	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	08-07-2021	B
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		1(1)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Yeison Andrés Rincón Mora – Camila Andrea Güillín Navarro		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Civil		
DIRECTOR	Katherine Carreño García		
TÍTULO DE LA TESIS	Evaluación de la incidencia de las escorias de cobre y acero en el comportamiento mecánico de mezclas densas en caliente con restos de pavimentos recuperados.		
TITULO EN INGLES	Evaluation of the impact of copper and steel slag on the mechanical behavior of hot dense mixtures with recovered pavement remains.		
RESUMEN (70 palabras)			
<p>En esta monografía se analizaron las incidencias de las escorias de cobre y acero en el comportamiento mecánico de mezclas densas en caliente con restos de pavimentos recuperados. Para ello se realizó un estado del arte sobre los diversos estudios y metodologías que actualmente se están realizando para la disminución de material virgen en pavimentos convencionales, para que de esta manera su impacto sobre el medio ambiente sea menor.</p>			
RESUMEN EN INGLES			
<p>In this monograph, the incidences of copper and steel slag on the mechanical behavior of hot dense mixtures with recovered pavement remains were analyzed. For this, a state of the art was carried out on the various studies and methodologies that are currently being carried out for the reduction of virgin material in conventional pavements, so that in this way their impact on the environment is less.</p>			
PALABRAS CLAVES	Pavimento, RAP, Mezclas densas, Escorias de cobre, Escorias de acero.		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Pavement, RAP, Dense mixtures, Copper slag, Steel slag.		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 66	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 11	CD-ROM: 0



Evaluación de la incidencia de las escorias de cobre y acero en el comportamiento mecánico de mezclas densas en caliente con restos de pavimentos recuperados.

Camila Andrea Güillín Navarro

Yeison Andrés Rincón Mora

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Civil

Msc. Katherine Carreño García

Noviembre 2021

Resumen

Esta monografía se llevó a cabo para estudiar las incidencias de las escorias de cobre y acero en el comportamiento mecánico de mezclas densas en caliente con restos de pavimentos recuperados. Para ello se realizó un estado del arte sobre los diversos estudios y metodologías que actualmente se están realizando para la disminución de material virgen en pavimentos convencionales, para que de esta manera su impacto sobre el medio ambiente sea menor. Donde la utilización de RAP presenta una disminución en el consumo de energía, además de que conserva los recursos naturales y ayuda a disminuir la cantidad de residuos o escombros de construcción que son trasladados a los vertederos. Además, consistió en el estudio de las características químicas de los materiales y el comportamiento de las mezclas densas en caliente en donde se realizó una búsqueda detallada de diferentes estudios y ensayos realizados a nivel internacional por diversos autores.

Palabras clave: pavimento, RAP, mezclas densas, escorias de cobre, escorias de acero.

Abstract

This monograph was carried out to study the effects of copper and steel slags on the mechanical behavior of dense hot mixtures with recovered pavement remains. For this, a state of the art was carried out on the various studies and methodologies that are currently being carried out for the reduction of virgin material in conventional pavements, so that in this way its impact on the environment is less. Where the use of RPA presents a decrease in energy consumption, in addition to conserving natural resources and helping to reduce the amount of waste or construction debris that is transferred to landfills. In addition, it consisted of the study of the chemical characteristics of the materials and the behavior of dense hot mixtures, where a detailed search of different studies and tests carried out at an international level by various authors was carried out.

Keywords: pavement, RAP, dense mixes, copper slag, steel slag.

ÍNDICE

1. Introducción.....	9
2. Generalidades	11
2.1. Título de la monografía	11
2.2. Planteamiento del problema	11
2.3. Objetivo	14
2.4. Justificación.....	14
2.5. Metodología.....	16
3. Estado del arte	17
3.1. Antecedentes en el uso de escorias de acero y cobre en mezclas con RAP	17
3.1. Escorias de alto horno.....	19
3.1.1. Escoria cristalizada.....	20
3.1.2. Escoria granulada	21
3.2. Uso de escorias de alto horno	22
3.3. Escoria de cobre.....	23
3.4. Pavimento asfáltico reciclado (RAP)	24
3.5. Tipos de mezclas asfálticas según su temperatura.....	25
3.5.1. Mezclas en frío	26
3.5.2. Mezclas en caliente	26
3.6. Mezclas asfálticas según porcentaje de vacíos	27

4.	Desarrollo de la evaluación de la incidencia de las escorias de cobre y acero en el comportamiento mecánico de mezclas densas en caliente con restos de pavimentos recuperados.	
		28
4.1.	Características mecánicas de mezclas densas en caliente con escorias de cobre RAP.	28
4.1.1.	Estabilidad y Flujo Marshall	31
4.1.2	Índice de rigidez Marshall	35
4.1.2.	Índice de tracción indirecta y modulo resiliente	36
4.2.	Investigaciones complementarias sobre mezclas con RAP y EC	37
4.3.	Mezcla asfáltica con RAP y uso de aditivos.....	41
4.4.	Utilización de escorias de acero en mezclas asfálticas con RAP	44
5.	Estudio de las características físicas y químicas de los materiales y el comportamiento de las mezclas densas en caliente.	46
5.1.	Composición de las escorias de alto horno.....	46
5.1.1.	Propiedades físicas.....	46
5.1.2.	Propiedades mecánicas.....	47
5.2.	Composición de las escorias de cobre	48
5.2.1.	Composición física.....	49
5.2.2.	Composición cristaloquímica.....	49
6.	Análisis costo-beneficio	50
7.	Análisis de resultados.	55

8. Conclusiones.....	57
Referencias.....	59

Lista de figuras

Figura 1 Escoria de alto horno	20
Figura 2 Escoria cristalizada	21
Figura 3 Escoria granulada	22
Figura 4 Escorias de cobre	24
Figura 5 RAP retirado y triturado	25
Figura 6 Estabilidad Marshall	33
Figura 7 Fluencia Marshall	33
Figura 8 Índice de rigidez Marshall	35
Figura 9 Modulo vs Temperatura de Compactación.....	41
Figura 10. Alternativas de rehabilitación INVIAS	53
Figura 11. Alternativas de rehabilitación INVIAS	53

Lista de tablas

Tabla 1 Aplicaciones de las escorias de alto horno	23
Tabla 2 Mezclas asfálticas según porcentaje de vacíos	27
Tabla 3 Propiedades físicas de la escoria cristalizada	47
Tabla 4 Propiedades mecánicas de la escoria de Acero	48
Tabla 5 Principales características física de la escoria de cobre.....	49
Tabla 6 Elementos químicos encontrados.....	49
Tabla 7 Alternativas de rehabilitación.....	51
Tabla 8 Costos totales de Producción de mezclas asfálticas con 0%, 10% y 20% de RAP	52
Tabla 9 Análisis comparativo de resultados	56

1. Introducción

En la actualidad las tendencias de la construcción están enfocadas en disminuir el uso de materias primas en las diferentes estructuras civiles. Esto se puede llevar a cabo implementando métodos de reciclaje donde se involucran varios tipos de materiales a los cuales ha sido difícil encontrarles un uso luego de su vida útil.

La fabricación del acero genera un gran aumento de residuos, habitualmente resultantes de los procesos de fundición y enfriamiento. Estos residuos se deben clasificar y acopiar en un lugar de la fábrica. Dado la magnitud de los residuos, se hace necesario utilizar grandes extensiones para el almacenamiento, dando como consecuencia un sobrecoste para la elaboración del acero. Este subproducto del proceso de producción del acero es común conocerlo como escoria siderúrgica (Arquitectura en Acero, 2019).

Haciendo enfoque a la producción de acero regional, Colombia es uno de los países en los que se produce acero en altas cantidades. El sector siderúrgico del Comité Colombiano de Productores de Acero de la ANDI, muestra en el último informe que en 2018 se produjeron 1.234 millones de toneladas de acero, siendo entre el 0,1 y 0,3 % de la producción total considerados como escorias (Agencia de Noticias UN, 2019).

Por otro lado, la escoria de acero y la escoria de cobre son una mezcla de óxidos metálicos producidos por el proceso de fundición de estos metales. La escoria se clasifica como residuo generado por la depuración de cobre y acero, lo que genera una gran cantidad en los vertederos de la fundición (Sánchez , 2004).

El pavimento de asfalto recuperado (RAP) tiene ventajas: en términos de economía, reduce la demanda de extracción y transporte de áridos y asfalto crudo. En cuanto al medio

ambiente, reduce la necesidad de extracción de materiales no renovables, reduce el consumo de energía asociado a la extracción y transporte de materias primas y reduce la actividad de desechar materiales en los basureros (Castro Cabeza, 2018).

En el método convencional proporcionar una superficie de asfalto en un pavimento flexible requiere de mucha energía para producirse, secar el agregado y luego producir la mezcla de asfalto en una planta de mezcla en caliente. El asfalto, el calentamiento de agregados y la producción de grandes cantidades de HMA (Hot Mix Asphalt) liberarán una proporción considerable de gases de efecto invernadero y contaminantes nocivos (Taborda Calvo, 2019).

Actualmente, existen varios métodos para el reciclaje de carreteras en Colombia, pero solo dos de estos se encuentran reglamentados; uno es el reciclaje de carreteras en frío utilizando ligante de asfalto y asfalto espumado, y el otro es el reciclaje de carreteras en caliente que está regulado por las normas técnicas colombianas INVIAS 461-07 e INVIAS 462-07. Hoy por hoy, la cantidad máxima de pavimento de asfalto reciclado (RAP) permitida en Colombia es del 40%. En Colombia, el objetivo principal del RAP (Pavimento asfáltico reciclado) es formar una base estable, y en menor medida, se ha utilizado para formar capas de asfalto, que rara vez se utiliza. Es por ello, que se requiere hacer una evaluación del RAP en mezclas en caliente que nos permita identificar las características mecánicas, y conocer las principales variaciones que puedan presentar entre las distintas muestras. (Buitrago & González, 2016).

Con esta monografía, se realizó el planteamiento de una metodología viable para la inclusión de escorias de acero y escorias de cobre en mezclas que contienen pavimentos recuperados, específicamente en el manejo, implementación y diseño de la estabilización de la estructura reciclada. También, se analizaron los beneficios ambientales y económicos que se obtienen al implementar el reciclaje de pavimentos flexibles.

2. Generalidades

2.1. Título de la monografía

Este documento consiste en una monografía de compilación que tiene como título:
“Evaluación de la incidencia de las escorias de cobre y acero en el comportamiento mecánico de mezclas densas en caliente con restos de pavimentos recuperados”.

2.2. Planteamiento del problema

La construcción y reconstrucción de carreteras se basa principalmente en la remoción de materiales existentes y su reemplazo por nuevos materiales de mejor desempeño, la mayoría de los cuales incluyen la aplicación de mezcla asfáltica en caliente. Sin embargo, se vienen indagando diferentes métodos para reducir los costos y el daño ambiental causado por estas prácticas, incluido el reciclaje de pavimentos asfálticos (RAP). Al utilizar el pavimento asfáltico reciclado en nuevas construcciones de vías con estructura flexible es la manera más eficiente de recuperar el asfalto. Por eso es necesario tener en cuenta las condiciones de recolección y acopio del material, considerando su procedencia y su clasificación homogénea de modo que no produzca segregación de materiales ni contaminación del mismo. Los residuos de pavimentos también representan una problemática, dado el gran volumen de desechos sólidos que se producen año a año. El costo para la gestión y recolección de estos residuos se encuentra en aumento, llegando a ser un problema de salud pública y social.

Las características del pavimento asfáltico reciclado son inciertas, esto debido a su alto porcentaje de variabilidad y texturas, dependiendo de la composición inicial de la mezcla de origen, el tiempo de uso y el tráfico que pueda soportar, su deterioro, calidad de la mezcla asfáltica, tamaño de partícula y otros factores afectan su desempeño y métodos de

procesamiento, para obtener un cierto tipo nuevo de mezcla asfáltica (Leiva Villacorta & Vargas Nordcbeck, Revista Infraestructura Vial, 2017).

En Bogotá, el centro de acopio del IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) cuenta con mucho material recuperado, que, aunque se está usando, no se hace en un alto porcentaje; teniendo así mucho terreno ocupado con este material y el cual se encuentra en malas condiciones de almacenamiento, puesto que está a la intemperie y contaminado, aumentando así la variabilidad que ya presentan los pavimentos recuperados. De esto nace la necesidad de poder crear estrategias que generen confianza a entidades públicas como privadas y así aumentar su participación en el uso de estas tecnologías. Además de proporcionar un análisis físico y mecánico de las mezclas que incluyen pavimentos recuperados y escorias siderúrgicas, es necesario mostrar un informe detallado de todas las variables que logran disminuir el costo, pero conservando calidad, desempeño y duración (Claro, 2020).

El uso de RAP también presenta una disminución en el consumo de energía, además de que conserva los recursos naturales y ayuda a disminuir la cantidad de residuos o escombros de construcción que son trasladados a los vertederos. Una investigación realizada para el Departamento de Transporte del Estado de Nueva York, haciendo uso de distintos modelos matemáticos que analizan la combinación de el secado, calentamiento, transporte, procesamiento y energía térmica, sobre el impacto energético del uso de RAP. Se encontró que, al implementarlo, se puede ahorrar mucha energía, y este consumo energético se ve afectado directamente por la humedad, el porcentaje de pavimento recuperado que sea utilizado y la temperatura de descarga de la mezcla (National Technology Development, 2009).

La reparación eficaz del pavimento de asfalto a veces requiere la eliminación de la capa de asfalto envejecida. Si las entidades de transporte y las industrias, aún no han encontrado la

tecnología adecuada para optimizar el uso del RAP, el costo de reparación de los pavimentos de asfalto aumentará considerablemente para cubrir el costo de desechar los materiales no reciclados. Por lo tanto, el uso efectivo de RAP resuelve un problema ambiental más amplio porque el material no ocupa espacio de relleno sanitario. (Reyes Curcio, Pellegrini Blanco, & Reyes Gil, 2015).

En el campo de las escorias, se utilizan distintos métodos metalúrgicos para la obtención y restauración de metales, y en el proceso de cada uno de estos distintos métodos se producen residuos inevitables, como la formación de escoria, ya que el contenido de metales es el más bajo y los residuos finales se consideran relativamente altos para otras industrias (Lovera Davila, Arias, & Coronado, 2004).

Por su parte las escorias también representan una problemática, son consideradas un pasivo ambiental. Se ha planteado con anterioridad, explotar estas escorias como sustitutas del material granular más convencional, usado para la estructura del pavimento. Reemplazar las arenas y gravas por escorias representa un gran privilegio desde distintos puntos de vista: Para la producción siderúrgica, representa menores centros de almacenamiento, lo que conlleva un ahorro para la fábrica y una posibilidad económica de comercio, si la demanda de escorias se ve altamente elevada. En el medio ambiente supone una disminución de la explotación de las canteras. (León & Ramírez, 2010).

Una vez analizada la necesidad del reciclaje de estos materiales y de las ventajas ya conocidas. La realización de esa investigación toma un papel muy importante, teniendo en cuenta que con las tecnologías convencionales que se utilizan hoy en día para la rehabilitación de pavimentos flexibles, no se está dando una solución eficaz y completa a la problemática ambiental, pues en Colombia, aunque se realiza el almacenamiento de los pavimentos, este no se

hace de una manera correcta, puesto que, lo ubican a la intemperie y sin realizar una granulometría o separación por tamaños que permita organizarlo de una manera óptima. Debido a esto se pretende indagar y analizar los recursos que brindan una posible solución a estos problemas, poniendo en práctica un grupo de técnicas para el reciclado de pavimentos flexibles.

2.3. Objetivo

Realizar la recopilación de información existente sobre el uso de RAP (pavimentos recuperados) donde además se añada porcentajes de escorias de cobre y acero, para analizar las propiedades finales de una mezcla densa en caliente de asfalto que contenga los materiales mencionados, concluyendo así, las ventajas económicas, ambientales y de construcción.

2.4. Justificación

Las investigaciones que tratan las técnicas de mantenimiento de vías, reducción de los costos de construcción, de recurso humanos y maquinaria a usar, ha traído consigo alternativas como la de reutilizar los materiales que conforman al pavimento, mezclándolos con otros productos, dando origen así, a lo que se conoce como reciclaje de material.

Una metodología bastante usada en Colombia, es realizar estudios basados en la importancia y factibilidad de utilizar determinada tecnología, todos tienden a realizar pruebas mecánicas basadas en la experiencia y utilizan RAP para diseñar mezclas asfálticas, donde se selecciona la cantidad de asfalto y áridos. Y se escogen los aditivos que mejor desempeño presentan, mediante ensayo y error o mediante tablas relacionadas con propiedades determinadas, y deberá seleccionarse la cantidad de materiales que producirá un buen desempeño. (Esparza Villaba, 2015).

El material bituminoso recuperado en el proceso de reparación o reconstrucción se puede volver a utilizar como mezcla asfáltica para complementar el ligante. Aumentar la utilización del pavimento de asfalto recuperado en la elaboración y restauración de pavimentos se ha convertido en una técnica importante que puede ayudar a disminuir los costos de las materias primas y obtener una mejor sostenibilidad de la infraestructura durante su vida útil. El uso de RAP puede reducir los costos relacionados con los materiales y el transporte de los mismos (Leiva Villacorta & Vargas Nordbeck, Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP), 2017).

Se estima, “que un ahorro de hasta un 34 % podría ser generado para mezclas que contienen hasta un 50 % de RAP” (Kandhal & Mallick, 1997). Un análisis realizado por el Departamento de Transportes de Indiana, determinó mediante un análisis beneficio-costos, que se puede alcanzar un ahorro en materiales cercano a los \$ 330,000 USD al año, cuando es añadido un 5 % de RAP a una cantidad cercana a los 5 millones de toneladas de material de base (McDaniel & Nantung, 2005).

Minimizar la humedad en lugar de acopio de los pavimentos de asfaltos reciclados es fundamental para la calidad de la mezcla y la eficiencia de la planta. Si el material reciclado tiene un alto contenido de humedad, debe convertirse en vapor antes de que el aglutinante asfáltico se pueda calentar lo suficiente como para reactivarlo. (Copeland, 2011).

2.5. Metodología

El área de estudio de la presente monografía es la construcción eco-sostenible, proporcionando estrategias de mejora para reducir y minimizar el impacto ambiental que actualmente afecta al ecosistema de la infraestructura vial, esto, mediante el análisis de las ventajas del uso de pavimentos recuperados más un determinado porcentaje de escorias de acero y cobre respectivamente.

La metodología usada para esta monografía es de tipo cualitativa, empleando un metaanálisis, la cual consiste en reunir información teórica y experimental, a cerca de materiales como, los residuos de pavimentos, escorias de cobre y escorias de acero, todo esto aplicado al campo de la ingeniería civil y el ámbito eco-sostenible. Para eso tendremos en cuenta artículos científicos, así como también, tesis, maestrías y diferentes textos publicados por personas referentes a este tema. Haciendo uso de la información precisa que encontremos en dichos documentos. Realizando además un estudio de tipo descriptivo y cualitativo, utilizando técnicas como el metaanálisis para la organización y manejo de la información.

3. Estado del arte

3.1. Antecedentes en el uso de escorias de acero y cobre en mezclas con RAP

En el sector de pavimentación asfáltica existe más vivencia con la implementación de escorias de acero, arrojando resultados convincentes cuando ha sido usada en capas granulares. Por causa del proceso siderúrgico de generación de las dos escorias, sus características mecánicas resultan semejantes. Hay varias evidencias con el uso de escorias de cobre como reemplazo del agregado fino en la construcción de pavimentos asfálticos, arrojando resultados satisfactorios en incorporaciones que van a partir del 5% al 30%. No obstante, hay varias contradicciones referentes a los resultados de seguridad, debido a que en varias averiguaciones esta propiedad se incrementa al añadir la escoria, en lo que en otras reduce este parámetro (Hossam & Klalifa, 2010).

Cerca de 19 millones de toneladas de cobre se crean anualmente a nivel internacional. Por la fabricación de una tonelada de cobre, se obtiene a una concentración entre 2 y 2.5 toneladas de escoria de cobre (EC), esto se traduce en una producción anual estimada de cerca de 42 millones de toneladas de escoria de cobre (Gorai & Jana, 2003). Por los principios y formación de este residuo, que tiene metales pesados como hierro, aluminio, cobre, níquel o plomo, todos en su forma metálica u oxidado, se clasifica como inseguro con alto riesgo ambiental, en particular si se tiene presente su potencial de lixiviación. Este residuo tiene actualmente un uso industrial mínimo, por lo que es necesario modificar este subproducto en un elemento eficaz para diferentes áreas de construcción, reduciendo su acumulación y tratándolo para eludir la contaminación asociada a la lixiviación. Esto además reduce la implementación de nuevos agregados y la explotación de recursos naturales (Vítková, Etle, Mihaljevič, & Šebek, 2011).

El EC tiene propiedades incluso superiores a los agregados tradicionales si se procesa de manera correcta, se enfría al aire y se tritura, con alta angularidad, resistencia al desgaste, alta densidad y propiedades hidrofóbicas (Dhir, Brito, Mangabhai, & Lye, 2017), lo que lo convierte en una elección correcta como sustituto añadido para mejorar las propiedades mecánicas tanto de pavimentos de hormigón como también los de asfalto. Su viabilidad como árido ha sido probada en hormigones de alta resistencia, mejorando su comportamiento mecánico y durabilidad a incorporaciones del 20% (Al Jabri, Taha, Al Hashmi, & Al Harthy, 2006). Además, se ha estudiado su uso como cemento, obteniendo resultados favorables para incorporaciones entre el 5% y el 10%. Ciertos estudios han evaluado la implementación de EC en mezclas asfálticas, utilizando el tamaño fino de este material como reemplazo de agregados (Zain, Islam, Radin, & Yap, 2004).

Las mezclas asfálticas que integran RAP, poseen ventajas que van ligadas a la reutilización de este material. Es relevante el uso de un correcto procedimiento, pues estas mezclas poseen inconvenientes asociados a la durabilidad debido al envejecimiento del ligante presente en el material. Por medio de la implementación de escorias de cobre tienen la posibilidad de solucionar parte de dichos problemas debido a las características físicas y químicas que tienen, como la alta angulosidad, la existencia de cal y su bajo contenido en sílice, brindando una alta adhesividad y fricción. Así además se disminuyen los inconvenientes asociados a la acumulación de escorias de cobre y su lixiviación (Raposeiras Ramos, Movilla Quesada, Vargas Cerón, Bilbao Novoa, & Cifuentes Cadagan, 2016).

3.1. Escorias de alto horno

Las escorias de alto hornos son en esencia una mezcla de silicatos de calcio y aluminosilicatos, principalmente enfriados al aire o por medio de chorros de agua, construyendo esta última, una escoria granular (Crossin, 2015). La escoria de alto horno se ha usado exitosamente en muchas naciones de todo el mundo, obteniendo varios beneficios tecnológicos en las industrias de la obra. En la literatura se reportan diversos estudios involucrados con la integración de escoria de alto horno en la preparación de concreto, geopolímeros, vitrocerámicas, vidrios y tejas (Angulo, Mejía, & Puertas, 2017).

Las escorias de alto horno son un subproducto que se genera en la producción del hierro fundido, en esencia está constituida de silicatos y aluminosilicatos de calcio y entre otros (Siddique, 1971). Principalmente, la escoria de alto horno es calificada como material puzolánico, ya que solo presenta características cementosas cuando se combina con otros derivados cementantes, los cuales son necesarios para su activación química (Malhotra & Mehta, 1996). Algunos autores la definen como cemento hidráulico latente, porque presenta componentes semejantes a los óxidos que encuentran en el cemento portland (alúmina, cal, y sílice), aunque están presentes en diferentes proporciones (Lea, 1971).

En la industria siderúrgica se generan cuatro tipos de escorias, dependiendo del procedimiento utilizado para enfriarlas: la escoria de alto horno enfriada a temperatura ambiente (cristalizada); la escoria peletizada; la escoria expandida o espumada y la escoria de alto horno granulada (Malhotra & Mehta, 1996).

Figura 1
Escoria de alto horno



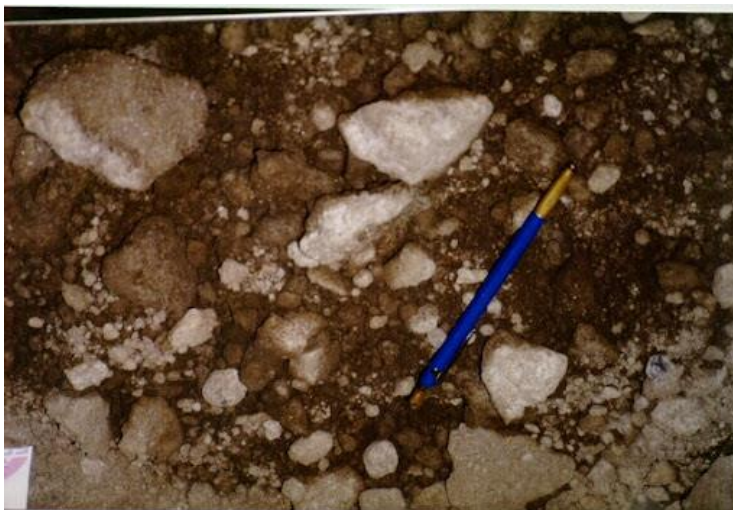
Fuente: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

Las escorias se pueden presentar en diferentes tamaños, igual que los agregados, de ahí parte la importancia de conocer también su granulometría.

3.1.1. Escoria cristalizada

Esta escoria proviene del enfriamiento controlado y lento de la escoria fundida, generando un material pétreo. Una vez enfriada, la escoria se transporta mediante camiones a la planta de trituración y cribado para su preparación en las granulometrías adecuadas. Tiene propiedades similares a las rocas ígneas de origen volcánico: predomina la forma cubica, color gris oscuro, textura rugosa y estructura con poros externos e internos. Generalmente tiene un tamaño de partícula de 0/200 y el porcentaje de absorción de agua es de aproximadamente 6%, aunque la escoria puede ser secada con facilidad (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2011).

Figura 2
Escoria cristalizada



Fuente: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

3.1.2. Escoria granulada

Es obtenida por enfriamiento brusco de la escoria fundida, se deja caer sobre un potente chorro de agua fría, para que se expanda y sirva el propio chorro como medio de transporte hasta las balsas de decantación. Este proceso se denomina granulación, porque la escoria se descompone en pequeñas partículas con aristas cortantes, de aspecto parecido a una arena. La granulación vitrifica la escoria, convirtiéndola en un sólido cuyos átomos no han tenido tiempo de orientarse al estado cristalino por la rapidez del enfriamiento. Esta escoria es procesada con un secado previo y luego llevada a un molino rotatorio de bolas, hasta que se convierte en un polvo bastante fino, conocido como cemento de escoria de alto horno de grano molido (GGBS). La escoria granular tiene tamaños de partícula que están entre 4 y 15 mm, y después de la trituración, tiene un diámetro de menos de 45 μm y una superficie específica de 400 a 600 m^2 / kg , este polvo podría usarse como cemento hidráulico latente. Luego de la trituración resulta un polvo un poco más claro que el cemento portland, aportando una coloración más clara al

concreto y le ofrece una distribución de área más suave comparado con la del concreto con cemento portland (Lea, 1971).

Figura 3
Escoria granulada



Fuente: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

3.2. Uso de escorias de alto horno

Las escorias de alto horno pueden tener diferentes aplicaciones dependiendo del tipo de las mismas, y se usan en distintos campos de la construcción. En la tabla 1, se muestran los usos más comunes que han sido dados a las escorias de alto horno. Cabe mencionar que algunos de estos usos aún son tema de investigación (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2011).

Tabla 1
Aplicaciones de las escorias de alto horno

Escorias de alto horno	
Cristalizada	Granulada
Aglomerado asfáltico.	Cemento con adiciones Suelo-cemento
Agregado para Hormigón Aislamiento/lana mineral.	Hormigón compactado con rodillo
Materia prima para la fabricación de cemento.	Base de carreteras Agricultura/Mejora del suelo
Mejora del suelo /Agricultura. Relleno.	

Fuente: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

3.3. Escoria de cobre

La escoria de cobre se define como un producto derivado de la producción de cobre que está formado primordialmente de metales pesados. La gran proporción de este material acumulada internacionalmente conlleva un grave riesgo medioambiental. Su uso como sustituto de áridos minerales en mezclas asfálticas permitiría aumentar la durabilidad y resistencia, aprovechando sus características físico-químicas (Raposeiras, Movilla Quesada, Bilbao Novoa, Cifuentes, & Ferrer Norambuena, 2018).

La escoria de cobre (EC) desde un inicio fue catalogada como un desecho industrial, siendo depositada en los alrededores de las plantas de fundición. Por cada tonelada de cobre se genera cerca de 2,2 toneladas de EC que ha llevado a monumentales acumulaciones que crecen día a día y que solo en la situación de Chile superan los 50 millones de toneladas. Si bien se considera un pasivo ambiental, los metales pesados que tiene tienen la posibilidad de ser sensibles de producir inconvenientes de lixiviación gracias a la alta toxicidad que tienen la posibilidad de exponer los metales como el Cu, Pb, Hg y SO₂, más que nada si permanecen presentes en tamaños bastante finos (Davenport, King, Schlesinger, & Biswas, 2002).

Para subsanar en cierta forma este problema, diferentes sectores han usado este material en procesos bastante diversos, a partir de su implementación en procedimiento de aguas contaminadas con ácido carbónico (fenol), hasta su implementación en el área de la construcción, beneficiándose de las características de resistencia al desgaste, angulosidad, alta densidad y su propiedad hidrófila neutralizando el poder de toxicidad de los metales presentes en la EC. En otro caso, se utilizaron como materia prima en la fabricación de hormigón, azulejos y ladrillos, y como sustituto del cemento Portland (Havanagi, Sinsha, Prasad, Sitaramanjaneyulu, & Mathur, 2009).

Figura 4
Escorias de cobre



Fuente: Asociación de productores de cemento

Las escorias de cobre, a diferencia de las de acero, presentan mucha más variedad de color, pero se ha demostrado que su comportamiento mecánico es prácticamente similar.

3.4. Pavimento asfáltico reciclado (RAP)

Según la Compañía de Trabajos Urbanos S.A.S, el pavimento de asfalto reciclado o RAP es la denominación que se le da a los materiales procedentes de pavimentos antiguos, que son retirados y se vuelven a procesar. La forma habitual de utilizarlo es incorporándolo al diseño de

una nueva mezcla asfáltica. Principalmente proviene del fresado de pavimento asfáltico, piezas de demolición y exceso de producción. Sus características dependen en gran medida de las propiedades de los materiales constituyentes y del tipo de asfalto (Hossam & Klalifa, 2010).

Luego del fresado debe ser procesado en una planta de trituración para poder separarlo al menos en dos fracciones, una gruesa y otra fina. Lo ideal sería que la clasificación del RAP sea homogénea y, además, recogerse por separado en acopios especialmente diseñados para tal fin.

Figura 5

RAP retirado y triturado



Fuente: Compañía de Trabajos Urbanos S.A.S

El RAP no se tiende a recompactar, por lo mismo se puede almacenar de forma similar a los agregados, aunque se recomienda cubrir los acopios para evitar el acceso de agua y disminuir la contaminación del material (Compañía de Trabajos Urbanos S.A.S).

3.5. Tipos de mezclas asfálticas según su temperatura

Las mezclas de asfalto poseen una temperatura que varía significativamente, desde que es producida en planta, hasta la disposición in situ donde se está construyendo la estructura del pavimento, principalmente durante la compactación. Un cambio brusco en la temperatura, al momento de transportarse de un punto a otro, podría generar microfisuras, segregaciones y,

especialmente, efectos secundarios no deseados a las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla. La temperatura es un factor importante para la calidad final del pavimento asfáltico, por ende, debe prestársele la debida atención. (Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2006).

3.5.1. Mezclas en frío

En este tipo de mezcla se emplean ligantes de baja viscosidad, como lo son las emulsiones bituminosas y los betunes fluidificados, esto permite preparar y aplicar la mezcla a la temperatura del ambiente. Los betunes fluidificados son poco utilizados, esto debido a los efectos contaminantes y también por motivos económicos. Son generalmente usadas en la construcción y conservación de carreteras secundarias. Estas mezclas son utilizadas generalmente para realizar bacheos, dada su facilidad para preparar in-situ. (Yepes piqueras, 2014).

3.5.2. Mezclas en caliente

El Asfalto de mezcla caliente, Hot Mix Asphalt (HMA) consiste en una mezcla de agregados recubiertos uniformemente con cemento asfáltico. Para secar los agregados y lograr suficiente fluidez del cemento asfáltico, para una mezcla y trabajabilidad adecuadas, el agregado y el asfalto deben calentarse antes de mezclar, de ahí el término "mezcla caliente".

El agregado y el asfalto se combinan en una instalación mezcladora, donde todos los materiales se calientan, dosifican y mezclan para producir la mezcla de pavimentación deseada. Una vez que se completa la mezcla de la planta, la mezcla caliente se transporta al sitio de pavimentación y se extiende con una pavimentadora en una capa ligeramente compactada sobre una superficie lisa y uniforme. Mientras la mezcla de pavimentación aún está caliente, el material

se compacta mediante pesados rodillos motorizados para producir una capa de pavimentación suave y bien consolidada (Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2006).

3.6. Mezclas asfálticas según porcentaje de vacíos

En la Tabla 2, encontramos la clasificación de las mezclas asfálticas según porcentaje de vacíos.

Tabla 2
Mezclas asfálticas según porcentaje de vacíos

TIPO DE MEZCLA	Vacíos (Porcentaje)
Densas o cerradas	Menos del 5%
Gruesas o semicerradas	Entre 5% y 12%
Abiertas	Entre 12% y 20%
Drenantes o porosas	Mayor al 20%

Fuente: Tipos de mezclas bituminosas, (Yepes piqueras, 2014).

4. Desarrollo de la evaluación de la incidencia de las escorias de cobre y acero en el comportamiento mecánico de mezclas densas en caliente con restos de pavimentos recuperados.

Las mezclas asfálticas que incluyen RAP poseen varias ventajas asociadas a la inclusión de este material, pero sin el procedimiento correcto, estas mezclas pueden presentar inconvenientes de durabilidad, debido al envejecimiento de ligante presente en el material. Mediante la implementación de escorias de cobre se obtiene la posibilidad de resolver parte de estos problemas, debido a las características físicas y químicas que tienen, como la alta angulosidad, la existencia de cal y su bajo contenido en sílice, brindando una alta fricción y adhesividad. Así además se disminuyen los inconvenientes asociados a la acumulación de escorias de cobre y su lixiviación.

4.1. Características mecánicas de mezclas densas en caliente con escorias de cobre RAP.

Usar pavimento asfáltico recuperado (RAP) en la preparación de nuevas mezclas, es una técnica que cada vez toma más relevancia por los beneficios económicos y el decrecimiento del efecto medio ambiental. Se disminuye la producción e implementación de nuevos materiales al laborar con desperdicios con gran potencial de reutilización, como es la situación de los agregados pétreos y el betún que se puede extraer RAP, que frecuentemente son depositados en vertederos. (Querol & Del Pozo, 2011).

Hay investigaciones experimentales anteriores sobre la adhesión de este material tanto en la construcción de nuevos hormigones, como en la obra de novedosas carpetas de mezclas asfálticas en caliente. Su implementación como reemplazo de árido en hormigón no se propone para objetivos estructurales, no obstante, en mezclas asfálticas se muestra que, con porcentajes

inferiores al 20%, se consigue obtener comportamientos mecánicos equiparables con los de una mezcla asfáltica clásica, adquiriendo adicionalmente ventajas referentes a el decrecimiento en la permeabilidad (Avilés , 2002).

No obstante, las indagaciones que se realizaron con adiciones mayores de RAP en la mezcla asfáltica han demostrado modificar la conducta física de las mezclas, perjudicando tanto la durabilidad como el rendimiento estructural (Valdés , Pérez , Miro, Martínez, & Botella, 2011).

Dichos cambios se han visto reflejados en datos reportados por al experimentar con adiciones de entre un 40 y 60% de RAP, perjudicando ciertas características, como lo son, la rigidez y la tracción indirecta, las que se han observado incrementadas entre un 60 y un 70% respectivamente. Otra de las características dañadas fue la función de fluencia, las cuales redujeron entre un 20 y un 50% a medida que se aumenta el porcentaje de RAP en la mezcla, consiguiendo pavimentos más resistentes frente a fallas por ahuellamiento, pero, sensibles a la generación de fallas por fatiga (Peña , Del Pozo , Felipo , Querol , & López , 2011).

Para dar solución a estos problemas se han utilizado betunes de penetración más blandos, o bien, a la mezcla se le han incorporado aditivos de ligante asfáltico, para crear un efecto rejuvenecedor, y así, poder conservar en cierta forma las características reológicas iniciales del betún (Valdés , Pérez , Miro, Martínez, & Botella, 2011).

Dichas soluciones han permitido que, incorporando hasta un 50% de RAP, se logren valores de rigidez y resistencia a la tracción tan solo un 25 y un 5% más grande respectivamente, logrando además comportamientos de fluencias equivalentes a los de una mezcla tradicional (Peña , Del Pozo , Felipo , Querol , & López , 2011).

Una investigación realizada por Raposeidas & Movilla (2016), presentó los resultados obtenidos en mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de escorias de cobre (de 0 a 35%) en combinación con varios porcentajes de RAP (de 0 a 40%). Los ensayos realizados están bajo las normas AASHTO. A continuación, se describe el procedimiento realizado en esa investigación.

Se utilizaron las normativas AASHTO T84 y AASHTO T85 para la caracterización física de agregados y betún, y para determinar la densidad y absorción de agregados finos y gruesos, respectivamente. Para la evaluación del desgaste se utilizó el estándar AASHTO T96-99 y se determinó la cubicidad de las partículas según el procedimiento AASHTO M283. La determinación de la densidad del betún se obtuvo mediante el procedimiento AASHTO T229-97. Para realizar la dosificación en volumen, se necesitaba conocer la densidad compactada de cada material, por lo que se construyeron mezclas asfálticas con cada material por separado y así obtener dicha densidad. Para asegurar que las diferentes mezclas de asfalto puedan compararse entre sí, se han mantenido las proporciones en tamaño el tamaño de los agregados. Se utilizaron bandas de granulometría fijas para RAP y CE, mientras que las cantidades de AR se adaptaron para cumplir con los distintos porcentajes de incorporación de cada material y ajustarse al centro a la granulométrica de diseño. Para la preparación de las muestras se utilizó la metodología de diseño Marshall descrita en el AASHTO T 245, considerando además que la temperatura de trabajo del RAP debe ser menor debido al betún existente en este material, como se ha realizado en experimentos previos durante trabajo en caliente que incorpora RAP. Para la fabricación de las mezclas, el RAP se preparó por separado del resto de materiales para evitar el sobre envejecimiento del ligante incluido en el RAP, sometiéndolo a temperaturas de 80, 90 y 100 ° C para las incorporaciones de menores a mayor porcentaje de participación respectivamente (Raposeidas & Movilla, 2016).

El resto de agregados, áridos y escoria de cobre, fueron acondicionados a temperaturas superiores a los agregados tradicionales, que fueron aproximadamente 175, 185 y 195 °C, para lograr una temperatura de mezclado de 155 ° C cuando se incluyen todos los materiales. El mezclado se realizó manualmente y la compactación se realizó con un martillo mecánico Marshall, con 75 golpes en cada lado para lograr el porcentaje óptimo de densidad en la mezcla. Una vez determinado el porcentaje óptimo de ligante, se fabrican mediante el método Marshall las ocho probetas necesarias de cada combinación destinadas a los ensayos mecánicos, cuatro para los ensayos de estabilidad y fluencia Marshall y otras cuatro para los ensayos de módulo resiliente por compresión diametral y tracción indirecta (Raposeidas & Movilla, 2016).

4.1.1. Estabilidad y Flujo Marshall

La estabilidad de Marshall mide la carga máxima sostenida por el material bituminoso a una velocidad de carga de 50,8 mm / minuto. La carga de prueba se incrementa hasta alcanzar un máximo. Más allá de eso, cuando la carga comienza a disminuir, la carga finaliza y se registra la carga máxima (es decir, la estabilidad de Marshall). Durante la prueba de carga, se adjunta un indicador de cuadrante que mide el flujo de plástico de la muestra debido a la carga aplicada. El valor de flujo se refiere a la deformación vertical cuando se alcanza la carga máxima (Claro, 2020)

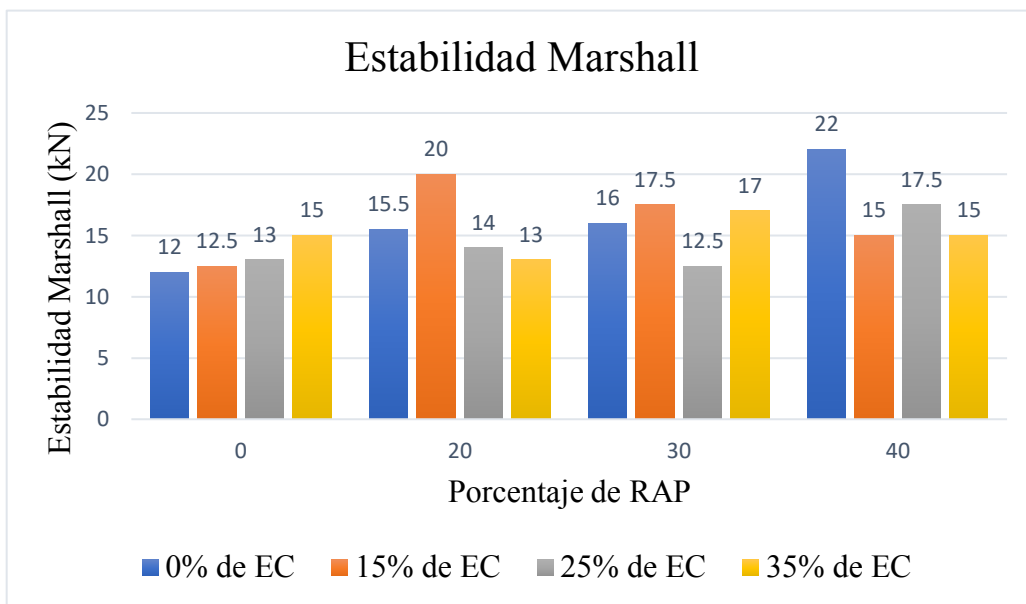
La estabilidad de Marshall está relacionada con la resistencia de los materiales bituminosos a las tensiones de distorsión, desplazamiento, ahuellamiento y cizallamiento. La estabilidad se deriva principalmente de la fricción y la cohesión interna. La cohesión es la fuerza de unión del material aglutinante, mientras que la fricción interna es la resistencia de entrelazado y fricción de los agregados. Dado que el pavimento bituminoso está sujeto a fuertes cargas de

tráfico de vez en cuando, es necesario adoptar material bituminoso con buena estabilidad y fluidez (Claro, 2020).

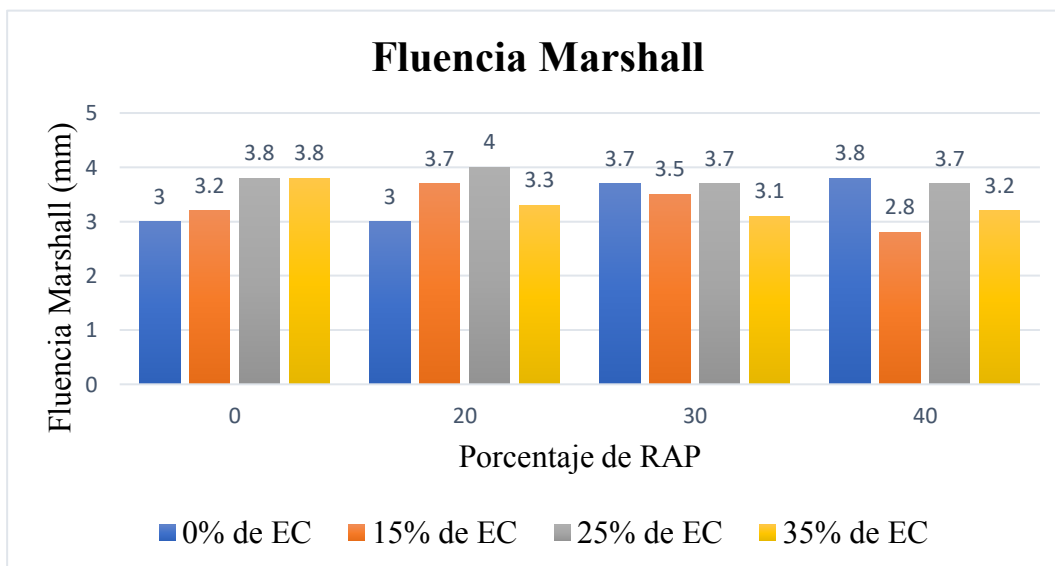
Según la investigación realizada por (Raposeidas & Movilla, 2016), titulada: “*Utilización de escoria de cobre como reemplazo de agregado mineral en mezclas asfálticas con RAP, análisis del comportamiento mecánico*”. nos muestra un estudio detallado sobre este tipo de mezclas.

El ensayo de estabilidad y fluencia Marshall se realizó mediante la prensa Marshall con una velocidad de deformación de 50 mm/min de acuerdo a la norma AASHTO T 245. Para el ensayo de tracción indirecta se utilizó la norma AASHTO T 283, aplicando la compresión con una velocidad de deformación de 0.85 ± 0.02 mm/s, por lo que para este ensaye se utilizó también la prensa Marshall, utilizando la mordaza adecuada para la realización de la compresión diametral. Para el acondicionamiento de las probetas, en el caso del ensayo Marshall se sumergieron las probetas en un baño de agua a 60°C durante 50 minutos estas, mientras que para el ensayo de tracción indirecta se debieron colocar al interior de bolsas plásticas que luego se sellaron, con la finalidad que no entren en contacto con la humedad al permanecer sumergidas en agua a 25°C durante las 6 horas que dura el acondicionamiento. Para la obtención del módulo resiliente, las probetas fueron acondicionadas durante un tiempo mínimo de 24 horas a 15°C según lo dispuesto por la norma AASHTO T294-92I (Raposeidas & Movilla, 2016).

De esta investigación se obtuvieron los siguientes valores para la estabilidad Marshall y fluencia Marshall.

Figura 6*Estabilidad Marshall*

Fuente: Autores. Tomado de: (Raposeidas & Movilla, 2016)

Figura 7*Fluencia Marshall*

Fuente: Autores. Tomado de: (Raposeidas & Movilla, 2016)

Si los porcentajes de RAP son más bajos (entre 0 y 30%), la adición de EC provoca ligeros aumentos en los valores de estabilidad, llegando a incrementos del orden del 15%, más acentuado para dotaciones bajas de EC (Figura 5). Los resultados muestran que cualquier adición de EC logra valores superiores a 12 kN, obtenidos para la mezcla patrón (0% RAP – 0% EC), y acerca los valores de mezclas con RAP a los resultados de la mezcla patrón. Estas disminuciones se deben a la capacidad friccionante que tiene la textura vítrea de la EC, la que prevalece ante la angulosidad de las partículas cuando el betún comienza con su comportamiento viscoso al sobrepasar los 30°C, permitiendo un comportamiento más elástico. También existe una influencia del contenido de cal, el que prevalece en el material fino de la EC, contribuyendo con sus propiedades adhesivas y provocando menores disminuciones de estabilidades (Raposeidas & Movilla, 2016).

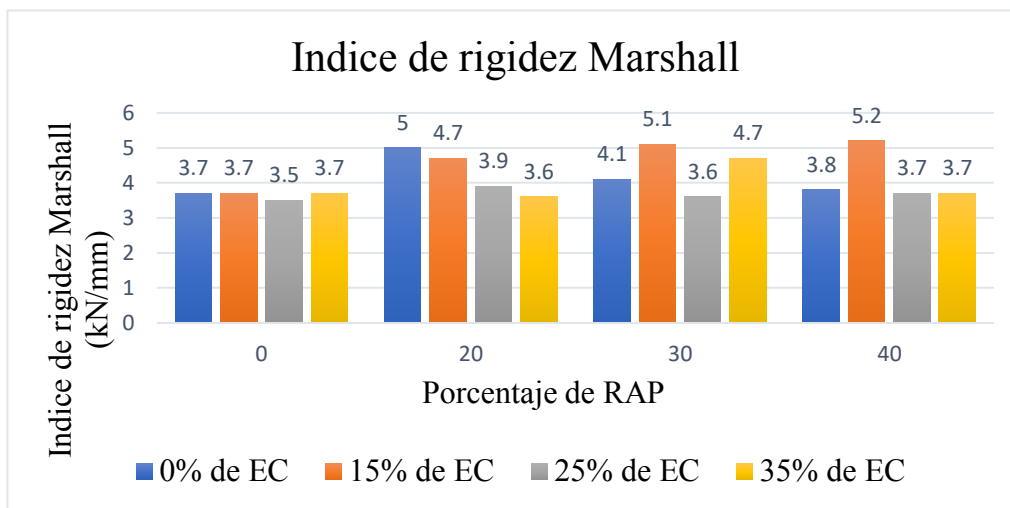
A su vez los resultados de fluencia (Figura 6) muestran que la EC aumenta los valores de este parámetro, especialmente cuando las cantidades de RAP se sitúan en valores bajos (de 0 a 20%). Para valores de RAP de 20 y 30%, la adición de un 35% de EC acerca los valores de fluencia a los obtenidos con la mezcla patrón, del orden de los 3.0-3.5 mm, y siempre dentro de las especificaciones requeridas para su utilización como capa de rodadura.

También se aprecia un buen comportamiento en mezclas con 40% de RAP si la adición de EC es la más baja (15%), ya que la fluencia se ve disminuida, obteniendo valores muy próximos a los de la mezcla patrón. Estos datos demuestran la capacidad adhesiva del contenido de cal que prevalece en las partículas finas de la EC y que permiten brindar una mayor deformación antes de la rotura en mezclas demasiado rígidas, y aportar resistencia en mezclas demasiado deformables (Raposeidas & Movilla, 2016)

4.1.2 Índice de rigidez Marshall

La EC destaca por su propiedad adhesiva y capacidad friccionante con el betún a temperaturas máximas de servicio, ya que transforma el índice de rigidez Marshall de mezclas con RAP a valores muy cercanos a los obtenidos con la mezcla de control, particularmente cuando las adiciones de EC superan el 25%, generando rangos de diferencias menores al 10%. Se puede apreciar además que logra que los resultados de rigidez Marshall se estabilicen siempre en valores similares, sin importar la cantidad de RAP que se utilice, acercándolos a una mezcla tradicional (Raposeidas & Movilla, 2016).

Figura 8
Índice de rigidez Marshall



Fuente: Autores. Tomado de: (Raposeidas & Movilla, 2016).

4.1.2. Índice de tracción indirecta y modulo resiliente

El ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper (Copeland, 2011).

Los resultados muestran que, al agregar escoria de cobre en mezclas con RAP, aumenta los valores de ITS entre un 8 y un 9% en resistencia. Este aumento se observa con valores de EC altos (35%) cuando las asignaciones de RAP son bajas (de 0 a 20%), mientras que a montos de RAP más altos (30 y 40%), estos incrementos corresponden a asignaciones entre 15 y 25%. La comparación de estos resultados con los obtenidos con mezclas tradicionales, del orden de 1,10 MPa en promedio, significa un aumento de hasta un 75% en la resistencia (Raposeidas & Movilla, 2016).

Respecto al módulo resiliente, al utilizar EC se genera una mayor elasticidad solo cuando la adición es de un 15%, estableciendo diferencias de hasta un 25% con su similar de igual contenido de RAP, pero sin EC, ya que con el resto de incorporaciones (25 y 35% de EC) se encontraron similitudes entre los resultados. Todos los resultados se mantuvieron sobre los 10000 MPa superando ampliamente a los 6800 MPa obtenidos de media en la mezcla tradicional. Si bien las características adhesivas de la EC provocan el incremento en la elasticidad para el 15%, para las incorporaciones superiores de este material se produce un efecto de rigidización del material fino con el cemento asfáltico. Este efecto es similar al efecto de rigidización del mastico, el cual se genera cuando la relación entre el material adhesivo y el betún sobrepasan el óptimo, volviéndose más rígido a temperaturas bajas, perdiendo su elasticidad (Raposeidas & Movilla, 2016).

A pesar de los adelantos que ha tenido la adhesión de RAP en las mezclas bituminosas, las aplicaciones de ésta, únicamente se hacen para tratamientos en capas inferiores, empleándose en algunas ocasiones bastante particulares como capa de rodadura. Este estudio propone aprovechar las ventajas naturales de la escoria de cobre mencionadas anteriormente para optimizar el comportamiento de mezclas que incorporan altos niveles de RAP. Aplicación que, por un lado, mejora el comportamiento de las mezclas con RAP gracias a las características de fricción y cohesión de la escoria de cobre, que son proporcionadas por la angularidad de sus partículas y el contenido de cal, sin embargo, brinda la posibilidad de obtener un uso seguro de la escoria, porque la toxicidad de los metales pesados se neutraliza, siendo seguro para el ecosistema.

4.2. Investigaciones complementarias sobre mezclas con RAP y EC

De igual forma Mohi Ud & Mir (2020), realizaron un estudio sobre: “*el efecto de la escoria de cobre y el pavimento de asfalto recuperado en la resistencia al deslizamiento de mezclas asfálticas*” donde, se prepararon 9 tipos de mezclas asfálticas con diferentes proporciones recientes de EC (0-15%) y RAP (0-30%) (Mohi Ud & Mir, 2020). Estas mezclas se probaron para establecer las propiedades de fricción en distintas condiciones. La unión de EC mejoró la estabilidad Marshall y la resistencia al deslizamiento de los pavimentos asfálticos. La mezcla 3 (0% RAP, 15% EC) enseñó la máxima resistencia al deslizamiento en condiciones secas. El crecimiento de la resistencia al deslizamiento puede atribuirse a la gran angularidad, densidad y ángulo de fricción de las partículas de EC. No obstante, la adhesión de RAP redujo la resistencia al deslizamiento. Las mezclas de EC-RAP además contribuyen a la tecnología verde, debido a que los materiales de desecho disminuyen la necesidad de agregados vírgenes en el área de la obra de carreteras. El estudio estadístico llevado a cabo enseñó que los resultados son

enormemente significativos excepto en condiciones de hielo donde los resultados logrados son insignificantes (Mohi Ud & Mir, 2020).

Así mismo Muñoz, Aitor, Movilla, Castro, Lagos, Valerio & Valdés (2021) realizaron un estudio similar titulado “*Rendimiento mecánico de mezclas asfálticas sostenibles fabricadas con escoria de cobre y altos porcentajes de pavimento asfáltico recuperado*” en donde evaluaron el desempeño de mezclas asfálticas semidensas que incorporan 50% a 70% RAP y 7.5% y 15% escoria de cobre (CS) como reemplazo parcial del agregado, para determinar la influencia de CS en el aumento efectivo de RAP en el diseño de mezclas asfálticas sostenibles. Las mezclas se evaluaron mediante la macrotextura, la resistencia a la fatiga, la sensibilidad al agua y la prueba de seguimiento de la rueda de Hamburgo. Los resultados muestran que el uso de RAP mejora la resistencia a la deformación permanente (RD) y la vida a la fatiga de las mezclas, mientras que la profundidad de textura media (MTD) y la relación de resistencia a la tracción indirecta (ITSR) disminuyen. La incorporación de CS en las mezclas con RAP mejoró MTD e ITSR en comparación con las mezclas que incluían solo RAP y permitió mayores contenidos de RAP en las pruebas de fatiga y rueda de Hamburgo sin mostrar una influencia negativa (Muñoz Cáceres O. , y otros, 2021)

Otro estudio encontrado en base de datos científica, titulado “*Propiedades de agrietamiento de asfaltos de mezcla tibia que contienen pavimento de asfalto recuperado y agentes de reciclaje bajo diferentes modos de carga*” realizado por Afshar, Yousefi, Saeid, Aliha , Sadjad, Hamzeh (2021), donde tuvieron como objetivo principal evaluar la influencia de dos agentes de reciclaje (RCA) en el comportamiento del agrietamiento de la mezcla de asfalto caliente (WMA) que contiene hasta un 50% de pavimento asfáltico recuperado (RAP). Prepararon una mezcla de asfalto en caliente (HMA) (como mezcla de control) y siete mezclas

de WMA que contenían tres dosis diferentes de RAP (0, 25 y 50%). La tenacidad a la fractura y la energía de las mezclas de asfalto mencionadas anteriormente se evaluaron en modos puros de I y II y en modo mixto I / II utilizando la prueba de flexión semicircular (SCB) a temperaturas medias y bajo cero. (Yousefi, Sobhi, Aliha, Pirmohammad, & Haghshenas, 2021).

Los resultados indicaron que la resistencia al agrietamiento de las mezclas de WMA sin RAP es mejor que las mezclas de HMA en diferentes modos de fractura independientemente de la temperatura (-15°C y 25°C). Además, a los -15°C, la presencia de RAP en las mezclas de WMA redujo la tenacidad y la energía a la fractura en 25 °C. (Yousefi, Sobhi, Aliha, Pirmohammad, & Haghshenas, 2021).

Según la revisión de la literatura, a lo largo del proceso de producción de mezclas asfálticas con adición de RAP, es fundamental ejercer agentes que restauren las características originales del asfalto envejecido. La imidazolina pertenece a los agentes que se puede elaborar desde materiales naturales y de desecho y se puede usar como rejuvenecedor. Hasta ahora, los estudios de indagación se han centrado en la utilización de imidazolina como inhibidor del envejecimiento del betún y la evaluación de la reducción del envejecimiento oxidativo del asfalto. Además, cuando es añadida al asfalto, le incrementa su resistencia al envejecimiento a más del 40% dependiendo del tipo de imidazolina, así como de la estructura química del asfalto (Ramírez Cabrera, 2013).

No obstante, hasta ahora no se ha definido la predominación de diferentes porciones de imidazolina sobre las propiedades de los ligantes asfálticos. Además, existe una falta de averiguación sobre las características físico-mecánicas de las mezclas asfálticas con esta clase de

rejuvenecedores, lo cual dejará la evaluación final de la idoneidad de la imidazolina para la producción de mezclas asfálticas con RAP.

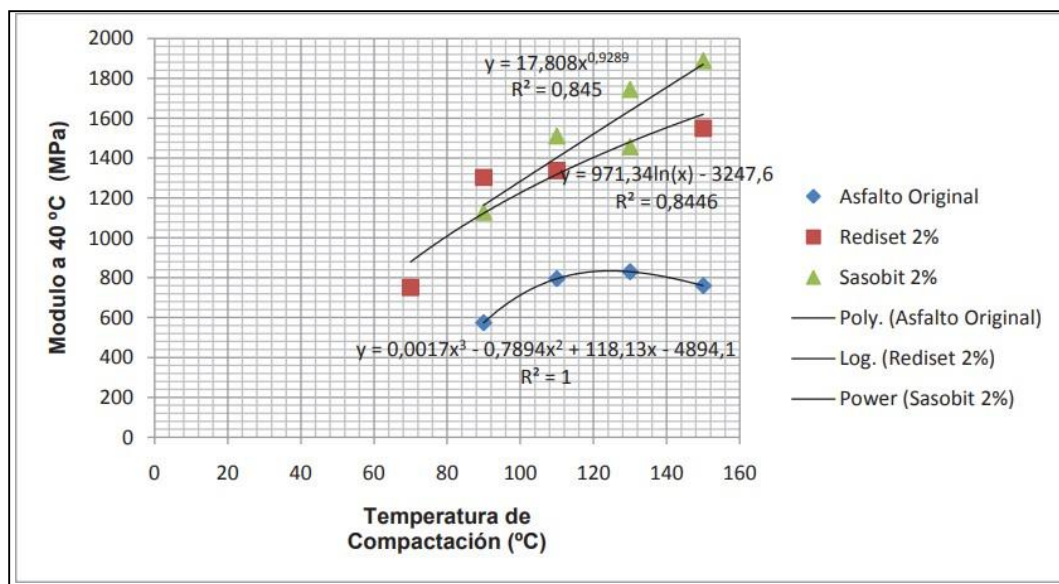
En el 2020 se realizó un estudio con el objetivo de abordar el papel de los materiales RAP en las propiedades mecánicas y de fractura de las mezclas de espuma WMA. Se realizaron pruebas de fractura en la geometría de SCB y pruebas de adherencia por arranque junto con pruebas mecánicas para abordar la falla de agrietamiento, las características de unión interna y la susceptibilidad a la humedad de las mezclas de asfalto. Los resultados de las pruebas de SCB se evaluaron mediante el índice de flexibilidad, la energía de fractura y el índice de resistencia al agrietamiento de las mezclas de espuma WMA. Los resultados de las pruebas de extracción mostraron que el aumento de materiales RAP resultó en una menor adhesión entre el betún de espuma y las partículas de agregado. Esto indica el impacto adverso de un contenido excesivo de RAP (es decir, al 70%) en las mezclas sobre la flexibilidad de las mezclas espuma-WMA. Estos estaban de acuerdo con los resultados de las pruebas de fractura (Ramírez Cabrera, 2013).

Según un informe del Banco Mundial de 2004, Colombia se encuentra entre las zonas más atrasadas del mundo en términos de infraestructura vial. Las razones de la crisis vial incluyen: falta de recursos, desconocimiento del comportamiento material, demora excesiva en la terminación del contrato, terreno desfavorable, organización ambigua, corrupción, auditoría insuficiente, materiales insuficientes para pavimentar, crecimiento continuo de los parámetros de carga legal, departamentos de gestión vial con insuficiente apoyo para investigaciones y desarrollo tecnológico (Ramírez Cabrera, 2013).

4.3. Mezcla asfáltica con RAP y uso de aditivos.

En el plano internacional, García (2010) realizó una indagación con el objetivo de establecer, las condiciones del asfalto y de los agregados ecuatorianos, determinando la aplicabilidad de las mezclas asfálticas tibias que usan aditivos a base de ceras (Rediset y Sasobit) para minimizar las temperaturas de mezcla y compactación; para alcanzar ese objetivo, aplicó en cada una de las briquetas llevadas a cabo, el diseño de mezcla y los agregados de la Compañía Concreto y Prefabricados, utilizando 3 mezclas (Asfalto Original compactado a 130°C, 2% Rediset compactado a 70°C y 2% Sasobit compactado a 110°C) y asfalto AC 20, tomando en cuenta la medición de módulos a 20°C y 40°C, en su investigación usó 80 briquetas. Los resultados conseguidos le han permitido llegar a la conclusión de que el asfalto ecuatoriano se desenvuelve bien cuando se le incorporan aditivos de mezclas tibias, y mecánicamente da buenos resultados, obteniendo mejores características con el aditivo Rediset (ver Figura 6).

Figura 9
Modulo vs Temperatura de Compactación



Fuente: García, 2010

Por su lado, Bianchetto, Hacker, & Fretes (2011), realizaron estudios y ensayos en laboratorio con el propósito de realizar el diseño de una mezcla bituminosa en caliente con varias características genéricas singulares. Lo que sería una SMA (Stone Mastic Asphalt) hecha con fibras de celulosa, añadidas con el propósito de disminuir la temperatura de mezclado y usando un ligante multigrado para permitir su implementación en zonas con gradientes térmicos pronunciados. Por ende, es viable clasificar a esta mezcla como “SMA tibia multigrado”.

En esta investigación, los autores se plantean la caracterización de los materiales y los resultados volumétricos y mecánicos del producto final obtenido, realizándose además una secuencia de consideraciones sobre las primordiales cualidades esperables en los pavimentos que se proyecten con esta tipología y de sus modalidades de trabajo: economía y sustentabilidad en la construcción, crecimiento de la estabilidad vial por alta macro textura superficial, vida eficaz prolongada y comportamiento optimizado en zonas con climas extremos gracias a su menor susceptibilidad térmica.

De consenso al análisis llevado a cabo por Reza & Othman (2018), donde evaluaron la contestación de las mezclas asfálticas tibias y pavimento asfáltico recuperado al usar un aditivo sintético con el fin de disminuir las temperaturas de construcción, perfeccionando la manejabilidad a lo largo de este proceso. Los aditivos usados a lo largo del análisis, corresponden a productos comerciales y de uso en China, Malasia y otros territorios de medio oriente, las referencias usadas fueron RH-WMA y Evotherm; donde RH-WMA corresponde a un aditivo a base de cera de polietileno, producido desde polietileno reticulado desarrollado por el Instituto de Averiguación de la Carretera de China, Ministerio de Transporte y que está pensado para minimizar la viscosidad del asfalto a altas temperaturas, mientras tanto que fortalece la composición cristalina de asfalto a bajas temperaturas. Asimismo, Evotherm hace parte de una

totalmente nueva generación de aditivos químicos para mezcla caliente de asfalto, el cual, al ser añadido a la mezcla a lo largo del proceso de construcción, por un lado, posibilita que el asfalto recubra a los agregados con facilidad a temperaturas más bajas, y además lubrica las mezclas perfeccionando todavía más, la trabajabilidad y la compactación.

De aquel análisis se concluyó que, en la construcción de las mezclas clásicas, al reducir su temperatura de construcción, se prueba la reducción de la trabajabilidad e incremento de la energía de compactación, situación que se invierte de manera significativa al usar los aditivos, donde los resultados presentan que la energía de compactación se disminuyó sin perjudicar de manera significativa las propiedades medidas por medio del ensayo Marshall como lo es la resistencia y los vacíos en la mezcla.

Como complemento se tiene que en (2015) Rondón, Zafra, y Fernández , llevaron a cabo una indagación por medio de la cual evaluaron la contestación físico-mecánica y reológica que experimenta una mezcla asfáltica tibia realizada en laboratorio, utilizando un aditivo líquido nombrado HUSIL, en el análisis se hizo la caracterización dinámica de la mezcla asfáltica tibia elaborada por medio de la modificación de un cemento asfáltico con HUSIL y se midió la resistencia al envejecimiento y al daño por humedad que experimenta la mezcla asfáltica hecha (Rondón Quintana, León Vergara, & Fernández Gómez, 2017).

Como conclusiones del análisis se identificaron cambios significativos en las características del asfalto modificado (incremento de la rigidez y mejoramiento del nivel de manejo del asfalto a temperaturas altas e intermedias de servicio), sumado a que la resistencia bajo carga monotónica de las mezclas asfálticas tibias fabricadas utilizando el aditivo HUSIL en el ensayo de tracción indirecta es mayor a la de alusión, del mismo modo el análisis evidenció que las mezclas tibias experimentan mayor resistencia al daño por humedad comparativamente

con las de alusión fabricadas a 150° C y mayor rigidez bajo carga cíclica y resistencia a la deformación persistente que las mezclas en caliente, adicional a aquello, el análisis además concluyó que la mezcla asfáltica tibia al ser fabricada a 30° C por abajo de la mezcla en caliente debería crear menores emisiones a la atmósfera y minimizar la utilización de combustibles en las plantas, lo cual redundará en menor contaminación al medio ambiente.

4.4. Utilización de escorias de acero en mezclas asfálticas con RAP

Recientemente Patiño Sanchez (2017) se enfocó en evaluar la resistencia de una mezcla asfáltica (MDC-19, según INVIAS 2013), fabricada sustituyendo fracciones gruesas y finas de añadido pétreo natural, por escoria de alto horno. En el análisis fueron evaluadas las características primordiales que corresponden a caracterización de los materiales a utilizar, comportamiento y diseño Marshall (comportamiento baja carga monotónica), basados en las reglas colombinas del Instituto Nacional de Vías 2013.

El análisis realizado evidenció, que el mejor comportamiento bajo carga monotónica, lo experimenta la mezcla asfáltica donde ha sido reemplazada la parte final de añadido pétreo natural, por escoria de alto horno. Por otro lado, la contestación de la mezcla asfáltica frente a la sustitución de la parte gruesa de la misma, produce incremento de vacíos en la mezcla, aumento en el contenido de cemento asfáltico y disminución en la resistencia mecánica (Castro Cabeza, 2018).

En otro estudio realizado por Fakhri & Ahmadi (2017) titulado: “*Reciclaje de agregados de escoria de acero y RAP en el asfalto de mezcla tibia: una evaluación del desempeño*” en donde esta investigación busca los efectos del reciclaje simultáneo de pavimento de asfalto recuperado (RAP) y agregados de escoria de acero en las mezclas de asfalto caliente (WMA). Para ello, prepararon seis tipos de mezclas asfálticas WMA con dos contenidos de escoria de

acero grueso (0% y 40%) y tres contenidos de RAP fino (0%, 20% y 40%) y su resistencia a la humedad, módulo resiliente, fluencia dinámica. y el comportamiento de fatiga para posteriormente evaluar y compararse estadísticamente entre sí. Los resultados mostraron que, a diferencia de la escoria de acero, el RAP mejora claramente la resistencia de las mezclas al daño por humedad. La adición de RAP al WMA también aumenta el módulo resiliente a todas las temperaturas; sin embargo, la adición de escoria de acero solo a temperaturas intermedias y altas conduce a una mejora en el módulo elástico. No obstante, la sensibilidad del módulo resiliente a la temperatura disminuye con la incorporación de ambos materiales marginales. Además, se encuentra que la adición de RAP y / o escoria de acero mejora significativamente el número de ciclos que la mezcla de asfalto puede tolerar tanto en ensayos de fluencia dinámica como en ensayos de fatiga por tracción indirecta (ITFT). Además, se demuestra que el comportamiento a la fatiga de las mezclas incorporadas con RAP y / o escoria tiene una menor sensibilidad al nivel de tensión, con la excepción de las mezclas que contienen 40% de escoria de acero gruesa junto con 40% de materiales RAP finos (Fakhri & Ahmadi, 2017).

5. Estudio de las características físicas y químicas de los materiales y el comportamiento de las mezclas densas en caliente.

Es importante conocer las características físicas, químicas y mecánicas; esto con el fin de poder determinar un posible comportamiento de los materiales en uso. El tráfico cada vez se muestra más al alza en las carreteras, esto implica la construcción de pavimentos con mejores características, más seguros y más duraderos, tratando de encontrar procedimientos de diseño con nuevos materiales, y soluciones más rentables en el corto y largo plazo.

5.1. Composición de las escorias de alto horno.

Según la información publicada por el (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2011), las siguientes son las propiedades físicas, químicas y mecánicas de este material.

5.1.1. Propiedades físicas

La escoria enfriada por aire se tritura en partículas angulares, aproximadamente cúbicas con superficies picadas. Tiene texturas que van desde superficies rugosas, vesiculares (porosas) hasta superficies vidriosas (lisas) con fracturas concoidales. Se proporciona una unión excelente con cementos hidráulicos o materiales aglutinantes bituminosos. Los altos valores de fricción interna y el enclavamiento de partículas proporcionan una excelente estabilidad cuando se utilizan sin cementos. La gravedad específica a granel y el peso unitario dependen de la clasificación y el tamaño de las partículas. Las partículas más grandes contienen más células internas o vesículas y tienen una menor densidad aparente. Los tamaños gruesos pueden tener densidades aparentes hasta un 20% más bajas que los agregados naturales con la misma gradación, mientras que el material fino (que pasa por un tamiz de 4,75 mm) tiene una densidad casi igual a la de la arena natural.

En la tabla 3, se muestran los valores promedio de las características de las escorias de alto horno.

Tabla 3
Propiedades físicas de la escoria cristalizada

	Fracción 0-40	Fracción 0-50
Porosidad real (%)	20,4	20,80
Densidad real (kg/dm)	2,63	2,60
Densidad aparente (kg/dm)	2,38	2,32
Porosidad aparente (%)	8,80	9,80
Peso específico real (<80mm)	2,98	2,94
Absorción (%)	3,70	4,20

Fuente: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2011

Otras propiedades o ventajas acerca de este material son las siguientes:

- La gran porosidad del material favorece el drenaje y la reactividad química, reduciendo la sensibilidad a la helada y la resistencia mecánica.
- La textura rugosa le proporciona un gran rozamiento interno y una capacidad de soporte elevado, pero perjudica su trabajabilidad.
- Otras propiedades físicas interesantes de este material son su baja conductividad térmica y su insensibilidad al agua (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2011).

5.1.2. Propiedades mecánicas

La escoria cristalizada es un material no plástico, insensible a las heladas y con buen comportamiento drenante. Se esparce y compacta fácilmente y tiene una densidad de compactación más baja que la de los materiales de relleno convencionales. Es adecuado para su uso en la estabilización de suelos húmedos y blandos en las primeras etapas de la construcción

del relleno. Las placas de carga fabricadas con este material dan valores superiores a 1000 kg / cm. La resistencia mecánica de la escoria cristalizada varía mucho en relación directa con su porosidad, que depende del método de enfriamiento utilizado. (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2011). A continuación, en la tabla 4, se muestran los datos promedios de las propiedades mecánicas de las escorias de acero.

Tabla 4
Propiedades mecánicas más importantes de la escoria de Acero

Propiedad	Valor
Desintegración al sulfato de sodio (ASTM C88), %	<12
Abrasión Los Ángeles (ASTM C131), %	20-25
Angulo de fricción interna	40°-50°
CBR, % tamaño máximo 19 mm (3/4")	Arriba de 300
Dureza (medida en la escala de Mohs)	6-7

Fuente: (Segura Almanza, 2016).

5.2. Composición de las escorias de cobre

Según, (Oyarzun Kneer, 2013) la composición física y química de la escoria depende de la materia prima utilizada y de la tecnología de fabricación del cobre. Estos subproductos industriales constan de fases vítreas y cristalinas. Por lo general, la escoria se produce a partir de 1600 ° C, por lo que, al ser líquida, su estructura cristalina / amorfa posterior dependerá de la forma de enfriamiento. Por ende, si este es rápido, la estructura colapsa y es mayoritariamente amorfa y sus propiedades serán las de un material altamente reactivo. De esta forma, si el enfriamiento es lento, habrá menos estructura amorfa o vítrea, principalmente existirían estructuras cristalinas, impidiendo la formación de nuevos enlaces.

5.2.1. Composición física

Ya se sabe que la escoria de cobre puede tener múltiples formaciones, que están directamente relacionadas con las propiedades físicas. Sin embargo, se pueden tener en cuenta las características que se muestran en la tabla 5.

Tabla 5
Principales características física de la escoria de cobre

Apariencia	De color negro, texturas lisas para las de botadero y porosas para las Granalladas
Forma de las partículas	Irregular con bordes agudos
Densidad (kg/m ³)	3160-3890
Absorción de Agua (%)	0,15-0,55
Dureza	4-6
Granulometrías	Variada según su formación. Desde 4'' hasta material fino menor a 0,08 mm

Fuente: (Oyarzun Kneer, 2013)

5.2.2. Composición cristaloquímica

La escoria de cobre contiene un alto contenido de óxidos, también se caracteriza por un alto contenido de hierro, donde sus principales componentes son Fayalita, Magemita. Además, podemos encontrar también Óxidos de Calcio-Aluminio (CaAl_2O_4), Silicato de Cinc (Zn_2SiO_4), Óxidos de cobre Hierro, también se encontró la presencia de metales (CuFe_2O_4) (Oyarzun Kneer, 2013).

Tabla 6
Elementos químicos encontrados

Elementos químicos encontrados
Óxidos de Calcio-Aluminio (CaAl_2O_4), Silicato de Cinc (Zn_2SiO_4) Óxidos de cobre Hierro (CuFe_2O_4) Altos contenidos de hierro Fe ₂ O ₃ mayores a 60%

Fuente: (Oyarzun Kneer, 2013).

6. Análisis costo-beneficio

La utilización de pavimento asfáltico recuperado para la rehabilitación y construcción de vías, es un situación que viene aumentando desde ya hace algunos años en países desarrollados, reutilizando y mejorando los materiales existentes mediante el uso de aditivos o de materiales reutilizables, esto coopera al medio ambiente, por el decrecimiento de explotación de canteras en la búsqueda de agregados nuevos, no obstante, no hay una técnica clara para el uso de estos materiales sostenibles, pues, el uso de pavimentos recuperados requiere investigación específicas en cada región, es un material muy variable con el cual no se puede generalizar en una sola investigación, debido a esto, es poco usada en países en vía de desarrollo, pues sus líneas de investigación de encuentran atrasadas.

El fin de este trabajo es implantar una visión asertiva de las variables que se presentan con el uso de pavimentos asfálticos reutilizados, tomando como guía estudios hechos por autores especializados en la materia. Referente a esto se encontraron resultados óptimos de las características mecánicas de las mezclas asfálticas reutilizadas.

La implementación de RAP en mezclas puede generar ahorros financieros gracias a una menor implementación de materias primas y la reducción de los precios de disposición final.

La implementación del RAP en mezclas puede conducir a ahorros económicos gracias al menor uso de materias primas y disminución en precios de disposición final. En diversos estudios e investigaciones, la mayor parte de los autores concluyen que esta técnica produce una reducción de precios; ejemplificando Severich & Valenzuela (2010) realizó una evaluación del procedimiento de reciclaje en frío para la rehabilitación de pavimentos en la ciudad de Cochabamba, por medio de 3 alternativas que se muestran en seguida en la tabla 7:

Tabla 7
Alternativas de rehabilitación

Alternativas		
Convencionales		No convencionales
1	2	3
Escarificado del pavimento existente, seguido de un recapado asfáltico.	Saneamiento de la carpeta existente mediante el bacheo y curado de fisuras, seguido de recapado asfáltico.	Fresado y reciclado en frío de pavimento asfáltico.

Fuente: Severich y Valenzuela, (2010).

La metodología para el estudio se hizo por medio de una matriz donde se interrelacionaron 3 variantes, entre las cuales estaba, precio, plazo y trabajabilidad, postulándose como mejor alternativa la tercera opción, la cual tiene el menor plazo de ejecución, debido al menor tiempo de rehabilitación por lo cual disminuye la interrupción en las vías y el uso de mano de obra (Severich & Valenzuela, 2010). Desde el punto de vista ecológico, minimiza la extracción de material debido a la implementación del material existente en la vía; por lo dicho, esta opción muestra un precio más bajo. Siendo un 36% más barato que la opción 1 y un 9% menos que la opción 2 a partir de la perspectiva ecológica, minimiza la sustracción de materiales debido al 100% de implementación de la vía que existe; desde lo comentado esta opción muestra un menor precio. Siendo 36% más económica que la elección 1 y 9% menor que la opción 2 (Severich & Valenzuela, 2010).

Williams et al., (2013) realizaron un análisis para ver los precios y beneficios de la aplicación de mezclas asfálticas con diferentes contenidos de RAP, esto se realizó sobre información primaria obtenida de obra en proceso y ejecutada en los últimos 5 años ubicada en Caba y en el Gran Buenos Aires donde se utilizó RAP en porcentajes hasta 20%. Los resultados mostraron ahorros económicos mediante el uso de PAR, como se muestra en la Tabla 8;

mostrando un porcentaje de ahorro de 3.3% con 10% RAP y 7.5% con 30% RAP (Severich & Valenzuela Galindo, 2010)

Tabla 8

Costos totales de Producción de mezclas asfálticas con 0%, 10% y 20% de RAP

Operación	0% RAP	10% RAP	20% RAP
Fresado de concreto asfáltico (Varios e; Ancho 3m)	138	138	138
Transporte desde frente de obra a planta (Aprox. 30 Km)	38	38	38
Separación de RAP (2 Tamaños)	-	9	9
Elaboración de mezcla asfáltica	133	133	133
Materiales de mezcla asfáltica	405	366	327
Transporte de mezcla (Aprox. 30Km)	57	57	57
Colocación de la mezcla	142,5	142,5	142,5
Costo total de producción (\$/Tn+IVA)	913,5	883,5	844,5

Fuente: William et al., (2013)

Estudios hechos por INVIAS de Medellín, evaluaron los coeficientes para materiales reutilizados y estabilizados con aditivos químicos desarrollados y realizados en Colombia, en ahorro de precios, llevando a cabo una comparación entre 2 alternativas para vías existentes una de ellas con uso de RAP.

Figura 11

Alternativas de rehabilitación INVIAS

Avenida 51 Entrada principal desde calle 57A hasta el parque calle 51. Itagüí			
Estructura existente	Espesor cm.	Coficiente adoptado	Numero estructural
subbase de rio, sobretamaños	40.0	0.09	1.42
pavimento fallado	7.50	0.18	0.53
Solucion propuesta	Parqueo en 10 cm. en el 33% del area, base asfaltica en 7.5 cm.y sobrecarpeta de rodadura de 6.5 cm.		
Base asfaltica	7.50	0.28	0.83
Carpeta asfaltica	6.50	0.33	0.84
Numero estructural con refuerzo			3.62
Valor solucion propuesta sin imprevistos			\$ 96,000,000
Solucion alterna	Reciclar con crudo y aditivo RCA-10 en 27 cm.y colocar rodadura de 5.5 cm.Se recicló en 33 cm.y se retiraron 6.0 cm. para no subir niveles de la via, este material se utilizó en otras vias como base estabilizada.		
Fecha reciclaje	Mar-94		
subbase de rio, sobretamaños	14.0	0.09	0.50
reciclaje con crudo y RCA-10	27.00	0.28	2.98
Carpeta asfaltica	5.50	0.33	0.71
Numero estructural con reciclaje			4.19
Valor solucion ejecutada con reciclaje, incluye imprevistos			\$ 48,000,000

Fuente: Echeverría (2011)

Figura 10

Alternativas de rehabilitación INVIAS

Carrera 70 entre calle 9 y calle 30. Medellin			
Estructura existente	Espesor cm.	Coficiente adoptado	Numero estructural
subbase en arenilla	27.00	0.07	0.74
subbase de rio, sobretamaños	37.00	0.09	1.31
pavimento fallado	9.10	0.23	0.82
Solucion propuesta	Hacer parqueo en el 40% del area y reforzar con 15.1 cm. de rodadura		
Carpeta asfaltica	15.10	0.33	1.96
Numero estructural con refuerzo			4.84
Valor solucion propuesta sin imprevistos			\$ 309,000,000
Solucion alterna	Reciclar con crudo y aditivo RCA-10 en 25 cm. y colocar carpeta de rodadura de 6.4 cm.		
Fecha reciclaje	Jul-95		
subbase en arenilla	27.00	0.07	0.74
subbase de rio, sobretamaños	21.10	0.09	0.75
reciclaje con crudo y RCA-10	25.00	0.28	2.76
Carpeta asfaltica	6.40	0.33	0.83
Numero estructural con reciclaje			5.08
Valor solucion ejecutada con reciclaje, incluye imprevistos			\$ 162,000,000

Fuente: Echeverría (2011).

En estas alternativas propuestas, se observa una reducción de precios de casi el 50% debido a la elección del reciclaje para la rehabilitación de los caminos propuestos. Asimismo, la capacidad del pavimento para tolerar los requerimientos de tránsito evaluados por el cálculo del número estructural son valores superiores en comparación con la opción convencional.

Aunque hay que aclarar que estas alternativas se presentaron sin la adición de ningún tipo de escorias, los precios solo muestran la reducción por incluir en la nueva mezcla asfáltica material que estaba siendo retirado de la misma estructura existente.

7. Análisis de resultados.

Existe excelente información acerca del uso de escorias de cobre más un porcentaje de RAP, pero en el caso de los pavimentos recuperados con adición de escorias de acero, nos encontramos con que ha sido un campo menos explorado. El éxito de usar materiales como el RAP y las escorias, se encuentra en ser precavido en el porcentaje de inclusión en la mezcla.

La temperatura de la mezcla también es un factor muy relevante, ya que está directamente relacionada con las características mecánicas que presentan los materiales.

Por otro lado, tenemos que, para la utilización de mezclas de recuperación de calor, como las evaluadas, se debería hacer una caracterización descriptiva para decidir los límites básicos para simular alternativas de pavimentos estructurales y descubrir resoluciones para la mezcla de recuperación que tengan en cuenta sus debilidades y ventajas. Por medio de indagaciones se ha definido que, es necesario el uso de aditivos en la mayoría de los casos de mezclas que contienen pavimentos recuperados, puesto que el nivel de envejecimiento de cada pavimento es distinto, y puede presentar demasiadas variables en la estructura, peso, porosidad, proporción de aglutinante, etcétera. La selección de un aditivo específico puede revertir y minorizar los efectos secundarios.

Según los resultados, la utilización de RAP en mezclas asfálticas puede traer consigo ahorros económicos considerables, lo cual está referente con la reducción de la demanda de los áridos. Cabe señalar que si la exploración de costo-beneficio tiene presente otros componentes externos, como componentes de conservación de la energía y los recursos, los resultados van a ser cada vez más positivo.

Tabla 9
Análisis comparativo de resultados

Comparativo entre una mezcla de asfalto caliente convencional y una mezcla que posee escorias de cobre y porcentaje RAP	
Estabilidad Marshall	Si los porcentajes de RAP son menores a 30%, la adición de EC provoca aumento en la estabilidad.
Flujo Marshall	La EC aumenta los valores de la estabilidad cuando las cantidades de RAP se sitúan entre 0 y 20%; para valores entre 20 y 30% se requiere aumentar la presencia de EC en un 35%.
Índice de rigidez	Al adicionar cantidades de EC que superen el 25% se puede apreciar estabilidad en los valores de rigidez Marshall, mientras se mantenga una relación directa con el porcentaje de RAP
Resistencia a la tracción directa	Al agregar EC en mezclas con RAP, aumenta los valores de ITS entre un 8 y un 9% en resistencia. Este aumento se observa con valores de EC altos (35%) cuando y cantidades de RAP bajas (de 0 a 20%).
Modulo resiliente	Los resultados se mantuvieron sobre los 10000 MPa superando ampliamente a los 6800 MPa obtenidos en la mezcla tradicional. Si bien las características adhesivas de la EC provocan el incremento en la elasticidad para un 15%, para las incorporaciones superiores de este material se produce un efecto de rigidización del material fino con el cemento asfáltico. Perdiendo elasticidad y volviéndose mas rígido a temperaturas bajas

Fuente: Autores 2021.

8. Conclusiones.

En la mayoría de estudios que se han realizado sobre pavimentos convencionales, se ha reflejado la influencia de otros factores que han afectado considerablemente los comportamientos mecánicos, los cuales tienen que ver con la temperatura de reacción al asfalto y la granulometría de dichos agregados, incluyendo las técnicas de reciclaje de pavimentos e implementación del uso de aditivos.

Por otro lado, entre los diferentes estudios encontrados, se demuestran que la adición de pavimentos recuperados y escorias a las mezclas asfálticas, mejoran o se mantienen al límite las características mecánicas de una mezcla tradicional, pero esto no está siendo suficiente para que estas técnicas sean mucho más utilizadas, pues las empresas tanto públicas como privadas no están haciendo un uso masivo de esos recursos eco-sostenibles.

Se determinó que, si el porcentaje de RAP usado es inferior del 25 a 30%, se sigue el procedimiento de diseño estándar, pero si los porcentajes son mayores al, alrededor de 50%, se deben seguir procedimientos de diseños modificados, realizar un mayor control a los materiales, mayor número de ensayos, y posiblemente sea necesario el uso de aditivos rejuvenecedores. Es necesario tener en cuenta el art. 462 INVIAS “el material por reciclar no deberá sustituir más de cuarenta por ciento (40%) de la masa total de la mezcla”.

Con respecto al análisis de costos, se puede apreciar que los beneficios económicos son relevantes ya que produce un aumento de la vida útil del pavimento y de esta manera implica una reducción de mantenimiento por fallas mecánicas, así como también la sustitución de materiales sostenibles que, aunque el beneficio y ahorro sea reflejado a largo plazo, aporta sustancialmente al beneficio monetario.

Se encontró información insuficiente a nivel nacional. Este es un problema que se puede analizar desde muchos aspectos. La economía, el medio ambiente y el transporte de un país son factores estrechamente relacionados con el estado de la infraestructura vial de un país. Para ello, es necesario incrementar la inversión en investigación e inversión en tecnologías avanzadas internacionales, y poner estas tecnologías avanzadas en práctica en los canales nacionales.

Referencias

- Agencia de Noticias UN. (2019, 12 02). *Universidad Nacional de Colombia*. Retrieved from <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/escorias-del-acero-se-aprovecharian-para-fabricar-pavimentos.html>
- Al Jabri, K. S., Taha, R. A., Al Hashmi, A., & Al Harthy, A. S. (2006). Efecto de la adición de polvo de derivación de cemento y escoria de cobre sobre las propiedades mecánicas del hormigón. *Construir Mater*, 322-331.
- Alp, H., Deveci, H., & Süngün, H. (2008). Utilización de residuos de flotación de escoria de cobre como materia prima en la producción de cemento. *Hazard. Mate*, 417-423.
- Angulo Ramírez, D. E., Mejía de Gutiérrez, R., & Puertas, F. (2017). Álcali activado Cemento Portland de escoria de alto horno: propiedades mecánicas e hidratación. *Construir*, 119-128.
- Arquitectura en Acero. (2019). *Proceso siderurgico*. Retrieved from <http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/materiales/proceso-siderurgico>
- Avilés , J. (2002). *Estudio de la tenacidad de los microaglomerados reciclados en caliente mediante el ensayo btd. efecto del tipo y contenido de betún*. Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña.
- Bianchetto, H. D., Hacker, E., & Fretes, N. (2011). *Scribd*. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/455994718/DESARROLLO-EN-LABORATORIO-DE->

UNA-MEZCLA-TIBIA-SMA-MULTIGRADO-CONSIDERACIONES-TEC-DE-
SEGURIDAD-Y-AMBIENTALES-ARGENTINA

Castro Cabeza, A. P. (2018). *INVESTIGACIÓN SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO 100% RECICLADAS CON ADICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS*. Barranquilla: Universidad del Norte.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2011, 12). *Cedexmateriales*. Retrieved from <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/39/escorias-de-horno-alto/valorizacion/propiedades-del-material-procesado/265/la-escoria-cristalizada.html>

Claro, S. (2020, 05 03). *Uso de RAP en Pavimentos*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=Q5eEUEpdNSo&t=534s>

Compañía de Trabajos Urbanos S.A.S. (n.d.). *CTU*. Retrieved from <https://ctu.com.co/ventajas-mezcla-asfaltica-con-rap/>

Copeland. (2011). *Pavimento de asfalto recuperado en mezclas de asfalto: estado de la práctica*. Virginia.

Crossin, E. (2015). 5. *Las implicaciones de los gases de efecto invernadero del uso de voladuras granuladas terrestres escoria de horno como sustituto del cemento*. J. Limpio. Pinchar.

Davenport, W. G., King, M. J., Schlesinger, M. E., & Biswas, A. K. (2002). Metalurgia extractiva del cobre. *Elsevier*, 299-313.

Dhir, R. K., Brito, J., Mangabhai, R., & Lye, C. Q. (2017). Producción y propiedades de escoria de cobre. *Woodhead Publishing*, 27-86.

- Esparza Villaba, C. (2015). *Mezclas Asfálticas En Caliente*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. (2006). Influencia de la temperatura y nivel de energía de compactación en las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica. *SCIELO*.
- Fakhri, M., & Ahmadi, A. (2017). Reciclaje de agregados de escoria de acero y RAP en la mezcla de asfalto caliente: una evaluación del desempeño. . *Construcción y materiales de construcción*, 630-638.
- Fazal, R., Safi, L., Al, Kamal, H., & Hasan, O. (2019). Mezclas de asfalto reciclado total: características y rendimiento de campo. *Registro de investigación de transporte*, 149-162.
- Garcia Cucalon, M. L. (2010). *UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL*. Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1159?locale=fr>
- Gorai, B., & Jana, R. K. (2003). Características y utilización de la escoria de cobre. *Reciclar*, 299-313.
- Goria, B., & Jana, R. K. (2003). Characteristics and utilisation of copper slag a review. *Resource conservation and recycling*, 299-313.
- Havanagi, V., Sinsha, A., Prasad, P., Sitaramanjaneyulu, & Mathur, S. (2009). *Copper slag as an alternative material for road construction*. Philadelphia: Twenty fifth International Conference on Solid Waste Technology and management Philadelphia.
- Hossam, H., & Klalifa, A. (2010). Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete containing copper slag aggregate. *Mater Civil*, 879-885.

- Kandhal, P., & Mallick, R. (1997). *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*. Washington.
- Lea, F. M. (1971). *The Chemistry of Cement and Concrete*. New York.
- Leiva Villacorta, F., & Vargas Nordcbeck, A. (2017). Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP). *Revista Infraestructura Vial*, 35-44.
- Leiva Villacorta, F., & Vargas Nordcbeck, A. (2017, julio 26). *Revista Infraestructura Vial*. Retrieved from <https://www.scielo.sa.cr/pdf/infraestructura/v19n33/2215-3705-infraestructura-19-33-35.pdf>
- León, M. P., & Ramírez, F. (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. *Revista de ingeniería de construcción*, 215-240.
- Li, Y. (2011). Microstructure and properties of high performance concrete with steel slag powder. *Materials Science Forum*, 503-506.
- Lovera Davila, D., Arias, V., & Coronado, R. (2004). LA VALORACIÓN DE LAS ESCORIAS METALÚRGICAS COMO. *Instituto de Investigación FIGMMG*, 1.
- Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (1996). Pozzolanic and cementitious materials. *Advances in Concrete Technology*, 102.
- McDaniel, & Nantung. (2005). *Designing Superpave Mixes with Locally Reclaimed Asphalt Pavement*. Washington, D.C: National Academies.
- Mohi Ud, D., & Mir, M. (2020). Efecto de la escoria de cobre y el pavimento asfáltico recuperado sobre la resistencia al deslizamiento de mezclas asfálticas. *Revista internacional de Ingeniería de pavimentos*, 1-14.

- Mostafa , K., & Behnood, A. (2009). Propiedades mecánicas del hormigón de alta resistencia que incorpora escoria de cobre como agregado grueso. *Materiales de construcción y edificación*, 2183-2188.
- Muñoz Cáceres, O., Raposeiras, A. C., Movilla Quesada, D., Castro-Fresno, D., Lagos Varas, M., Andrés Valeri, V. C., & Valdés Vidal, G. (2021). Mechanical performance of sustainable asphalt mixtures manufactured with copper slag and high percentages of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 124653.
- Muñoz Cáceres, O., Raposeiras, A., Movilla Quesada, D., Castro Fresno, D., Lagos Varas, M., Valerio, C., & Valdés Vidal, G. (2021). Rendimiento mecánico de mezclas asfálticas sostenibles fabricadas con escoria de cobre y altos porcentajes de pavimento asfáltico recuperado. *Materiales de construcción y edificación*, 46-53.
- National Technology Development. (2009). *Quantify the Energy and Environmental Effects of Using Recycled Asphalt and Recycled Concrete for Pavement Construction*.
- Oyarzun Kneer, A. (2013). *Universidad Austral de Chile*. Retrieved from <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmfci0.97i/doc/bmfci0.97i.pdf>
- Patiño Sanchez, D. F. (2017). EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA BAJO CARGA MONOTÓNICA DE UNA. *UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS*.
- Peña , J., Del Pozo , J., Felipe , J., Querol , N., & López , J. (2011). Reciclabilidad; Límites teóricos y prácticos en el reciclado en caliente en altas tasas. *Proyecto Fenix*, 15-25.

- Querol, N., & Del Pozo, J. (2011). *Reciclabilidad; Propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas recicladas a altas tasas*. Proyecto Fenix.
- Ramírez Cabrera, J. E. (2013). Construcción Sostenible de Pavimentos: concreto reciclado y mezclas asfálticas tibias. *Universidad de los andes*, 35.
- Raposeidas, A., & Movilla, D. (2016, 08). *ResearchGate*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/308174391_Utilizacion_de_escoria_de_cobre_como_reemplazo_de_agregado_mineral_en_mezclas_asfalticas_con_RAP_analisis_del_comportamiento_mecanico
- Raposeiras Ramos, A. C., Movilla Quesada, D., Vargas Cerón, A., Bilbao Novoa, R., & Cifuentes Cadagan, C. (2016). Utilización de escoria de cobre como reemplazo de agregado mineral en mezclas asfálticas con RPA análisis del comportamiento. *Provia*, 12.
- Raposeiras, A. C., Movilla Quesada, D., Bilbao Novoa, R., Cifuentes, C., & Ferrer Norambuena, G. (2018). El uso de escorias de cobre como reemplazo de agregados en mezclas. *Construcción y materiales de construcción*, 427-438.
- Reyes Curcio, A., Pellegrini Blanco, N., & Reyes Gil, R. (2015). El costo de reparación de los pavimentos de asfalto aumentará considerablemente para cubrir el costo de desechar los materiales no reciclados. Por lo tanto, el uso efectivo de RAP resuelve un problema ambiental más amplio porque el material no ocupa espacio. *Revista de Investigación*, 86.
- Reyes, O., & Rincón, J. (2011). Influencia de las características del relleno mineral en la resistencia de una mezcla asfáltica. *EIA*, 93-103.

- Reza, S., & Othman, M. (2018, junio). *ScienceDirect*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756416302252>
- Rondón Quintana, H. A., León Vergara, O. I., & Fernández Gómez, W. D. (2017). Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto. *Scielo*, 152-173.
- Safi, F. R., Al Qadi, I. L., Hossain, K., & Ozer, H. (2019). Mezclas de asfalto reciclado total: características y rendimiento de campo. *Registro de investigación de transporte*, 149-162.
- Sánchez, M. (2004). Escorias en pirometalúrgica del cobre. *Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción*.
- Savas, E., & Blankson, M. A. (2014). Desempeño ambiental y análisis mecánico del concreto que contiene pavimento de asfalto reciclado (RAP) y desechos de concreto prefabricado como agregado. *Diario de materiales peligrosos*, 403-410.
- Segura Almanza, T. (2016). *Repositorio UCATOLICA*. Retrieved from <https://repository.ucatolica.edu.co/jspui/bitstream/10983/15079/1/DOCUMENTO%20FINANCIAL.pdf>
- Sepúlveda, E. C. (2006). *Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de hierro*. Santiago: Universidad Chile.
- Severich, M., & Valenzuela Galindo, R. A. (2010). Rehabilitación de pavimentos asfálticos de la ciudad de Cochabamba mediante el fresado y reciclado en frío. *Journal Boliviano de Ciencias*, 29.
- Siddique, R. (1971). *Waste Materials and Byproducts in concrete*. Berlín, Alemania.

Taborda Calvo, C. E. (2019). *ESTADO DEL ARTE DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DE COLORES*. Bogotá: Universidad católica.

Universidad Austral de Chile. (2016, 12 12). *Revista Ingeniería de Construcción*. Retrieved from <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v32n1/art02.pdf>

Valdés , G., Pérez , J., Miro, R., Martínez, A., & Botella, R. (2011). Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*, 1289-1297.

Vítková, M., Etle, V., Mihaljevič, O., & Šebek, O. (2011). Efecto de la preparación de muestras sobre la lixiviación de contaminantes de la escoria de fundición de cobre. *Hazard. Mater*, 390-395.

Yepes piqueras, V. (2014, 04 18). *Tipos de mezclas bituminosas*. Retrieved from <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/04/18/tipos-de-mezclas-bituminosas/>

Yousefi, A. A., Sobhi, S., Aliha, M., Pirmohammad, S., & Haghshenas, H. F. (2021). Propiedades de agrietamiento de asfaltos de mezcla tibia que contienen pavimento de asfalto recuperado y agentes de reciclaje bajo diferentes modos de carga. *Materiales de construcción y construcción* , 124-130.

Zain, M. F., Islam, M. N., Radin, S. S., & Yap, S. G. (2004). Solidificación a base de cemento para la eliminación segura de escoria de cobre granallado. *Compos*, 845-851.