rigidez, gravedad específica a granel y contenido de huecos de aire (Loaiza & Colorado, 2018).
- Disminuye los efectos secundarios ambientales además de la reducción de costos de fabricación y mejora los aspectos económicos de la producción de asfalto (Sayadi & Hesami, 2017).
- Mejora significativamente las características de rendimiento del asfalto y simultáneamente aumenta la susceptibilidad a la formación de surcos de la mezcla (Oluwasola & Hainin, 2016).

- Cumplimiento con las especificaciones de las normas relevantes y sin diferencias significativas con las de agregados naturales y cemento (Skaf et al., 2016).

8.2.5 Escoria de Cobre y de acero

- Mejora del módulo de elasticidad y de la resistencia a la tracción, así como una reducción de la sensibilidad a la humedad y de la deformación permanente (Poulikakos et al., 2017)
- Rendimiento satisfactorio en términos de resistencia al deslizamiento y textura superficial (Poulikakos et al., 2017)
- Mejora la susceptibilidad a la humedad y la resistencia a la formación de surcos (Fakhri et al., 2020).
- Beneficios para las fuentes de suministro, el peligro ambiental y el bajo costo de la escoria de acero (Oluwasola & Hainin, 2016)
- Mejor entrelazado dentro de la mezcla y propiedades físicas y mecánicas superiores (Behnood et al., 2015)

9 Análisis de Resultados

La reducción tanto de los problemas ambientales como de los costos de construcción ha motivado a la industria de infraestructura vial a utilizar cada vez más materiales de desecho como materias primas alternativas en la construcción de mezclas asfálticas para la construcción de carreteras (Dulaimi et al., 2020). El uso de material de desecho sólido en la construcción de pavimentos podría reducir sustancialmente la producción de desechos y reduce la posibilidad de que esos materiales de desecho terminen en los vertederos (Chew et al., 2020).

Teniendo en cuenta lo antes descrito se han llevado a cabo diversidad de investigaciones que proponen alternativas de reusó de materiales de desecho, de acuerdo a esto en la investigación se propuso la identificación de las prácticas nacionales e internacionales utilizadas para el manejo y usos de residuos industriales en la elaboración de mezclas asfálticas, donde a través de la revisión bibliográfica se pudieron identificar 41 practicas, de las cuales 37 corresponden a prácticas a nivel internacional y 4 corresponden a prácticas desarrolladas en Colombia. De acuerdo a las publicaciones de los diferentes autores la tendencia a investigar y desarrollar mezclas asfálticas modificadas o con agregados que sustituyen los materiales originales viene a partir del año 2015, y que en el último año este tipo de investigaciones ha venido en aumento ya que la mayoría de las practicas analizadas se centran en el año 2020. En cuanto a distribución geográfica del desarrollo de estas prácticas, se encontró que China lleva gran ventaja en este tipo de investigaciones para ser aplicación, ya que es el país donde más se ha ahondado sobre este tema, con un total de 12 investigaciones, cabe destacar que dentro de los países que más investigaciones ha implementado acerca de este tema es Colombia con tres investigaciones al igual que India e Irán.

En cuanto a los resultados de la caracterización de la practicas identificadas, cada articulo especifica el material que uso y que a tipo de mezcla asfáltica se incorporaría donde se establecieron seis tipos; de acuerdo con esto se realiza la caracterización de las experiencias y buenas prácticas internacionales llevadas a cabo para manejos, reciclado y reusó de materiales para la elaboración de mezclas asfálticas de acuerdo con el tipo de residuo y la actividad económica que lo produce. Para los diferentes tipos de asfaltos se pudo determinar que para el cual es más común el desarrolló de prácticas de incorporación de materiales es para el asfalto calientes, dentro del cual se caracterizaron 13 practicas del total. Cabe resaltar que la práctica de mayor ejecución dentro de los diferentes tipos de asfaltos es la de reutilizar y aprovechar los neumáticos en todas sus formas y todos sus componentes; de igual manera para a incorporación de estos materiales dentro de las mezclas no se hallaron técnicas innovadoras, ya que en su gran mayoría se realizan de la manera tradicional.

Finalmente se establecieron los materiales más comunes a ser reciclados en mezclas asfálticas donde se encontró que en ocho estudios se encontró el uso de neumáticos dentro de mezclas asfálticas, ya sea en migajas, molido, liquido, entre otros. Otro material muy común dentro de las investigaciones (4) fue el Pavimento asfaltico recuperado denominado RAP. La industria metalúrgica genera grandes desechos, entre los materiales a reciclar se encuentran fibras metálicas, escorias y polvos producidos por los hornos de arco eléctrico y cuchara. En cuanto a la construcción se encuentra el hormigón reciclado, concreto y desechos provenientes de las demoliciones que son usados como áridos en las mezclas asfálticas. En cuanto a la idoneidad de uso de estos materiales se puede resaltar que brinda mejora el rendimiento de los surcos y minimizan el impacto ambiental.

10 Conclusiones

Como conclusión general, se puede decir que, si es posible generar estrategias sostenibles en el ámbito de la ingeniería Civil en cuanto a diseño e implementación de mezclas asfálticas mediante el reciclaje de residuos industriales, esto sustentado en los 41 artículos analizados, los cuales mostraron prácticas y resultados positivos de desarrollo de pavimentos basados en el reciclaje de residuos.

Estas prácticas son desarrolladas a nivel mundial, sin embargo se encontró una gran tendencia de investigación en China y Europa, caso contrario a nivel América en el cual solo en Latinoamérica se desarrollan iniciativas para la implementación de residuos en el desarrollo de su infraestructura vial, situación preocupante, ya que actualmente los países de este continente están en constante crecimiento, lo que genera grandes desechos y grandes construcciones viales en lo que debe haber una balanza.

Dentro de los principales materiales identificados para su reutilización en mezclas asfálticas resaltan tres, los cuales son los residuos de neumáticos procesados o sin procesar, los residuos de concreto u hormigón, y la recuperación del mismo asfalto que ha culminado su vida útil. En su gran mayoría, los estudios han evaluado el uso de estos tres materiales en la incorporación de construcción de carreteras sostenibles en diversos países, obteniendo no solo resultados de comportamientos Fisicoquímicos aceptables sino también un aporte ambiental, económico y social.

Teniendo en cuenta el tipo de material utilizado a nivel mundial, se procedió a realizar una caracterización del mismo, donde se pudo establecer la idoneidad de este en diferentes tipos de mezclas asfálticas, ya que su rendimiento depende de esto. Se identificaron seis tipos de asfaltos y dentro de cada uno de ellos se especificó qué tipo de material puede ser reutilizado que

le brinde un buen comportamiento, garantice su durabilidad en pro de retardar el desgaste y envejecimiento.

A partir de los diferentes materiales identificados se pudo conocer las propiedades e idoneidad que estos brindan a las mezclas asfálticas y en su gran mayoría esta se relaciona con una mejora en la sustitución de componentes tradicionales, como el betún, por polímeros; adaptación del rendimiento del pavimento utilizando materiales seleccionados para cumplir los requisitos de aumento del rendimiento; utilización de materiales tradicionales para reunir diferentes propiedades, y todo esto se ve reflejado en una disminución en costos y carga ambiental.

A través del desarrollo de esta investigación se pudo concluir que el uso de diversos desechos en mezclas asfálticas es una opción viable no solo ambientalmente sino también económica y de mejora, es por esto que debe ser más estudiada y aplicada, en pro de una infraestructura vial sostenible. El uso de neumáticos y pavimentos recuperados son los materiales más usados a nivel mundial, y brindan características beneficiosas a las diferentes mezclas en las cuales pueden ser empleados.

Bibliografía

- Acosta, L. H., Zapata, K. del C. J., Rodríguez, V. I. D., & Schroeder, R. H. A. (2018). Mezclas Asfálticas: Una Alternativa Para El Tratamiento De Residuos. *Kuxulkab'*, 23(46).
<http://www.revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/2555/1963>
- AEN. (2017). *Norma Española Mezclas bituminosas Métodos de ensayo Parte 35 : Mezclado en laboratorio*.
- Agudelo, G., Cifuentes, S., & Colorado, H. A. (2019). Ground tire rubber and bitumen with wax and its application in a real highway. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1048–1061.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.353>
- Ajam, H., Gómez-Meijide, B., Artamendi, I., & Garcia, A. (2018). Mechanical and healing properties of asphalt mixes reinforced with different types of waste and commercial metal particles. *Journal of Cleaner Production*, 192, 138–150.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.262>
- Al-Hdabi, A. (2016). Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler. *Construction and Building Materials*, 126, 544–551.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.070>
- Asfaltia. (2016). *Mezclas en frío*. <https://www.asfaltia.com/actividad/productos/mezclas-en-frio/>
- Asfaltia. (2018). *Mezclas templadas*. <https://www.asfaltia.com/actividad/productos/mezclas-templadas/>
- Behnood, A., Modiri Gharehveran, M., Gozali Asl, F., & Ameri, M. (2015). Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash. *Construction and Building Materials*, 96, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.021>

- Beycioğlu, A., Kaya, O., Yıldırım, Z. B., Bağrıaçık, B., Dobiszewska, M., Morova, N., & Çetin, S. (2020). Use of GRP pipe waste powder as a filler replacement in hot-mix asphalt. *Materials*, *13*(20), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma13204630>
- Cardona, R. ., & López, K. M. (n.d.). *Caracterización de un agregado reciclado de concreto (arc) para la construcción de la carpeta asfáltica de pavimentos flexibles*. Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia.
- Carpintero, K. (2020). *Stone Mastic Asphalt*. <https://es.scribd.com/document/452806736/Stone-Mastic-Asphalt>
- Chew, J. W., Poovaneshvaran, S., Mohd Hasan, M. R., Hamzah, M. O., Valentin, J., & Sani, A. (2020). Microscopic analysis and mechanical properties of Recycled Paper Mill Sludge modified asphalt mixture using granite and limestone aggregates. *Construction and Building Materials*, *243*, 118172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118172>
- Dulaimi, A., Shanbara, H. K., Jafer, H., & Sadique, M. (2020). An evaluation of the performance of hot mix asphalt containing calcium carbide residue as a filler. *Construction and Building Materials*, *261*, 119918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119918>
- Fakhri, M., Bahmai, B. B., Javadi, S., & Sharafi, M. (2020). An evaluation of the mechanical and self-healing properties of warm mix asphalt containing scrap metal additives. *Journal of Cleaner Production*, *253*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119963>
- Fatemi, S., & Imaninasab, R. (2016). Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials. *Construction and Building Materials*, *120*, 450–456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.117>
- Gao, J., Sha, A., Wang, Z., Tong, Z., & Liu, Z. (2017). Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing. *Journal of Cleaner Production*, *152*, 429–442.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.113>

Ge, D., Yan, K., You, Z., & Xu, H. (2016). Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene. *Construction and Building Materials*, *126*, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.014>

Gómez, E., Navas, D. F., Aponte, G., & Betancourt, L. (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *DYNA (Colombia)*, *81*(184), 158–163.

<https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.37066>

González, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L., & Schlangen, E. (2018). Effect of RAP and fibers addition on asphalt mixtures with self-healing properties gained by microwave radiation heating. *Construction and Building Materials*, *159*, 164–174.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.070>

Han, Z., Sha, A., Tong, Z., Liu, Z., Gao, J., Zou, X., & Yuan, D. (2017). Study on the optimum rice husk ash content added in asphalt binder and its modification with bio-oil. *Construction and Building Materials*, *147*, 776–789. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.004>

Islam, S. S., Ransinchung, G. D. R. N., & Choudhary, J. (2021). Analyzing the effect of waste jarosite as an alternative filler on the engineering properties of asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, *270*(xxxx), 121466.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121466>

Jamal, M., & Giustozzi, F. (2020). Low-content crumb rubber modified bitumen for improving Australian local roads condition. *Journal of Cleaner Production*, *271*, 122484.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122484>

Karakuş, A. (2011). Investigating on possible use of Diyarbakir basalt waste in Stone Mastic

- Asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3502–3507.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.043>
- Leonardo-Redes. (2018). *Los residuos en la industria*. <https://www.leonardo-gr.com/es/blog/los-residuos-en-la-industria>
- Liang, M., Sun, C., Yao, Z., Jiang, H., Zhang, J., & Ren, S. (2020). Utilization of wax residue as compatibilizer for asphalt with ground tire rubber/recycled polyethylene blends. *Construction and Building Materials*, 230, 116966.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116966>
- Liang, M., Xin, X., Fan, W., Sun, H., Yao, Y., & Xing, B. (2015). Viscous properties, storage stability and their relationships with microstructure of tire scrap rubber modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 74, 124–131.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.015>
- Liu, B., Li, J., Han, M., Zhang, Z., & Jiang, X. (2020). Properties of polystyrene grafted activated waste rubber powder (PS-ARP) composite SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 238, 117737. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117737>
- Loaiza, A., & Colorado, H. A. (2018). Marshall stability and flow tests for asphalt concrete containing electric arc furnace dust waste with high ZnO contents from the steel making process. *Construction and Building Materials*, 166, 769–778.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.012>
- López, M. G. (2014). *ESTADO DEL ARTE SOBRE EL USO DE RESIDUOS Y SUB-PRODUCTOS INDUSTRIALES EN LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS*. 394.
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt394.pdf>
- METAUTE, D. M., & OROZCO, D. M. (2009). DESARROLLO DE UNA MEZCLA

ASFÁLTICA UTILIZANDO RESIDUOS PLÁSTICOS. *UNIVERSIDAD EAFIT*, 2(5), 255.

???

Modarres, A., Rahmanzadeh, M., & Ayar, P. (2015). Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: Mix mechanical properties and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 91, 262–268.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.078>

Monu, K., R. N., G. R., Pandey, G. S., & Singh, S. (2020). Performance Evaluation of Recycled-Concrete Aggregates and Reclaimed-Asphalt Pavements for Foam-Mix Asphalt Mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(10), 04020295.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003356](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003356)

Navarrete Schettini, G. A. (2019). Diseño de mezclas asfálticas integrando residuos sólidos de la industria automovilística (elastómero) y de vías (pavimento asfáltico envejecido) en Manabí, Ecuador. *Industrial Data*, 22(1), 23–38. <https://doi.org/10.15381/idata.v22i1.16523>

Oluwasola, E. A., & Hainin, M. R. (2016). Evaluation of Performance Characteristics of Stone Mastic Asphalt Incorporating Industrial Waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 06016016. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001595](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001595)

Padhan, R. K., & Sreeram, A. (2018). Enhancement of storage stability and rheological properties of polyethylene (PE) modified asphalt using cross linking and reactive polymer based additives. *Construction and Building Materials*, 188, 772–780.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.155>

Poulikakos, L. D., Papadaskalopoulou, C., Hofko, B., Gschösser, F., Cannone Falchetto, A., Bueno, M., Arraigada, M., Sousa, J., Ruiz, R., Petit, C., Loizidou, M., & Partl, M. N. (2017). Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road

construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 32–44.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.008>

Quiroz, D. P., & López, A. T. (2013). Pavimentos Porosos como sistemas Alternativos al Drenaje Urbano. *Pontificia Universidad Javeriana*, 114.

Qurashi, I. A., & Swamy, A. K. (2018). Viscoelastic Properties of Recycled Asphalt Binder containing Waste Engine Oil. *Journal of Cleaner Production*, 182, 992–1000.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.237>

Rahman, M. T., & Mohajerani, A. (2020). Use of bitumen encapsulated cigarette butts in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 261, 120530.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120530>

Sanchez-Cotte, E. H., Fuentes, L., Martinez-Arguelles, G., Rondón Quintana, H. A., Walubita, L. F., & Cantero-Durango, J. M. (2020). Influence of recycled concrete aggregates from different sources in hot mix asphalt design. *Construction and Building Materials*, 259,

120427. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120427>

Sayadi, M., & Hesami, S. (2017). Performance evaluation of using electric arc furnace dust in asphalt binder. *Journal of Cleaner Production*, 143, 1260–1267.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.156>

Skaf, M., Ortega-López, V., Fuente-Alonso, J. A., Santamaría, A., & Manso, J. M. (2016). Ladle furnace slag in asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 122, 488–495.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.085>

THENOUX, G., & JAMET, A. (2015). *TECNOLOGÍA DEL ASFALTO ESPUMADO Y DISEÑO DE MEZCLA*. 1–27.

Torres, D., Mosquera, L., Torres, S., Gallego, S., & Alvarez, F. (2019). Estudio preliminar sobre

el aprovechamiento de escoria de fundición de plomo secundario en la obtención de mezclas asfálticas. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 1–13.

Torres, R., Flores, P., Flores, M., Flores, V., & Mairon, K. (2014). Mezclas asfálticas con materiales reciclados de construcción y demolición para la reparación de pavimentos. *Artículo Revista De Aplicaciones de La Ingeniería Diciembre*, 1(1), 1–7.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4883700>

Vila-Cortavitarte, M., Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M. Á., & Indacoechea-Vega, I. (2018). Analysis of the influence of using recycled polystyrene as a substitute for bitumen in the behaviour of asphalt concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1279–1287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.232>

Wozuk, A., Wróbel, M., & Franus, W. (2019). Influence of waste engine oil addition on the properties of zeolite-foamed asphalt. *Materials*, 12(14).
<https://doi.org/10.3390/ma12142265>

Wróbel, M., Wozuk, A., Ratajczak, M., & Franus, W. (2021). Properties of reclaimed asphalt pavement mixture with organic rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 271(xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121514>

Xie, J., Wu, S., Zhang, L., Xiao, Y., Liu, Q., Yang, C., & Nie, S. (2017). Material characterization and performance evaluation of asphalt mixture Incorporating basic oxygen furnace slag (BOF) sludge. *Construction and Building Materials*, 147, 362–370.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.131>

Yan, K. Z., He, W., Chen, M., & Liu, W. (2016). Laboratory investigation of waste tire rubber and amorphous poly alpha olefin modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 129, 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.090>

- Yuliestyan, A., Gabet, T., Marsac, P., García-Morales, M., & Partal, P. (2018). Sustainable asphalt mixes manufactured with reclaimed asphalt and modified-lignin-stabilized bitumen emulsions. *Construction and Building Materials*, *173*, 662–671.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.044>
- Zhang, J., Yan, Y., Hu, Z., Fan, X., & Zheng, Y. (2018). Utilization of low-grade pyrite cinder for synthesis of microwave heating ceramics and their microwave deicing performance in dense-graded asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, *170*, 486–495.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.175>
- Zhang, Y., Leng, Z., Zou, F., Wang, L., Chen, S. S., & Tsang, D. C. W. (2018). Synthesis of zeolite A using sewage sludge ash for application in warm mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, *172*, 686–695. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.005>
- Zhu, J., Ma, T., & Dong, Z. (2020). Evaluation of optimum mixing conditions for rubberized asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, *234*, 117426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117426>
- Zúñiga, R. (2015). Mezcla Asfáltica en caliente. *Ministerio de Obras Publicas*, 52.
<http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/MezclasAsfálticas.pdf>

