



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

CENTRO DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

**“METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE PAVIMENTO ASFALTICO
RECICLADO, Y SU APLICACIÓN EN CAPAS DE RODADURA DE VIAS
URBANAS”**

AUTOR: JONATHAN UBALDO PEREA MUÑIZ

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE
MAGISTER EN INGENIERIA CIVIL, MENCIÓN VIALIDAD**

TUTOR: ING. MG. SC. LUIS ALBERTO CAMPUZANO CASTRO

COTUTOR: ING. MG. SC. LEYDEN OSWALDO CARRION ROMERO

MACHALA

2024

PENSAMIENTO

“Los hombres no son presos del destino; solo son prisioneros de sus propias mentes.”

Presidente 32.º de los Estados Unidos

DEDICATORIA

A Dios, con el todo es posible; a mis padres que con su ejemplo guían mis pasos, hermanos los amigos incondicionales que te da la vida; esposa su apoyo y paciencia son un pilar fundamental para hoy lograr este objetivo. Para mis hijas Carub y Cleodi, ustedes son la energía que necesito para avanzar.

“No sigas el camino, abre el camino...” A todas aquellas personas que aportaron a la obtención de nuevos conocimientos, maestros, amigos y compañeros.


AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Técnica de Machala, por estar comprometida con el desarrollo de los pueblos, a través de programas de educación de cuarto nivel los cuales permiten obtener nuevos conocimientos.

Al Sr. ING. LUIS ALBERTO CAMPUZANO CASTRO, Mg. Sc., que con sus conocimientos es la guía en el desarrollo de este trabajo.

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, Jonathan Ubaldo Perea Muñiz con C.I. 131056378-6, declaro que el trabajo de “METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO, Y SU APLICACIÓN EN CAPAS DE RODADURA DE VÍAS URBANAS”, en opción al título de Magister en Ingeniería Civil, Mención Vialidad, es original y auténtico; cuyo contenido: conceptos, definiciones, datos empíricos, criterios, comentarios y resultados son de mi exclusiva responsabilidad.



JONATHAN UBALDO PEREA MUÑIZ

C.I. 1310563786

Machala, 2024/05/06

REPORTE DE SIMILITUD URKUND/TURNITIN

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Yo, Ing. Luis Alberto Campuzano Castro, Mg. Sc. con C.I. 070094931-6; tutor del trabajo de “METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO, Y SU APLICACIÓN EN CAPAS DE RODADURA DE VÍAS URBANAS”, en opción al título de Magister en Ingeniería, Civil Mención Vialidad, ha sido revisado, enmarcado en los procedimientos científicos, técnicos, metodológicos y administrativos establecidos por el Centro de Posgrado de la Universidad Técnica de Machala (UTMACH), razón por la cual doy fe de los méritos suficientes para que sea presentado a evaluación.



ING. LUIS ALBERTO CAMPUZANO CASTRO, Mg. Sc.
C.C. 0700949316

Machala, 2024/05/06

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Jonathan Ubaldo Perea Muñiz con C.I. 131056378-6, autor del trabajo de titulación “METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO, Y SU APLICACIÓN EN CAPAS DE RODADURA DE VÍAS URBANAS”, en opción al título de Magister en Ingeniería, Civil Mención Vialidad, declaro bajo juramento que:

- El trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido presentado previamente para ningún grado o calificación profesional. En consecuencia, asumo la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.
- Cede a la Universidad Técnica de Machala de forma exclusiva con referencia a la obra en formato digital los derechos de:
 - a. Incorporar la mencionada obra en el repositorio institucional para su demostración a nivel mundial, respetando lo establecido por la Licencia *Creative Commons Attribution-NoCommercial* – Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY NCSA 4.0); la Ley de Propiedad Intelectual del Estado Ecuatoriano y el Reglamento Institucional.
 - b. Adecuarla a cualquier formato o tecnología de uso en INTERNET, así como correspondiéndome como Autor la responsabilidad de velar por dichas adaptaciones con la finalidad de que no se desnaturalice el contenido o sentido de la misma.



JONATHAN UBALDO PEREA MUÑIZ

C.I. 1310563786

Machala, 2024/05/06

CERTIFICACIÓN DE PUBLICACIÓN

RESUMEN

Esta investigación es de suma importancia en el contexto actual al abordar la creciente demanda de prácticas constructivas sostenibles en Ingeniería Civil. La adopción de Pavimentos Asfálticos Reciclados PAR (Recycled Asphalt Pavement, RAP, siglas en inglés) no solo maneja eficientemente los residuos de construcción, sino que también fomenta la eficiencia de recursos y contribuye a reducir la huella de carbono asociada con la construcción de carreteras. La elección del tramo de la red estatal E-489, entre Progreso y General Villamil Playas, Provincia del Guayas, proporciona un escenario realista para evaluar las características del PAR en condiciones de tráfico y carga propias de vías urbanas. Los objetivos planteados se abordaron de la siguiente manera, la revisión de fundamentos bibliográficos y criterios técnicos normativos relacionados con el PAR se basó en referencias de entidades reconocidas como la American Association of State Highway and Transportation Officials, ASSTHO y el Ministerio de Transportes y Obras Públicas del Ecuador, MTOP. La identificación de características específicas y aplicaciones en capas de rodadura en caliente en vías urbanas se llevó a cabo considerando normativas locales, como las "Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes" establecidas por el MTOP. La propuesta: "METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO, Y SU APLICACION EN CAPAS DE RODADURA DE VIAS URBANAS" es dividida en procesos clave desde la toma de muestras del PAR hasta el diseño de mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de PAR, se sustentó en principios técnicos respaldados por normativas y estándares reconocidos, incluyendo referencias de la ASSTHO y el MTOP para establecer las características mínimas que debían cumplirse en el diseño. Los resultados obtenidos confirmaron que la inclusión del 25% de material reciclado en la mezcla asfáltica se reveló como óptima, cumpliendo con parámetros cruciales y logrando un equilibrio efectivo entre sostenibilidad y rendimiento estructural.

PALABRAS CLAVES

PAR, Pavimentos, Estructuras viales, Mezclas asfálticas, AASTHO, MTOP

ABSTRACT

This research is of utmost importance in the current context, aligning with the growing demand for sustainable construction practices and environmentally friendly approaches in civil engineering. The adoption of Recycled Asphalt Pavements (RAP) not only efficiently addresses construction waste management but also promotes resource efficiency and contributes to reducing the carbon footprint associated with road construction. The choice of the stretch on the state network E-489, specifically between Progreso and General Villamil Playas, provides a realistic scenario to evaluate the characteristics of PAR under traffic and load conditions typical of urban roads. The set objectives were comprehensively addressed. The review of bibliographic fundamentals and technical normative criteria related to PAR was based on references from recognized entities such as ASSTHO and MTOP. The identification of specific characteristics and applications in the wearing course layers of urban roads was carried out considering local regulations, such as the "General Specifications for the Construction of Roads and Bridges" established by the MTOP. The proposed methodology, divided into key processes from PAR sampling to designing asphalt mixes with different percentages of PAR, was grounded in technical principles supported by recognized regulations and standards, including references from ASSTHO and MTOP to establish the minimum characteristics to be met in the design. The obtained results confirmed that the inclusion of 25% recycled material in the asphalt mix proved optimal, meeting crucial parameters and achieving an effective balance between sustainability and structural performance.

KEYWORDS

PAR, Pavement, Road Structures, Asphalt Mixes, ASSTHO, MTOP

INDICE GENERAL

RESUMEN	9
ABSTRACT	11
INDICE GENERAL	12
INDICE DE ILUSTRACIONES	14
INDICE DE TABLAS	16
INTRODUCCIÓN	17
CAPITULO I	22
1. MARCO TEÓRICO	22
1.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS	22
1.2. ANTECEDENTES CONCEPTUALES	25
1.3. ANTECEDENTES CONTEXTUALES	38
CAPITULO II	41
2. MATERIALES Y MÉTODOS	41
2.1. TIPO DE ESTUDIO	41
2.2. PARADIGMA O ENFOQUE DESDE EL CUAL SE REALIZO	42
2.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	42
2.4. MÉTODOS TEÓRICOS CON LOS MATERIALES UTILIZADOS	43
2.5. MÉTODOS EMPÍRICOS CON LOS MATERIALES UTILIZADOS.....	43
2.6. OPERACIÓN DE VARIABLE	45
CAPITULO III	47
3. PROPUESTA METODOLOGICA	47
3.1. INFORMACIÓN GENERAL	47
3.2. ANTECEDENTES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	47
3.3. JUSTIFICACIÓN.....	48

3.4. OBJETIVOS.....	48
3.5. FUNDAMENTACIÓN.....	48
3.6. METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	51
CAPITULO IV	52
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	53
4.1. RESULTADOS	53
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFIA	63
ANEXOS	69

INDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 LÍMITES DEL SISTEMA EVALUADO	33
ILUSTRACIÓN 2 METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO	51
ILUSTRACIÓN 3 CURVA GRANULOMÉTRICA CARPETA ASFÁLTICA T/N 1/2"	58
ILUSTRACIÓN 4 ENSAYO DE MATERIAL AC 20	69
ILUSTRACIÓN 5 ENSAYO DE MATERIAL AC VIRGEN	70
ILUSTRACIÓN 6 RESULTADOS DE DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	71
ILUSTRACIÓN 7 VÍA UTILIZADA.....	72
ILUSTRACIÓN 8 MATERIAL EN STOCK	72
ILUSTRACIÓN 9 RECOLECCIÓN DE MATERIAL.....	73
ILUSTRACIÓN 10 ENSAYOS DE MATERIAL PAR	73
ILUSTRACIÓN 11 ENSAYOS DE MATERIAL PAR	74
ILUSTRACIÓN 12 ENSAYOS DE MATERIAL PAR	74
ILUSTRACIÓN 13 ENSAYOS DE MATERIAL PAR	75
ILUSTRACIÓN 14 ENSAYOS DE MATERIAL PAR	75
ILUSTRACIÓN 15 ENSAYOS DE MATERIAL PAR	76
ILUSTRACIÓN 16 ENSAYOS DE MATERIAL PAR	76
ILUSTRACIÓN 17 RECOLECCIÓN MATERIAL VIRGEN	77
ILUSTRACIÓN 18 ENSAYOS DE MATERIAL VIRGEN.....	77
ILUSTRACIÓN 19 ENSAYOS DE MATERIAL VIRGEN.....	78
ILUSTRACIÓN 20 ENSAYOS DE MATERIAL VIRGEN.....	78
ILUSTRACIÓN 21 DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA	79
ILUSTRACIÓN 22 DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	79
ILUSTRACIÓN 23 DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	80

ILUSTRACIÓN 24 DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	80
ILUSTRACIÓN 25 DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	81
ILUSTRACIÓN 26 DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	81
ILUSTRACIÓN 27 DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	82

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 DIFERENCIA DE EMISIONES DE CO2 POR INCLUSIÓN DE PAR	28
TABLA 2 MOTIVACIONES PARA IMPLEMENTAR LA REDUCCIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN	31
TABLA 3 VARIABLE DEPENDIENTE	45
TABLA 4 VARIABLE INDEPENDIENTE.....	46
TABLA 5 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE MATERIAL BITUMINOSO RECICLADO.....	54
TABLA 6 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS.....	55
TABLA 7 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS MEDIOS	55
TABLA 8 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS FINOS	56
TABLA 9 COMBINACIÓN DE MEZCLAS CON VARIOS PORCENTAJES DE PAVIMENTO RECICLADO	57
TABLA 10 PARÁMETROS CUMPLIDOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO	58
TABLA 11 PARÁMETROS CUMPLIDOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO	59

INTRODUCCIÓN

Importancia del tema

Definir una metodología que facilite el diseño de pavimento asfáltico reciclado para su aplicación en la capa de rodadura en caliente en vías urbanas, es un tema de gran importancia debido a su contribución a la sostenibilidad ambiental al reducir la generación de residuos el cual es de interés de investigadores en países desarrollados (Abarca Guerrero et al., 2019) y la extracción de recursos naturales al utilizar materiales reciclados en la construcción y rehabilitación de carreteras lo cual reduce la demanda de agregados vírgenes y se disminuye la extracción de recursos naturales, lo que resulta en una menor huella ambiental. Además de su eficiencia económica al generar ahorros en comparación con materiales convencionales ya que se pueden reducir costos de adquisición y transporte. Esta metodología permite mejorar la durabilidad y resistencia de la capa de rodadura, mejorando la calidad de las vías urbanas, promoviendo la innovación tecnológica y el avance de la industria de la construcción de carreteras, permitiendo la implementación de soluciones más sostenibles y eficientes.

La importancia del reciclaje de pavimentos radica en su capacidad para prevenir la generación de residuos (Abarca Guerrero et al., 2019), mejorar el manejo de los materiales de construcción, reducir las emisiones contaminantes y generar beneficios económicos. Es una tecnología que contribuye a un desarrollo más sostenible en el sector de la construcción (Xiao et al., 2018).

Actualidad de la problemática que se enfrenta

La actualidad de la problemática se centra en encontrar soluciones sostenibles, eficientes y seguras para el diseño de pavimento asfáltico reciclado en vías urbanas. La problemática relacionada con la calidad de la capa de rodadura en vías urbanas y el diseño de pavimento asfáltico reciclado es relevante en la actualidad debido a los avances significativos en términos de conciencia ambiental y técnicas de reciclaje en la construcción de carreteras, aún existen desafíos y oportunidades de mejora. En la actualidad, la sostenibilidad ambiental se ha convertido en un enfoque importante en el diseño de infraestructuras viales. Existe una creciente demanda de soluciones que minimicen el impacto ambiental y reduzcan la generación de residuos. (Xiao et al., 2018). En este sentido,

el uso de materiales reciclados en el pavimento asfáltico ha ganado atención, pero aún es necesario avanzar en la implementación de técnicas de reutilización y el reciclaje de residuos (Villegas et al., 2018) y metodologías efectivas para garantizar la calidad y durabilidad del pavimento reciclado.

Además, los desafíos relacionados con la infraestructura vial en las áreas urbanas están en constante evolución. El aumento del tráfico, el desarrollo urbano y los cambios en los patrones de movilidad plantean nuevas demandas y desafíos para el diseño de pavimentos. Es fundamental abordar estos desafíos para garantizar la seguridad, la eficiencia y la comodidad de los usuarios de las vías urbanas.

En términos de investigación y desarrollo, se están realizando esfuerzos para mejorar las técnicas de reciclaje y desarrollar metodologías más precisas y confiables para el diseño de pavimentos asfálticos reciclados. Se exploran diferentes enfoques, como el uso de aditivos mejorados, la optimización de la mezcla asfáltica reciclada y el monitoreo de la calidad del pavimento a lo largo de su vida útil.

Formulación del problema científico.

Obtener una metodología para el diseño de pavimento asfáltico reciclado que permita la aplicación en la capa de rodadura en caliente en vías urbanas resulta fundamental para abordar diversos desafíos técnicos y ambientales, así como optimizar los recursos disponibles. Esta investigación busca aumentar la eficiencia de diferentes técnicas de mantenimiento aumentando el rendimiento de los materiales a largo plazo. Este problema se enfoca en la necesidad de establecer un enfoque metodológico adecuado que permita maximizar la calidad y durabilidad del pavimento asfáltico reciclado en vías urbanas. Se busca superar los retos técnicos asociados con el uso de materiales reciclados en la construcción y rehabilitación de carreteras urbanas. Con este contexto se plantea el siguiente problema: ¿Cómo influye el diseño de pavimento asfáltico reciclado en la calidad de la capa de rodadura en vías urbanas?

Delimitación del objeto de estudio

La delimitación del objeto de estudio en esta investigación sobre la metodología para el diseño de pavimento asfáltico reciclado y su aplicación en capas de rodadura en vías urbanas se enfocará en la capa de rodadura de vías urbanas dentro de un contexto específico,

como una ciudad o una región determinada. Se delimitará el alcance geográfico para poder analizar las características particulares de las vías urbanas en esa ubicación específica. Se considerarán principalmente las vías urbanas más importantes de la ciudad, es decir, aquellas que rodean o conectan diferentes áreas de una ciudad. Estas vías suelen tener una mayor importancia en términos de flujo de tráfico y conectividad.

El enfoque estará en el diseño y aplicación del pavimento asfáltico reciclado en la capa de rodadura en caliente en vías urbanas. Si bien existen otras capas en la estructura del pavimento, como la subbase y la base, este estudio se centrará en la capa de rodadura, que es la superficie directamente expuesta al tráfico vehicular.

Objetivo general de la investigación

Elaborar una metodología para el diseño de pavimento asfáltico reciclado aplicando normas y estándares, para la capa de rodadura en vías urbanas.

Objetivos Específicos:

- Determinar los fundamentos bibliográficos y criterios técnicos normativos relacionados al pavimento asfáltico reciclado y su aplicación en capa de rodadura en vías urbanas.
- Identificar las características y aplicación del pavimento asfáltico reciclado en la capa de rodadura en vías urbanas.
- Elaborar una metodología para el diseño de pavimento asfáltico reciclado y su aplicación en capa de rodadura en vías urbanas.

Delimitación del campo de acción.

El presente proyecto se centra en el diseño de mezclas asfálticas para aplicaciones en viales urbanas. Se llevará a cabo considerando las normativas viales pertinentes, asegurando que las mezclas diseñadas cumplan con los estándares de calidad y seguridad establecidos para las vías. La elección del material para el PAR será obtenida de la red estatal E-489, específicamente del tramo Progreso a General Villamil Playas. Este tipo de material tiene características diferentes a materiales vírgenes ya que han estado sometidos a varios factores tales como geográficos y técnicos, además, el estado del pavimento está relacionado a la

cantidad de tráfico, las condiciones climáticas y cualquier componente que pueda influir en el diseño y la calidad de la capa de rodadura.

Se indagará en las normativas y estándares aplicables a la construcción de pavimentos asfálticos en vías urbanas. Esto incluirá la revisión de regulaciones locales, nacionales e internacionales para asegurar que el diseño propuesto cumpla con los requisitos técnicos y de calidad establecidos. Se desarrollará una metodología específica para el diseño de pavimento asfáltico reciclado en el campo de acción definido. Esta metodología considerará aspectos como la selección de materiales reciclados adecuados, la dosificación de la mezcla asfáltica, los procesos de compactación y la implementación de técnicas de control de calidad. Se llevarán a cabo la aplicación de la metodología propuesta lo que permitirá evaluar la efectividad de la metodología en condiciones reales y realizar ajustes o mejoras si es necesario. Finalmente se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos, considerando la calidad de la capa de rodadura, la durabilidad del pavimento, la resistencia al tráfico y otros aspectos relevantes. Estos resultados permitirán evaluar la eficacia de la metodología propuesta y realizar recomendaciones para su implementación futura.

Hipótesis o preguntas científicas por defender.

El objetivo de esta investigación es adquirir conocimiento sobre el proceso de reciclaje del pavimento en las vías urbanas aplicándolo en vías urbanas. Se busca comprender cómo se puede llevar a cabo de manera eficiente y efectiva el reciclaje de pavimento en estas áreas urbanas, con el fin de promover prácticas sostenibles y mejorar la calidad de las vías. Es necesario identificar las mejores prácticas de mantenimiento para vías urbanas utilizando métodos de reciclaje considerando factores normativos en la construcción de las vías. Para ello se debe determinar los recursos necesarios, tanto humanos como materiales y evaluar la eficacia de diferentes técnicas de la rehabilitación estructural, en términos de durabilidad y rendimiento a largo plazo. Para abordar estos problemas nos planteamos las siguientes preguntas científicas de investigación: ¿Cuáles son los requisitos y estándares de calidad que deben cumplirse en la capa de rodadura de vías urbanas?, ¿Cuáles son los principales desafíos y limitaciones técnicas asociadas con el diseño de pavimento asfáltico reciclado?, ¿Cuáles son las mejores prácticas y recomendaciones para la implementación exitosa de pavimento asfáltico reciclado en vías urbanas?

Estructura del trabajo.

La investigación se estructuró en cuatro secciones principales que componen el cuerpo de la tesis, cada una aportando al tema central de estudio.

En el primer capítulo, se presenta el marco teórico y referencial, que engloba la recopilación de información teórica y técnica relacionada con el diseño de pavimentos reciclados en nuestro contexto de investigación.

El segundo capítulo describe la metodología utilizada y los materiales empleados en el estudio. Se explica detalladamente la metodología aplicada, incluyendo el enfoque y tipo de investigación, la determinación de la población y muestra, así como el plan de recopilación de datos y procesamiento de la información.

En el tercer capítulo, se presenta la propuesta metodológica para el diseño de pavimento asfáltico reciclado, con el objetivo de diseñar el proceso de reciclaje del pavimento en las vías urbanas de manera eficiente. Se detallan los elementos clave de la metodología y su aplicación en nuestro contexto.

El cuarto capítulo se centra en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos. Se presentan los hallazgos relacionados con los componentes del pavimento asfáltico reciclado, especialmente en la capa de rodadura, considerando sus características de diseño.

Finalmente, se exponen las conclusiones y recomendaciones basadas en la metodología de diseño presentada. Esta metodología permite identificar el proceso para el diseño del pavimento reciclado, determinando las características adecuadas para realizar las intervenciones y, de esta manera, prolongar la vida útil de los pavimentos en las vías urbanas.

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes históricos

1.1.1. *Historia de las carreteras*

Las carreteras, tal y como las conocemos hoy en día, surgieron en el siglo XX. Sin embargo, es importante destacar que algunos métodos de construcción y mantenimiento modernos fueron descubiertos hace varios siglos. Un tratado de 1755 ya mencionaba el uso de sustancias como el alpechín (un subproducto del aceite de oliva) para fortalecer el terreno de las carreteras (Ramos, 2007).

Hace unos 5000 años, se inventó la rueda en Mesopotamia (Asia Menor), lo que llevó a la necesidad de construir superficies para el tránsito de vehículos. Los primeros constructores de carreteras se remontan a los mesopotámicos alrededor del año 3500 a.C. La Carretera Real Persa, que estuvo en uso desde el año 3500 a.C. hasta el 300 a.C., es considerada la carretera más antigua de larga distancia. El recorrido de esta carretera ha sido reconstruido gracias a los escritos del historiador griego Heródoto y otras fuentes históricas (Cal y Mayor & Cárdenas G., 1995; Ramos, 2007).

Durante ese tiempo, los asirios y los egipcios iniciaron el desarrollo de sus propios caminos, señalando una ruta entre Asia y Egipto. Los cartagineses construyeron un sistema de caminos de piedra a lo largo de la costa sur del Mediterráneo en el año 500 A.C. Los etruscos construyeron caminos antes de la fundación de Roma. El historiador griego Heródoto menciona que el rey Keops de Egipto construyó caminos de piedra para transportar las inmensas piedras destinadas a las pirámides. Sin embargo, los caminos construidos científicamente surgieron con el Imperio Romano, siendo la Vía Appia, de Roma a Hidruntum, construida por Appius Claudius en el año 312 A.C., uno de los ejemplos más famosos. Los romanos son reconocidos por iniciar el método científico de construcción de caminos. Además, las culturas antiguas de América, como los mayas, los toltecas, los aztecas y los incas, demostraron una avanzada técnica en la construcción de caminos, siendo notables los llamados Caminos Blancos de los mayas en el sur de México y norte de Centroamérica (Cal y Mayor & Cárdenas G., 1995).

En China, se construyó la Ruta de la Seda, la cual fue la ruta más larga del mundo y estuvo en desarrollo durante 2.000 años. Durante el siglo XI a.C., los chinos desarrollaron un sistema de carreteras que alcanzó su máximo esplendor alrededor del 200 a.C. Esta ruta se conectaba con la red de calzadas romanas, formando una ruta de 12.800 km desde Cádiz en el Atlántico hasta Shangai en el Pacífico. Por otro lado, los Incas en Sudamérica construyeron una avanzada red de caminos sin utilizar la rueda. A pesar de esto, lograron desarrollar una red de caminos peatonales y para animales de carga que se extendía desde Quito en Ecuador hasta el sur de Cuzco en Perú. Esta red contaba con galerías talladas en roca sólida, muros de contención y tenía una anchura de 7,5 m, constituyendo una verdadera carretera (Ramos, 2007).

1.1.2. Historia de los Pavimentos.

El Museo de Zaragoza exhibe una colección de pavimentos romanos, en su mayoría mosaicos teselados con decoraciones figurativas y geométricas, provenientes de diversas ubicaciones. Estos pavimentos han sido expuestos de manera permanente en el museo, siendo una atracción para los visitantes (González, 2018).

En la historia de los pavimentos, los pavimentos de cocciopesto surgieron en el siglo V a.C. en el norte de África y se difundieron gracias al imperialismo romano en el Mediterráneo. Estos pavimentos eran lisos, duraderos, impermeables y económicos debido al uso de materiales locales. Sin embargo, para cumplir con los estándares estéticos romanos, se empezaron a utilizar teselas de mármol o piedra caliza para fines decorativos en el siglo I aC . En Hispania, con la conquista romana, se adoptaron las modas y tradiciones romanas, incluyendo el uso de pavimentos. En el siglo XVIII, Thomas Telford desarrolló un sistema de construcción de carreteras con cimientos de roca pesada en el centro para permitir el drenaje hacia los bordes. Este sistema, conocido como el firme de Telford, demostró resistencia y capacidad de carga (Blecua Roca, 2021; Ramos, 2007).

John McAdam mejoró el sistema de pavimentación al utilizar áridos angulares de diferentes tamaños y una capa superior de árido grueso. Este método, llamado pavimento de macadán, se popularizó en el siglo XIX. Sin embargo, durante la Primera Guerra Mundial, se volvió a utilizar el sistema de Telford debido a la necesidad de carreteras más sólidas (Ramos, 2007).

Se comenzó a utilizar alquitrán de hulla para recubrir los pavimentos de macadán, proporcionando una superficie más resistente. Esto marcó el inicio de los pavimentos modernos. A lo largo del tiempo, los métodos y materiales utilizados en la construcción de carreteras han evolucionado, creando carreteras más seguras y duraderas. La historia de los pavimentos refleja el progreso y la búsqueda de soluciones innovadoras en el campo de la infraestructura vial (Ramos, 2007).

1.1.3. Historia de los Pavimentos Reciclados.

El reciclado en los pavimentos es una preocupación importante en la sociedad actual, ya que se generan grandes cantidades de residuos de construcción y demolición (RCD) cada año. Entre estos residuos, se encuentran los residuos inertes, como la cerámica triturada, que plantean desafíos en su manejo adecuado. Existen varios factores que contribuyen a la falta de gestión de los residuos, como la sobreproducción, la falta de aplicación de la política de las 3R (reciclar, reparar y reusar) y la escasez de investigaciones que validen el uso de residuos inertes en diferentes producciones industriales (Solarte Vanegas, 2022). Es fundamental realizar investigaciones científicas rigurosas que evalúen el desempeño de las mezclas de pavimentos con residuos mediante ensayos de laboratorio. Estas investigaciones proporcionarían conocimiento sólido, reducirían la inseguridad y ofrecerían soluciones económicas y competitivas para los gobiernos, especialmente en zonas con niveles de tránsito bajos y medianos.

La aplicación de técnicas de reciclado en los pavimentos, utilizando residuos cerámicos como material de construcción, tiene el potencial de reducir la dependencia de los recursos naturales y contribuir a la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, es crucial respaldar estas prácticas con investigaciones científicas sólidas que garanticen la integridad y el rendimiento de los pavimentos reciclados. De esta manera, se puede avanzar hacia un futuro donde los pavimentos reciclados sean una solución viable y sostenible en la construcción de infraestructuras viales (Solarte Vanegas, 2022).

1.1.4. Residuos en el mundo

Recientemente, el Banco Mundial publicó un informe titulado "What a waste 2.0 A global snapshot of Solid Waste Management to 2050", en el cual se analizan los efectos de la generación de residuos en el mundo y todas las variables relacionadas. Se estima que el

sector de la construcción consume el 40% de los materiales extraídos y es responsable del 10-35% de los residuos que se encuentran en los sitios de disposición (Abarca Guerrero et al., 2019). Se destaca la importancia de la gestión de residuos por parte de los gobiernos, los desafíos asociados al crecimiento económico y demográfico, así como el tratamiento y la disposición de los desechos, los modelos operativos y de financiamiento, y el impacto ambiental y social. Se estima que la generación de residuos aumentará en un 69% entre 2016 y 2050, lo que representa un incremento de 1.39 billones de toneladas. Este aumento refleja la creciente preocupación por el manejo adecuado de los desechos sólidos. A pesar de que los gobiernos han implementado mejoras e innovaciones en la gestión de residuos, se requiere una acción urgente para hacer frente a esta problemática (Solarte Vanegas, 2022, p. 12).

Un estudio realizado en Costa Rica ha identificado las causas de la generación de residuos en la construcción, priorizando posteriormente estas causas. Se encontró que las causas están relacionadas con actividades de diseño, gestión de compras, manejo de materiales, ejecución del proyecto y residuos derivados del proceso de construcción, así como otras variables no especificadas. Este análisis destaca la importancia de abordar la generación de residuos en la industria de la construcción y buscar soluciones que reduzcan su impacto ambiental. El manejo adecuado de los materiales, la planificación eficiente y la adopción de prácticas sostenibles son clave para minimizar los residuos y promover una construcción más responsable desde el punto de vista ambiental (Abarca Guerrero et al., 2019).

1.2. Antecedentes conceptuales

1.2.1. Concepto de pavimentos

El concepto de pavimentos se refiere a las estructuras construidas sobre el terreno natural con el objetivo de proporcionar una superficie segura y cómoda para la circulación. Estos pavimentos están compuestos por capas superpuestas de materiales apropiados, diseñadas para esparcir la energía que producen las cargas de los vehículos, personas o medios de transporte; sin rebasar la capacidad de carga del terreno natural (Bonilla et al., 2017). Descansan sobre la subrasante de una vía, que es el resultado del movimiento de tierras durante el proceso de exploración. Los pavimentos deben resistir de manera adecuada

los esfuerzos generados por las cargas repetitivas del tráfico durante su vida útil (Vallejo, 2022).

Los pavimentos flexibles, que incluyen una base, sub-base y una capa asfáltica relativamente delgada, requieren un mantenimiento adecuado para garantizar el confort y la seguridad de los usuarios, así como mantener su calidad funcional y reducir los costos operativos. Para lograr estos objetivos, es fundamental que los administradores de las redes viales realicen un seguimiento exhaustivo del estado de los pavimentos flexibles y diseñen estrategias de mantenimiento eficientes (Vera et al., 2010).

Existen diferentes tipos de pavimentos, como los flexibles, rígidos y articulados, cada uno con características y composición distintas. Los pavimentos flexibles están compuestos por una capa asfáltica relativamente delgada. En cambio, los pavimentos rígidos consisten en una losa de concreto hidráulico, que determina la resistencia del pavimento. Dentro de estos tipos de pavimentos, hay variantes adicionales que presentan diferentes características y se utilizan en diversas situaciones y condiciones de tráfico (Vallejo, 2022).

1.2.2. Estructura del pavimento

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador establece las siguientes especificaciones para la estructura de pavimentos son fundamentales para garantizar la calidad y durabilidad de las carreteras. Se utilizan diferentes métodos y materiales en cada capa de la estructura para lograr un pavimento resistente y funcional. A continuación, se presentan algunas de las especificaciones utilizadas:

Para el mejoramiento de la subrasante, se pueden aplicar distintas técnicas como el mejoramiento con suelo seleccionado, la estabilización con cal, el uso de material pétreo, la empalizada, la utilización de geotextiles o geomallas biaxiales, y el uso de membranas sintéticas para estabilización e impermeabilización. En cuanto a las subbases, se pueden utilizar agregados o realizar modificaciones con arena, limo o cal, dependiendo de las necesidades y características del proyecto. Las bases, por su parte, pueden estar compuestas por agregados, agregados estabilizados con cemento Portland o cal, o incluso hormigón asfáltico mezclado en sitio o en planta (Ministerio de Obras Públicas, 2002).

La capa de rodadura, la más expuesta al tránsito, puede ser tratada con diferentes métodos, como riegos de imprimación o bituminosos de adherencia, tratamientos

bituminosos superficiales, hormigón asfáltico mezclado en sitio o en planta, capas bituminosas de sellado, lechada asfáltica, o incluso pavimentos de hormigón de cemento Portland (Ministerio de Obras Públicas, 2002).

En cuanto a la reparación y mantenimiento de los pavimentos, se utilizan técnicas como la utilización de geotextiles, recuperación con emulsiones asfálticas o hormigón asfáltico mezclado en planta, capas de alivio para controlar la reflexión de fisuras, micro-aglomerado, recuperación con asfáltico expandido en sitio, capas delgadas de micro-aglomerados en caliente, y el fresado de pavimento asfáltico (Ministerio de Obras Públicas, 2002).

1.2.3. Pavimentos asfálticos reciclados.

El Pavimento Asfáltico Reciclado (PAR, por sus siglas en inglés) es un subproducto del fresado del pavimento, generado durante la rehabilitación o reconstrucción de la estructura del pavimento. Consiste en una mezcla de agregados de tamaño medio a fino unidos por contenido de asfalto. El PAR ha ganado importancia como material para la capa base en los últimos años debido al creciente acopio de PAR y al uso limitado en la producción de mezclas asfálticas. Han sido objeto de varios estudios sobre su ciclo de vida y su impacto ambiental. A pesar de ello en algunas investigaciones no se ha encontrado una reducción significativa de emisiones al comparar los pavimentos reciclados con una mezcla asfáltica tradicional en caliente (Castro Medina & Sabogal Melendez, 2021; Ullah et al., 2018).

El PAR (Recycled Asphalt Pavement) ha sido estudiado como una opción para reducir los residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero en mezclas asfálticas. Se han establecido limitaciones en el diseño de mezclas que permiten hasta un máximo del 15% de PAR para evitar la variabilidad en el diseño de la mezcla. Sin embargo, en la siguiente tabla se presenta estudios han demostrado que la inclusión de un 17% de PAR en la mezcla puede generar una mayor reducción de emisiones de CO₂ en comparación con una inclusión del 20% de PAR. Además, se han evaluado mezclas con un 30% de PAR y se encontraron reducciones de hasta un 30% en las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos hallazgos respaldan el uso del PAR en mezclas asfálticas como una medida efectiva para disminuir el impacto ambiental (Castro Medina & Sabogal Melendez, 2021; Ullah et al., 2018).

Mezcla Asfáltica	Contenido de PAR (%)	Emisiones CO2 (libras/ton)
1	0	164.5
2	20	155.4
3	20	130.5
4	20	124.1
5	20	117.5
6	17	132.6
7	0	150.3

Tabla 1 Diferencia de emisiones de CO2 por inclusión de PAR

Fuente: Una revisión sobre los sistemas de evaluación de sostenibilidad de Pavimentos (Castro Medina & Sabogal Melendez, 2021).

Estos estudios demuestran que los pavimentos reciclados pueden tener un impacto positivo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con las mezclas asfálticas convencionales.

Los primeros estudios se centraron en las propiedades elásticas, especialmente en el módulo resiliente (MR), para evaluar el rendimiento del PAR como material para la capa base. Se observó que el PAR tiene un MR más alto que los agregados vírgenes, lo que sugiere un mejor rendimiento. Sin embargo, investigaciones más recientes han demostrado que, aunque el PAR presenta un MR más alto, acumula deformaciones permanentes (PD) más altas que los agregados vírgenes, lo que puede provocar deformaciones excesivas en la estructura del pavimento. Por lo tanto, no se permite el uso del 100% de PAR como agregado para la capa base, y se recomienda mezclar el PAR con agregados vírgenes de alta calidad para limitar las deformaciones excesivas. Algunos estudios también sugieren técnicas de mejora del suelo además de la mezcla de PAR con agregados de alta calidad para limitar el problema de las deformaciones excesivas (Ullah et al., 2020).

Es importante seguir investigando y desarrollando nuevas tecnologías y prácticas para mejorar aún más la sostenibilidad de los pavimentos reciclados y maximizar sus beneficios ambientales (Castro Medina & Sabogal Melendez, 2021). El objetivo de modificar las mezclas asfálticas es mejorar sus propiedades mecánicas para que sean resistentes a las condiciones de servicio. Esto implica considerar factores como la temperatura, el clima, la ubicación geográfica y el tipo de tráfico con el fin de prolongar la vida útil del pavimento. Para lograr esto, se han desarrollado aditivos que mejoran la adherencia y cohesión entre los materiales de la mezcla asfáltica, especialmente en relación con el daño causado por la humedad. Estas mejoras son esenciales para garantizar la

durabilidad y resistencia de los pavimentos frente al tráfico y las condiciones ambientales (Vasquez et al., 2021; Villegas et al., 2018).

1.2.4. Tipos de pavimentos asfálticos reciclados.

Existen diferentes tipos de pavimentos reciclados que se han estudiado en términos de su impacto ambiental y desempeño. Algunos de ellos incluyen:

- Agregado de Concreto Reciclado (ACR): Su inclusión en la mezcla asfáltica puede generar mayores impactos en comparación con el uso de agregados naturales debido a las distancias de transporte del material. Sin embargo, también se han encontrado reducciones de emisiones ambientales al utilizar concreto reciclado en la composición de la mezcla (Castro Medina & Sabogal Melendez, 2021).
- Caucho molido de llantas: Las mezclas asfálticas con adición de grano de caucho no presentan diferencias significativas en emisiones de CO₂ en comparación con las mezclas no modificadas. Su uso como modificador del betún o como aditivo en la mezcla mejora la sostenibilidad, durabilidad y reduce la necesidad de explotación de recursos naturales. La adición de caucho y vidrio molido en mezclas densas en caliente muestra menores impactos, mientras que el vidrio molido aumenta el consumo de energía (Castro Medina & Sabogal Melendez, 2021; Praticò et al., 2020).
- Residuos plásticos (WP): Su incorporación al betún modifica las propiedades del aglomerante y mezclado con agregados mejora la resistencia, durabilidad y propiedades de impermeabilización de la mezcla asfáltica (Praticò et al., 2020).
- Aditivos naturales y nanoaditivos: La ceniza de dátil, residuos de carburo de calcio, nanoarcilla, nanocaliza, nano óxido de zinc, polibutileno y cal hidratada han demostrado mejorar propiedades como la resistencia a la humedad, adhesión y durabilidad de las mezclas asfálticas modificadas (Vasquez et al., 2021).

Estos estudios demuestran que los pavimentos reciclados, ya sea a través de la inclusión de agregado de concreto reciclado o de caucho molido proveniente de llantas,

pueden tener un impacto positivo en la reducción de emisiones y en la sostenibilidad de las estructuras de pavimento.

1.2.5. Experiencias utilizadas en PAR en otros países

El reciclaje de pavimentos se ha utilizado en numerosos proyectos en América, Canadá, Europa y Asia. Se han realizado investigaciones para mejorar las propiedades y el rendimiento de las mezclas recicladas, así como para evaluar el impacto de diferentes factores en el diseño y la calidad de los pavimentos reciclados (Xiao et al., 2018). Se requiere implementar estrategias para prevenir y reducir la generación de residuos de construcción, incentivando la reutilización de materiales y promoviendo el mercado de reciclaje. En la **tabla 2** se muestra los aspectos y las motivaciones principales para la población al implementar la reducción de residuos de construcción.

Además, se destaca la importancia de aplicar la ley y establecer multas para motivar a las empresas a reducir la contaminación. Las empresas de construcción suelen seguir las prácticas de la competencia, por lo que la inclusión de buenas prácticas de manejo de materiales y construcción sostenible puede mejorar su imagen y ampliar su mercado. Los proveedores de materiales desempeñan un papel crucial al brindar asistencia e información sobre nuevos equipos y materiales sostenibles. Asimismo, la demanda de construcciones sostenibles por parte de los clientes puede generar un cambio en la actitud y comportamiento de los trabajadores de la industria (Abarca Guerrero et al., 2019).

Aspectos	Motivaciones
Financiero/económico	Altos costos de disposición en los sitios de disposición final
	Conciencia sobre la reducción de costos debido a la disminución de pérdidas de material y ahorro en materias primas
	Disminución de los costos legales asociados a los problemas ambientales asociados
	Ganancias adicionales, resultado de la reventa de subproductos
	Ahorros en energía (electricidad, combustibles fósiles)
Institucional	Formación de una cultura de manejo de residuos dentro de la empresa
	Promoción de la imagen de la empresa
	Promoción del intercambio/competencia en el mercado
	Seguimiento de las acciones de la competencia
Ambiental	Conciencia ambiental del sector de la construcción
Técnico	Experiencia de construcción con materiales reciclados
	Desarrollo de especificaciones e instrucciones para el uso de materiales reciclados
	Espacio en el sitio para la gestión de los residuos de forma adecuada
	Tecnologías de construcción con poca generación de residuos

	Compra de equipo y/o máquinas para la minimización de residuos
	Mejorar las habilidades de los trabajadores
	Asistencia o información de los trabajadores
Sociocultural	Actitudes de los principales trabajadores
	Demanda de los clientes de construcciones sostenibles
Legal/Político	Mandatos gubernamentales de reciclaje
	Regulación ambiental gubernamental puesta en practica
	Instrucciones específicas para el uso de materiales reciclados
	Un marco legal bien establecido para la gestión de los residuos de la construcción
	Fiscalización adecuada del marco legal

Tabla 2 Motivaciones para implementar la reducción de residuos de construcción

Fuente: Gestión de materiales de construcción en Costa Rica para reducción de residuos: barreras y motivaciones (Abarca Guerrero et al., 2019).

Estados Unidos lidera el desarrollo de la tecnología de reciclaje en frío en pavimentos. Se han realizado proyectos en diferentes estados como Ohio, Pennsylvania, Kansas, Iowa, Nevada, California y Nueva York. Canadá también ha tenido avances significativos en esta tecnología, rehabilitando más de 40 millones de metros cuadrados de pavimento en los últimos veinte años. Ontario y Quebec han llevado a cabo proyectos para evaluar el rendimiento y propiedades de las mezclas recicladas. España ha empleado esta tecnología desde 1990, con proyectos en Italia y Grecia para evaluar el rendimiento y calidad del pavimento. En India, Irán, Pakistán y China, el reciclaje en frío se utiliza ampliamente en proyectos de rehabilitación. En China, se han realizado investigaciones sobre diseño de mezclas, compactación, análisis de costos del ciclo de vida y el efecto de la gradación en el rendimiento de los pavimentos rehabilitados (Xiao et al., 2018).

1.2.6. Métodos para el diseño de mezclas asfálticas.

El método AASHTO 93, también conocido como el método de diseño AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) 1993, es un enfoque que considera factores como el tráfico, las condiciones climáticas, las propiedades de los materiales y las características del suelo subyacente para determinar el espesor y las especificaciones de las diferentes capas del pavimento utilizado para el diseño de pavimentos flexibles en carreteras. Este método se basa en principios mecanicistas-empíricos y ha sido ampliamente utilizado en Estados Unidos y en otros países. Utiliza modelos matemáticos y análisis de tensión-deformación para evaluar el comportamiento estructural del pavimento y predecir su capacidad de soporte y resistencia a las deformaciones (Castro Vásquez et al., 2020).

El Método MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide), desarrollado por el Transportation Research Board (TRB) de Estados Unidos, utiliza modelos matemáticos avanzados para evaluar el comportamiento de los pavimentos considerando múltiples variables como tráfico, clima, materiales y características del suelo. Se considera más preciso y actualizado que el método AASHTO, permitiendo predecir y mitigar problemas de fatiga en la capa superficial, prolongando la vida útil y mejorando el rendimiento de los pavimentos. El MEPDG toma en cuenta esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en diferentes capas del pavimento. Además, se han desarrollado modelos de fatiga para predecir el comportamiento de la capa superficial ante cargas repetidas de tráfico, considerando aspectos como composición de las mezclas asfálticas, condiciones de ensayos de fatiga y calibración del modelo en laboratorio (Brasil et al., 2021).

El Método CBR (California Bearing Ratio) se utiliza para el diseño de pavimentos flexibles. Se basa en ensayos de laboratorio para determinar la resistencia del suelo y seleccionar el espesor adecuado de las capas del pavimento según el valor del CBR. Sin embargo, estudios han demostrado que este enfoque puede llevar a estructuras de pavimento sobredimensionadas. Aunque requiere más trabajo de campo y laboratorio, es una opción viable y económica, utilizando equipos comunes. Los resultados del ensayo de CCBR pueden estimar el módulo resiliente de suelos blandos de subrasante, brindando una buena estimación de la rigidez, aunque a niveles de esfuerzo más bajos que los ensayos mecanicistas estándar. Se recomienda incluir ensayos adicionales en futuras investigaciones, como la relación de Poisson, para refinar los valores obtenidos. A pesar de la necesidad de mayor esfuerzo en extracción y análisis de muestras, los resultados del ensayo de CCBR demuestran su utilidad y validez en la estimación de la rigidez de los suelos (Bojacá Torres et al., 2022).

1.2.7. Resultados de utilización de PAR

Los resultados indican que el material 100% PAR y el material 50% PAR / 50% VA (Asfalto virgen) producen resultados de módulo similares al VA, especialmente a presiones de confinamiento más altas. El comportamiento de los materiales con PAR se ve principalmente afectado por las tensiones de confinamiento. Los modelos investigados describen de manera equivalente el comportamiento de los materiales con PAR, respaldando su inclusión en proyectos de pavimentación nuevos y de rehabilitación desde una perspectiva

de sostenibilidad. Para mejorar la precisión del diseño del pavimento, se recomienda desarrollar modelos que consideren las características del PAR, como el envejecimiento del ligante asfáltico. Los resultados sugieren un máximo inicial del 50% de PAR. Es importante establecer especificaciones que permitan una mayor incorporación de PAR en las capas base del pavimento, en línea con los objetivos de sostenibilidad (Plati & Cliatt, 2018). Se destaca la necesidad de investigación continua para lograr estos objetivos y aumentar la sostenibilidad, considerando el potencial de reciclaje completo del PAR.

Un estudio evaluó el desempeño de mezclas de PAR-VA mediante pruebas de deformación permanente bajo cargas de tráfico representativas. Se concluyó que agregar PAR a las mezclas de VA reduce las deformaciones permanentes, pero existe un contenido de PAR umbral que no debe excederse para mantener el desempeño del asfalto virgen. Los valores umbral varían según la fuente de PAR y se ven afectados por el número de ciclos de carga. Se observó que las propiedades del PAR influyen en los resultados, y algunas de las mezclas de PAR-VA acumulan más deformaciones permanentes que el asfalto virgen (Ullah et al., 2018).

Se encontró metodologías que analizan el ciclo de vida de estos asfaltos, el cual se observa en la **Ilustración 1** y proporciona información para el desarrollo de modelos de bajo consumo energético y modelos de producción innovadores en el campo de las carreteras.

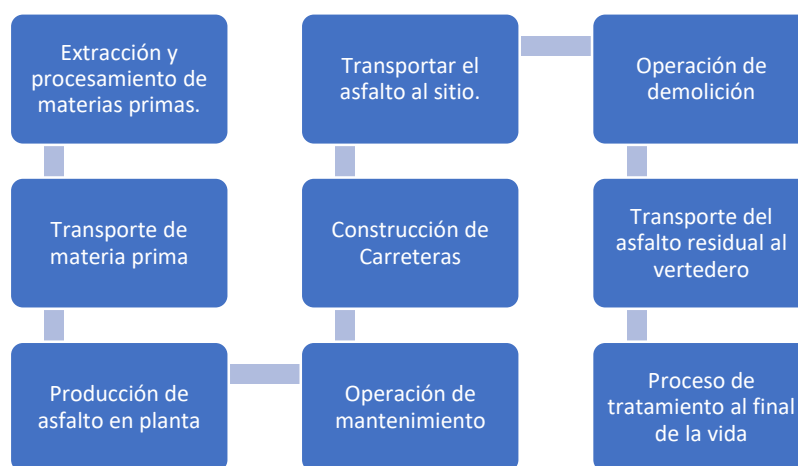


Ilustración 1 límites del sistema evaluado

Fuente: A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads (Gulotta et al., 2019)

El análisis de ciclo de vida indica que la etapa de producción de materiales tiene un impacto energético y ambiental relevante. Los escenarios de pavimentos con materiales reciclados muestran menores impactos energéticos y ambientales debido al ahorro de materias primas y la reducción de impactos por disposición. Resultados indican que utilizar mezclas asfálticas porosas con un 30% de materiales reciclados (PAR), tiene el menor consumo de energía en términos de GER (Demanda Energética Global). La producción de materiales es la etapa que más contribuye a la GER en todos los escenarios evaluados. En cuanto a los impactos ambientales, los escenarios con PAR tienen una ligera mayor contribución en las categorías de impacto. La etapa de producción de materiales también es la que más contribuye a los impactos ambientales en la mayoría de las categorías evaluadas. El uso de mezclas asfálticas templadas en combinación con materiales reciclados ayuda a reducir el consumo de energía y los impactos ambientales (Gulotta et al., 2019).

1.2.8. Datos importantes en aplicación de PAR en vías urbanas.

Se mencionan aspectos como la humedad, la condición del ligante, el contenido de PAR, el origen del PAR y la gradación del agregado, y se presentan estudios que demuestran cómo estos factores influyen en el rendimiento y la durabilidad del pavimento reciclado (Xiao et al., 2018). A continuación, se detallan ciertos aspectos que son importantes en el uso del PAR:

Materiales PAR:

Los materiales PAR son reciclados de pavimentos existentes mediante un proceso de fresado y trituración, y luego se mezclan con una nueva mezcla de asfalto y otros aditivos. Se deben evaluar las características de los materiales PAR, como el contenido de humedad, la condición del ligante asfáltico y el contenido de PAR. El contenido de PAR puede influir en las propiedades adhesivas de la mezcla y puede estimarse mediante pruebas de horno de ignición. El origen del PAR también es importante, ya que puede influir en la gradación de la mezcla y en características como la rigidez, durabilidad, estabilidad y permeabilidad (Xiao et al., 2018).

El contenido de agua en el PAR afecta el rendimiento final del pavimento, por lo que se debe considerar al calcular la cantidad de agua agregada a la mezcla. El contenido de humedad de PAR en campo puede ser mayor si se utiliza asfalto de emulsión.

Condición del ligante asfáltico en PAR:

Es necesario identificar si el ligante asfáltico en el PAR está "activo" o no, ya que la cohesión interna es importante para las mezclas recicladas y el rendimiento del pavimento. Se pueden realizar pruebas de laboratorio para determinar la condición del ligante, como el valor de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento (Xiao et al., 2018).

Contenido de PAR:

El contenido de asfalto en el PAR activo juega un papel importante en las propiedades adhesivas. El contenido de asfalto de cada fuente de PAR se puede estimar mediante pruebas de horno de ignición. El contenido comúnmente varía entre el 4% y el 7.5%, y se ha estudiado el efecto del contenido de PAR en las propiedades mecánicas y de rendimiento del pavimento reciclado (Xiao et al., 2018).

Origen del PAR:

El origen del PAR puede determinarse mediante la clasificación PG del ligante asfáltico recuperado de la mezcla de PAR. El origen del PAR influye en la gradación de la mezcla y en características como la rigidez, durabilidad, estabilidad y permeabilidad. Se han realizado estudios sobre el efecto del origen del PAR en propiedades como el módulo dinámico, la resistencia a la deformación y el comportamiento de compactación (Xiao et al., 2018).

Graduación del agregado en PAR:

La graduación del agregado en el PAR es importante para controlar la calidad de la mezcla reciclada. Se deben realizar análisis de tamizado para determinar la graduación original del PAR y si es necesario agregar agregado virgen adicional. En algunos casos, se utilizan agregados alternativos, como escoria de acero, y se ha estudiado su efecto en las propiedades mecánicas de la mezcla reciclada (Xiao et al., 2018).

1.2.9. Vías urbanas con pavimento asfáltico reciclado

Tradicionalmente, los pavimentos flexibles se han construido utilizando una mezcla de asfalto en caliente (HMA), que consiste en betún y agregados vírgenes, y se produce a temperaturas que oscilan entre 150 y 170 °C. El uso de agregados vírgenes implica la

extracción de recursos naturales, mientras que las altas temperaturas requieren una gran cantidad de energía y generan emisiones de gases residuales, partículas y compuestos orgánicos volátiles (COV), como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono (Praticò et al., 2020).

Las investigaciones destacan la importancia de utilizar tecnologías de pavimentación óptimas en términos de energía y medio ambiente para vías urbanas (Praticò et al., 2020). Se enfatiza el uso de tecnologías como la mezcla templada de asfalto (WMA) y materiales reciclados (PAR) en la construcción de pavimentos urbanos para reducir el consumo de energía y los impactos ambientales. Se sugiere que el diseño ecológico de la producción de materiales de construcción, incluyendo el uso de materiales más sostenibles, puede mejorar aún más el perfil ecológico de las tecnologías de asfalto utilizadas en las vías urbanas.

La tecnología LE2AP permite la producción de mezclas asfálticas porosas de alta calidad con alto porcentaje de reciclaje, lo que contribuye a la sostenibilidad y a la reducción de materiales de desecho en la construcción de vías urbanas (Qiu et al., 2018). Estas mezclas asfálticas porosas pueden producirse a baja temperatura, lo que implica un menor consumo de energía y reducción de emisiones. El uso de materiales reciclados en estas mezclas contribuye a la economía circular y a la reducción de la extracción de recursos naturales.

- Las mezclas asfálticas porosas LE2AP, que contienen un 93% de materiales reciclados, pueden producirse a temperaturas tan bajas como 105°C utilizando métodos de espumado de betún o espumado de mortero, y presentan buenas propiedades en términos de resistencia, rigidez y sensibilidad al agua (Qiu et al., 2018).
- Se construyeron secciones de prueba en las que se utilizaron materiales reciclados obtenidos de la descomposición de mezclas asfálticas porosas. Estas secciones de prueba indican el potencial de producir asfalto poroso de alta calidad a baja temperatura con un máximo de 93% de reciclaje (Qiu et al., 2018).

Los resultados de estas investigaciones pueden informar el diseño y la selección de materiales para pavimentos más sostenibles desde el punto de vista energético y ambiental en carreteras urbanas (Gulotta et al., 2019). El uso de materiales reciclados, como PAR, en las mezclas asfálticas permite reducir la necesidad de extraer recursos naturales y minimizar

los impactos ambientales asociados a la disposición de materiales. La adopción de tecnologías como mezclas asfálticas templadas (WMA) puede contribuir a reducir el consumo de energía en la producción de pavimentos y mitigar los impactos ambientales asociados.

1.2.10. Utilización de PAR en capa de rodadura de vías urbanas

Se han evaluado los aglomerantes de asfalto recuperados de mezclas de pavimento que habían estado en servicio en carreteras de Hong Kong durante diferentes períodos de tiempo. Se compararon las propiedades químicas, reológicas y de desempeño de los aglomerantes de asfalto envejecidos en campo con los aglomerantes de asfalto envejecidos en laboratorio. Se encontró que el envejecimiento en campo de los aglomerantes de asfalto fue significativamente mayor que el envejecimiento en laboratorio. (Qian et al., 2020). El método convencional de envejecimiento no es suficiente para simular el efecto de envejecimiento a largo plazo en los aglomerantes. El autor indica que se recomienda desarrollar un proceso de envejecimiento más riguroso en el laboratorio para una mejor simulación del envejecimiento a largo plazo en campo.

En otra investigación relacionada con la construcción de capas de CTB (bases tratadas con cemento) mezclado en el lugar, se encontró que estas alternativas tienen impactos ambientales significativamente más bajos en comparación con las alternativas de CTB mezclado en planta (Bressi et al., 2022). Se observaron reducciones sustanciales en los impactos ambientales, principalmente debido a la disminución en el volumen de materiales transportados y a las distancias de transporte más cortas. Se identificó la mezcla como la opción más favorable desde el punto de vista ambiental. La utilización de PAR disponible in situ en las mezclas CTB mezcladas en el lugar se asoció con impactos ambientales más bajos, incluso si el espesor de la capa requerida era mayor. Se plantea la necesidad de mejorar el conocimiento de las características mecánicas de las mezclas de CTB, especialmente cuando contienen materiales reciclados, y desarrollar un enfoque de diseño de pavimentos probabilístico que considere las incertidumbres asociadas a los parámetros de diseño y los impactos ambientales.

1.2.11. Desarrollo Sostenible y la agenda 2030

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que se relacionan directamente con el uso de PAR en pavimentos urbanos y su impacto energético y ambiental son:

Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante (Hidalgo Capitán et al., 2019) el cual busca garantizar el acceso a una energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos. El uso de pavimento reciclados busca reducir el consumo de energía en la producción y uso de pavimentos, mediante el uso de tecnologías como las mezclas asfálticas templadas (WMA) y el reciclaje de materiales.

Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura (Hidalgo Capitán et al., 2019) busca construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. El uso de pavimento reciclados se centra en el desarrollo de tecnologías y prácticas más sostenibles en la construcción de pavimentos, utilizando materiales reciclados y técnicas de producción de bajo consumo energético.

Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles (Hidalgo Capitán et al., 2019) busca lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. El uso de pavimento reciclados contribuye a este objetivo al proporcionar información para el diseño y selección de pavimentos urbanos más sostenibles desde el punto de vista energético y ambiental.

Objetivo 12: Producción y consumo responsables (Hidalgo Capitán et al., 2019) busca garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. El uso de pavimento reciclados se alinea con este objetivo al promover el uso de materiales reciclados y tecnologías de producción de bajo consumo energético en la construcción de pavimentos.

1.3. Antecedentes contextuales

1.3.1. Ubicación donde se realiza la investigación

Para contrastar la aplicación de la Metodología para Diseño de Pavimento Asfáltico Reciclado se consideró el cantón General Villamil Playas, ubicado en la provincia del Guayas, este cantón es reconocido como el único destino turístico de sol y playa en la provincia (Carvache Franco et al., 2018). Es un lugar plenamente turístico, con un sin

número de actividades turísticas (Terranova Mera & Bravo Bravo, 2018). Aunque cuenta con atractivos naturales y culturales, la falta de promoción turística ha llevado a que muchos rincones del cantón sean desconocidos para los visitantes. A pesar de recibir una gran cantidad de visitantes en los feriados, la falta de promoción perjudica el desarrollo turístico de la región. La centralización de los atractivos en Playas ha llevado a que destinos como El Faro y la comuna del Pelado sean menos visitados. Aunque el cantón ha experimentado un crecimiento turístico en la última década, se han observado problemas de crecimiento desordenado y salubridad debido al turismo masivo. Las preferencias de los turistas se centran en las playas y la gastronomía del cantón, y se destaca la importancia de la promoción turística en medios digitales para atraer visitantes, especialmente adultos guayaquileños de entre 34 y 40 años (León Ramírez et al., 2020).

El cantón General Villamil Playas se encuentra en la costa de Ecuador. Es un destino turístico conocido por su variada gastronomía y está ubicado a 96 km de la ciudad de Guayaquil. El acceso al cantón se realiza por vía terrestre, ya que la corta distancia entre Guayaquil y Playas permite que los turistas que llegan a la ciudad visiten este destino costero en aproximadamente una hora. El cantón limita al norte y al oeste con Guayaquil y Santa Elena, mientras que al sur y al oeste se encuentra el Océano Pacífico. El cantón cuenta con tres playas principales: Bellavista, El Arenal, Puerto Engabao y Data de Villamil. Entre los atractivos turísticos se destacan la práctica de juegos acuáticos, el Santuario de la Virgen de la Roca, el Sendero Acuático, la práctica de surf, la Casa de don Víctor Estrada y las cabalgatas por la playa (Carvache Franco et al., 2017).

1.3.2. Características de la zona

El cantón Playas, también conocido como General Villamil Playas, tiene una población total de 59,628 habitantes, con 34,409 habitantes en el área urbana. El terreno del cantón es en su mayoría plano, con un 80% de superficie plana y un 20% representado por cerros de baja altura en el sector norte, como el Cerro Colorado, Cerro Verde, Cerro Picón y Cerro Cantera. El cantón Playas es propenso a riesgos de inundaciones por tsunamis, especialmente en las parroquias El Morro, Posorja y Puná, siendo esta última la más vulnerable. Además, se destaca por tener un clima privilegiado, que lo posicionan como el segundo mejor clima en el mundo. Este clima seco tropical es influenciado por la Corriente del Humboldt, que afecta a la Península de Santa Elena, la parte sur de la Isla Puná y las

partes bajas de las Islas Galápagos. Estas condiciones secas son resultado de los vientos fríos del suroeste que acompañan a la corriente fría de Humboldt (Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Playas, 2014).

1.3.3. Red vial

La red vial en el cantón Playas es de gran importancia para el desarrollo físico y el desplazamiento de peatones y vehículos. Según el Inventario Vial del cantón, el 20% de la red vial se encuentra en buen estado, mientras que el 10% está en estado regular y el 60% se encuentra en mal estado. La ciudad de Playas, al ser el único balneario de la provincia del Guayas, atrae a numerosos turistas nacionales y extranjeros, así como a personas de comunas y recintos cercanos que acuden a acceder a servicios de salud y educación. En la cabecera cantonal de Playas, existe un eje vial estructural de gran importancia que atraviesa la ciudad de norte a sur y viceversa. (Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Playas, 2014).

En Ecuador, se hace referencia a la Red Vial Nacional como el conjunto de vías públicas que se rigen por la normativa y el marco institucional vigentes. Esta red está conformada por una sección nacional compuesta por vías de grado 1 y grado 2, una sección provincial que abarca las vías de grado 3, y una sección urbana que engloba las vías gestionadas centralmente. El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) es el organismo encargado de la administración y control de estas vías, en cumplimiento de la Ley Especial de descentralización del Estado y de Participación Social (Betancourt, 2014).

CAPITULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Tipo de estudio

Exploratorio. - En nuestro estudio, adoptamos un enfoque exploratorio para examinar un tema o problema de investigación que ha sido poco estudiado en el pasado (Arias González et al., 2020). A través de la revisión de la literatura, identificamos una falta de información sobre el tema. La falta de estudios previos nos llevó a realizar una investigación exploratoria con el objetivo de obtener una comprensión más profunda y detallada del problema. Este enfoque nos permitió explorar nuevas ideas y recopilar datos para establecer una base sólida para la investigación.

Descriptivo. – En nuestro estudio, utilizaremos un enfoque descriptivo para observar, describir y fundamentar los elementos más importantes de la investigación (Arias González et al., 2020). Este enfoque nos permitirá caracterizar de manera detallada los materiales pétreos, el betún de petróleo asfalto utilizados en nuestro estudio. Mediante la descripción de estas características, podremos obtener una comprensión clara de cómo se comportan y cuáles son sus propiedades más relevantes en relación con nuestro objetivo de investigación. Este enfoque descriptivo nos brindará una visión clara de las características de los materiales y su comportamiento, lo cual será fundamental para el diseño y desarrollo de nuestro estudio.

Correlacional. - En nuestro estudio, aplicaremos un enfoque correlacional para analizar la relación entre dos variables importantes en el fenómeno que estamos investigando (Arias González et al., 2020). En particular, nos interesa determinar el porcentaje óptimo de pavimento asfáltico recuperado (variable uno) que nos permitirá desarrollar una capa de rodadura de calidad (variable dos). Utilizando el enfoque correlacional, examinaremos si existe una relación cuantitativa entre el porcentaje de pavimento asfáltico recuperado y la calidad de la capa de rodadura. Mediante el análisis estadístico de los datos recopilados, podremos determinar si existe una asociación significativa entre estas dos variables y si esta asociación es positiva o negativa. Podremos identificar el porcentaje óptimo de pavimento asfáltico recuperado que proporciona la mejor calidad de capa de rodadura, lo cual es fundamental para la eficiencia y durabilidad de los pavimentos.

2.2. Paradigma o enfoque desde el cual se realizo

El paradigma de nuestra investigación será el paradigma positivista. Según Hernández & Mendoza, el paradigma es una concepción o visión del mundo que guía cómo pensamos y estudiamos los fenómenos. En nuestro caso, nuestro trabajo investigativo se basa en teorías ya comprobadas y utiliza métodos experimentales para analizar y determinar el porcentaje óptimo de Pavimento Asfáltico Recuperado que proporcionará una capa de rodadura de calidad.

El paradigma positivista se caracteriza por ser cuantitativo, empírico-analítico y racionalista (Ricoy Lorenzo, 2006). Se aplica principalmente en el campo de las ciencias naturales y tiene un enfoque científico-tecnológico. En nuestro estudio, adoptaremos este enfoque positivista para analizar la relación entre el porcentaje de Pavimento Asfáltico Recuperado y la calidad de la capa de rodadura. Utilizaremos métodos cuantitativos para recopilar y analizar datos, y buscaremos explicar la metodología para la aplicación de un Pavimento Asfáltico Recuperado para la aplicación en la capa de rodadura. A través de este enfoque positivista, buscamos generar conocimiento objetivo y riguroso que contribuya a mejorar la construcción y mantenimiento de pavimentos.

2.3. Población y muestra

La población de nuestra investigación estuvo constituida por las vías urbanas en general. Sin embargo, para realizar el estudio de manera más específica, se seleccionó una muestra representativa de la vía E-489 vía El Progreso a General Villamil Playas, en el tramo comprendido entre el Monumento A La Balsa y la Intersección Av. Sixto Chang. Esta muestra se consideró adecuada para obtener datos relevantes y representativos de las características de los pavimentos en vías urbanas. Para recopilar los datos necesarios, se llevaron a cabo ensayos específicos previamente establecidos que cumplan con la metodología a plantear.

En nuestro estudio se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo de los datos recopilados, lo que nos brindó una comprensión más profunda de las propiedades y características de los pavimentos en las vías urbanas estudiadas. Con la utilización de la muestra de la vía E-489 y la aplicación de los tipos de estudios a realizar se busca obtener información precisa y significativa sobre los pavimentos reciclados en las vías urbanas, lo

cual contribuyó a un mejor entendimiento de su comportamiento y permitió tomar decisiones informadas para la planificación, diseño y mantenimiento de estos pavimentos en el futuro.

2.4. Métodos teóricos con los materiales utilizados

Se manejan diferentes metodologías de investigación para recolectar información que aborde la problemática planteada por el investigador (Lisboa, 2016). “*La investigación documental es la búsqueda de una respuesta específica a partir de la indagación en documentos*” (Baena Paz, 2017).

Método de Teoría Fundamentada: Busca generar teorías a partir de los datos recopilados en un contexto específico. Este método se basa en la recolección sistemática de datos y su análisis para desarrollar una teoría que explique y dé sentido a esos datos (Finol de Franco & Vera Solórzano, 2020). En el caso de nuestra investigación se utilizó este método para comprender y explicar los datos recopilados sobre los pavimentos reciclados en las vías urbanas. A través de la recolección sistemática de datos, como los ensayos y caracterización de materiales, entre otros. La aplicación de la Teoría Fundamentada en nuestra investigación nos ayudó a ir más allá de la simple descripción de los pavimentos, permitiéndonos generar modelos que expliquen los datos recopilados. Esto nos brinda una base sólida para comprender y abordar de manera más efectiva el diseño, mantenimiento y planificación de los pavimentos reciclados en las vías urbanas, teniendo en cuenta las particularidades de nuestro contexto de estudio.

2.5. Métodos empíricos con los materiales utilizados

Recopilación de datos de campo: Este método implica la recolección de datos directamente en el lugar de estudio los cuales podrán ser con técnicas como pruebas, escalas, cuestionarios, guías de observación (Useche et al., 2019), y se obtendrán datos como las características del pavimento reciclado, mediciones de espesor, análisis de muestras de materiales, evaluación visual de la condición del pavimento, entre otros. Se pueden utilizar las técnicas de muestreo siguiente:

- Ensayos de laboratorio: Para obtener datos sobre las propiedades de los materiales de pavimento reciclado, se deben realizar ensayos de laboratorio en muestras representativas. Esto implica recolectar muestras de los materiales utilizados en la vía E-489, como el asfalto, y someterlos a pruebas

específicas. Los ensayos pueden incluir pruebas de resistencia, permeabilidad, contenido de asfalto, densidad, entre otros, para evaluar la calidad y las características de los materiales.

2.6. Operación de Variable

2.6.1. Variable Dependiente

Tabla 3 Variable Dependiente

VARIABLE DEPENDIENTE: CAPA DE RODADURA							
CONCEPTUALIZACION	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA	ITEMS	TECNICA	INSTRUMENTOS	INFORMANTES
Capa final en la estructura vial, la misma que deberá brindar confort a los usuarios.	Estructura vial	Mejoramiento Sub-base Base Capa de rodadura	Numero estructural	¿cuál es el número estructural de la vía a diseñar?	Formulario	Formulario	Investigador
	Confort a usuarios	Nivel de servicio	Rugosidad (iri) Textura Resistencia	¿cuál es el IRI de una vía de calidad? ¿cuál es la textura de una vía de calidad?? ¿cuál es la resistencia de una vía de calidad?	Formulario	Formulario	Investigador

Fuente: Elaboración propia

2.6.2. Variable Independiente

Tabla 4 Variable independiente

VARIABLE INDEPENDIENTE: PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO							
CONCEPTUALIZACION	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA	ITEMS	TECNICA	INSTRUMENTOS	INFORMANTES
Pavimento asfaltico que cumplió su vida útil.	Pavimento asfaltico	Convencionales Modificados	En frio En caliente Tipo de aditivo Tipo de emulsión	¿cuándo es recomendable utilizar mezclas asfálticas en frio? ¿a qué temperatura deben trabajarse las mezclas asfálticas calientes? ¿qué tipo de aditivos se utilizan para la mezcla asfáltica modificada? ¿qué tipo de emulsión se utilizan para la mezcla asfáltica modificada?	Formulario	Formulario	Investigador
	Vida útil	Fallas	Tipos de fallas	¿cuándo se producen fallas en la capa de rodadura?	Formulario	Formulario	Investigador

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO III

3. PROPUESTA METODOLOGICA

3.1. Información general

Metodología para diseño de pavimento asfáltico reciclado, y su aplicación en capas de rodadura de vías urbanas.

3.2. Antecedentes del trabajo de investigación

Investigaciones como la denominada “Mezclas asfálticas con PAR: Pavimentos Asfálticos Reciclados” propone consideraciones esenciales para optimizar el diseño de mezclas asfálticas con material reciclado (PAR) tales como comprender los factores limitantes, adaptando el diseño a las condiciones específicas de cada proyecto. La caracterización detallada del PAR, mediante ensayos específicos, es fundamental. Sugiere mantener porcentajes de PAR por debajo del 20%. La inclusión de PAR puede afectar los cambios volumétricos de la mezcla, destacando la importancia de considerar estos aspectos. Se recomienda dosificar contenidos de PAR por debajo del 20%, especialmente en casos de asfaltos muy deteriorados (Miranda Argüello, 2019).

Además, investigaciones como “Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-PAR y grano de caucho reciclado-GCR” presenta resultados del desempeño del pavimento flexible utilizando pavimento asfáltico reciclado (PAR) y grano de caucho reciclado (GCR). Ambos materiales, provenientes del reciclaje de pavimento asfáltico y llantas desgastadas, respectivamente, se analizaron en su condición original y propuestas de mejora, considerando la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. El producto final busca aplicarse en la red vial secundaria y terciaria de Colombia, mejorando la conexión entre zonas agrícolas y centros urbanos. En el ensayo de fatiga, se evidenció que la mezcla 100% PAR presentó mayor deformación que la modificada con emulsión CRL-1 y GCR, demostrando diferencias significativas en la pendiente de la ley de fatiga. Además, evaluaron el ahuellamiento, indicando que, bajo altas sollicitaciones de tráfico obtenían deformaciones máximas de 0,34 cm. Las conclusiones resaltan la influencia del contenido de ligante en el PAR y la necesidad de ajustar la granulometría para su reutilización, así como la importancia de considerar emulsiones y GCR para mejorar el desempeño del pavimento reciclado (Figueroa Infante & Fonseca Santanilla, 2020).

3.3. Justificación

Nuestro estudio se centra en el desarrollo de una metodología para el diseño de pavimento asfáltico reciclado, para cumplir con la necesidad de aplicarlo en la capa de rodadura en caliente en proyectos que garanticen la seguridad y comodidad de los usuarios de vías urbanas. La rehabilitación de una vía puede resultar costosa, pero mediante el uso de pavimento asfáltico reciclado, es posible lograr una solución más económica y servir de base para futuras investigaciones en este campo. Esta metodología será de gran utilidad para instituciones públicas que deseen implementar políticas amigables con el medio ambiente, ya que reduce el impacto ambiental en las zonas de extracción de material virgen y disminuye el uso de betún, petróleo o asfalto en las mezclas asfálticas.

Al utilizar materiales de pavimento asfáltico reciclado de la Red Estatal E-489 y los materiales vírgenes extraídos de la cantera Roca Azul (agregados pétreos) y Mina Chimbo (arean), junto con el betún petróleo asfalto proveniente de la Refinería de Esmeraldas, hemos garantizado la representatividad de nuestra investigación en el contexto local. Además, hemos realizado los ensayos y análisis correspondientes en el laboratorio de la Compañía Verdu S.A., lo que asegura la rigurosidad y precisión de nuestros resultados.

3.4. Objetivos

Desarrollar una metodología para el diseño de pavimento asfáltico reciclado que permita la rehabilitación de la capa de rodadura en proyectos de mantenimiento vial, con el fin de garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios, reducir los costos de rehabilitación y disminuir el impacto ambiental en las zonas de extracción de material virgen.

3.5. Fundamentación

El estudio realizado por Leiva Villacorta & Vargas Nordcbeck, 2017 proporciona una guía para el diseño y producción eficaz de mezclas asfálticas con PAR. En la síntesis, se destacan técnicas apropiadas para la obtención, almacenamiento y procesamiento del PAR con el objetivo de producir mezclas de alta calidad. La importancia de procesar adecuadamente el pavimento reciclado para reducir la variabilidad en la granulometría y el contenido de asfalto se enfatiza, junto con la recomendación de tomar muestras aleatorias para evaluar la variabilidad de las propiedades del material de PAR. Considera que el tamaño

máximo de los agregados es un factor que se debe controlar, y se sugiere ajustar el grado de desempeño del asfalto virgen para tener en cuenta la contribución del material reciclado. Se destaca la importancia de evaluar el desempeño de mezclas asfálticas diseñadas con PAR, especialmente con alto contenido de este material. Además, se destaca la necesidad de adaptar las especificaciones de construcción de carreteras para incluir mezclas asfálticas con PAR, garantizando que los estándares de desempeño se apliquen de manera uniforme, incluso a estas mezclas modificadas.

La investigación titulada "Potential use of recycled concrete aggregate (RCA) for sustainable asphalt pavements of the future: A state-of-the-art review" aborda la necesidad de reducir el consumo masivo de agregados naturales (NA) en la construcción de carreteras mediante el uso de agregados de concreto reciclado (RCA). Se destaca que, aunque el RCA presenta desafíos, como la presencia de zonas de transición interfacial y mortero adherido que afectan sus propiedades, los métodos de tratamiento, como el procesamiento mecánico y la incorporación de materiales puzolánicos, han demostrado ser efectivos para mejorar la calidad del RCA. Se resalta que, si se abordan satisfactoriamente las propiedades ingenieriles, especialmente la susceptibilidad a la humedad, se puede lograr la sustitución total de agregados gruesos por RCA en pavimentos asfálticos (Xu et al., 2022).

Otra investigación relacionada al uso de áridos denominada "Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation" indica que las mezclas PAR/RCA, especialmente con un bajo contenido de PAR (15%), cumplen con los requisitos de deformación permanente y módulo resiliente para su uso en capas subbase de pavimentos. Sin embargo, los resultados de CBR para esta mezcla fueron más bajos de lo requerido. Esto apunta a que mezclas con mayores contenidos de PAR no cumplen con los requisitos para capas subbase. Sugiere que el PAR podría ser considerado para uso en áreas de tráfico bajo, como caminos de transporte y senderos, pero no cumple con los requisitos para su aplicación en capas subbase de carreteras según las autoridades viales locales (Arulrajah et al., 2013).

Finalmente, en el artículo "The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review" destaca que la presencia de finos y asfalto envejecido en partículas más pequeñas limita el aumento del contenido de PAR, insistiendo en la importancia de la gradación y homogeneidad de los agregados de PAR para cumplir con los requisitos de la mezcla final. En nuestro entorno, podemos aplicar las recomendaciones de

esta investigación tales como la limitación en el contenido de PAR en un promedio del 15–20% en mezclas asfálticas recicladas. Menciona que, en 2018, se tuvo un ahorro significativo en aglutinante y agregados vírgenes en los Estados Unidos destacando la viabilidad económica y la reducción del impacto ambiental al utilizar PAR. Recomienda adoptar un enfoque basado en el rendimiento, gestionar eficientemente el PAR y aplicar tecnologías modernas para superar las limitaciones de las prácticas tradicionales. Además, de investigar y desarrollar protocolos de caracterización para el aglutinante envejecido en el PAR es esencial para un diseño preciso, y la realización de análisis del ciclo de vida es crucial para evaluar la sostenibilidad económica y ambiental de nuestras mezclas asfálticas reciclada (Tarsi et al., 2020).

3.6. Metodología de Diseño de Pavimento Asfáltico Reciclado

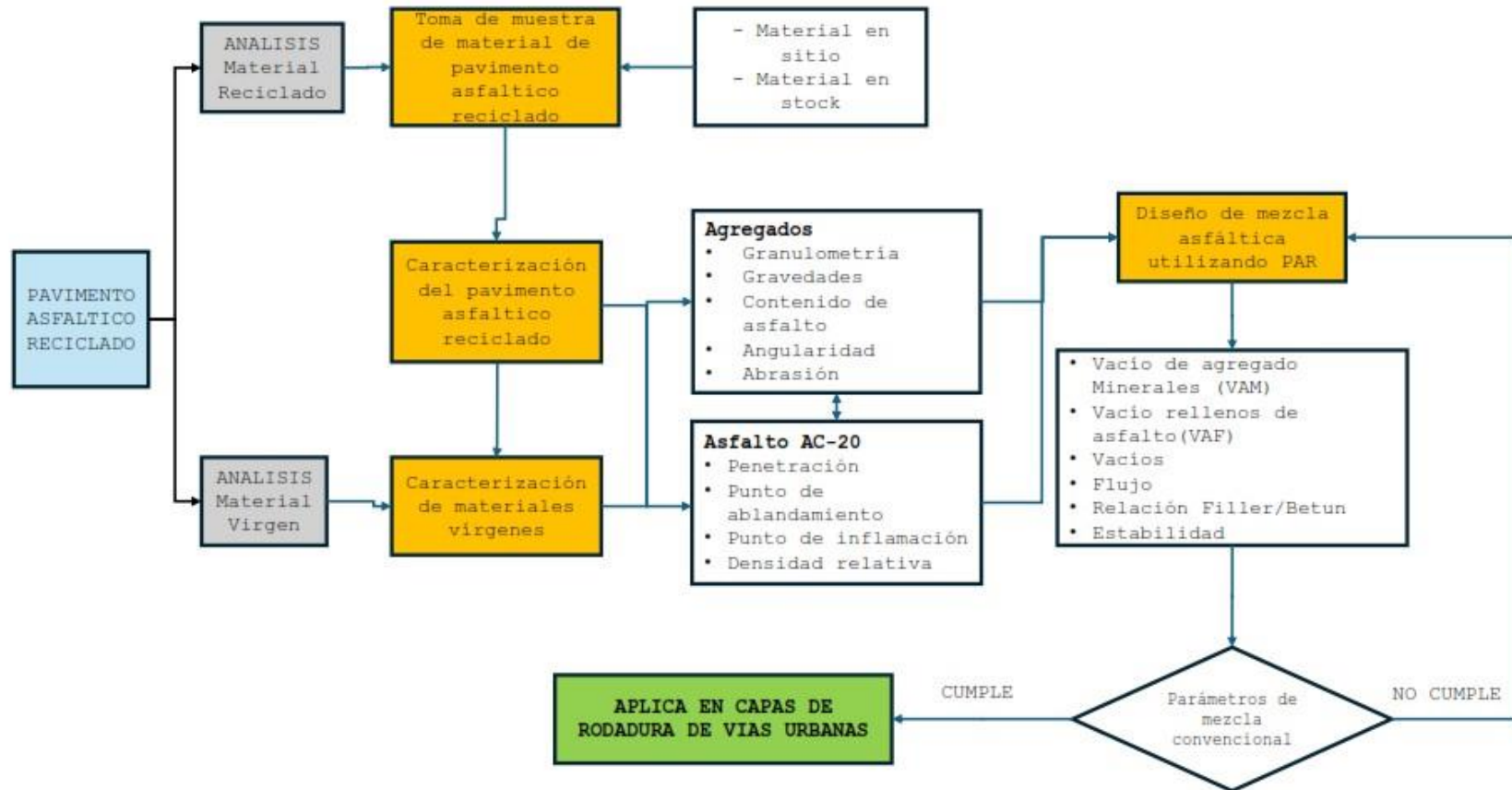


Ilustración 2 Metodología para diseño de pavimento asfáltico reciclado

Fuente: Elaboración propia

A continuación, describiremos cada uno de los procesos de la Metodología para Diseño de Pavimento Asfáltico Reciclado el cual está conformado por:

3.6.1. Análisis de Material Reciclado

Para realizar el análisis del material reciclado se deberá tomar muestras del material tanto en sitio como en stock, con lo cual se va a caracterizar los elementos de este material tales como su granulometría, gravedad, angularidad, abrasión y contenido de asfalto, así mismo se analiza el asfalto extraído del PAR y se determina su penetración, punto de ablandamiento, punto de inflamación y densidad relativa.

3.6.2. Análisis de Material Virgen

Para realizar el análisis del material virgen se tomarán muestras de los agregados y del asfalto que va a utilizar, caracterizando cada uno de ellos de acuerdo con los parámetros que nos indican las normas nacionales e internacionales.

3.6.3. Diseño de la mezcla asfáltica utilizando PAR

Se establecerán los porcentajes de PAR a ser utilizados, los mismos que serán mezclados con los agregados vírgenes, los cuales de acuerdo a las especificaciones técnicas del Ministerio de Transporte y Obras Públicas deberán cumplir la faja granulometría para Mezcla asfáltica de alto tráfico o de 1/2", para la elaboración de la mezcla asfáltica con PAR se utilizará el procedimiento descrito en las normas AASHTO, ASTM y ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES MOP - 001-F 2002 utilizando un aparato Marshall, las cuales nos indican que se elaboraran briquetas agregando diferentes porcentajes de asfalto hasta encontrar el porcentaje óptimo de asfalto.

3.6.4. Cumplimiento de parámetros de la mezcla convencional

De acuerdo con las Normas MTOP las mezclas para alto tráfico deberán de cumplir con los parámetros de; Vacíos de Agregado Mineral, Vacíos Rellenos de Asfalto, % de Vacíos, Flujo, Relación Filler-Betun y Estabilidad. Si se cumple se considera diseño del PAR aplicable para capas de rodadura de vías urbanas. Si no se cumple, se tiene que regresar a realizar un nuevo diseño, hasta que se logre el diseño requerido.

CAPITULO IV

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Resultados

4.1.1. Material Reciclado

Toma de muestra de material de pavimento asfáltico reciclado

El primer paso de la metodología para pavimento asfáltico reciclado implica la crucial toma de muestras de material de pavimento asfáltico reciclado (PAR) en el tramo de la vía E-489, específicamente del tramo Progreso a General Villamil Playas. Para obtener datos precisos y representativos, se extrajo una muestra de pavimento asfáltico reciclado en el área de interés. Los detalles de la toma de muestra incluyen la determinación de parámetros clave, como el peso inicial de la muestra antes de la extracción (A), el peso del filtro antes del proceso de extracción (B), el peso de la muestra después de la extracción (C), el peso del filtro después de la extracción (D), el peso del asfalto en el filtro (E), y el volumen del disolvente (F). Estos datos se utilizaron para calcular el porcentaje de asfalto en la muestra recogida, una medida esencial para comprender la composición del material.

Datos de extracción de asfalto

$$A = \text{PESO MUESTRA ANTES DE LA EXTRACCION} = 1000 \text{ gr}$$

$$B = \text{PESO DE FILTRO ANTES DE DE EXTRACCION} = 14.7$$

$$C = \text{PESO NUESTRA DESPUES DE LA EXTRACCION} = 948.0 \text{ gr}$$

$$D = \text{PESO DE FILTRO DESPUES DE EXTRACCION} = 15.9 \text{ gr.}$$

$$E = \text{PESO ASFALTO EN FILTRO} = 1.1 \text{ gr}$$

$$F = \text{VOLUMEN DEL DISOLVENTE} \times 0.001 = 2.5$$

$$\% \text{Asfalto} = \frac{A - (C + E + F)}{A} * 100 = 4.84\%$$

En el caso específico presentado, se realizó una extracción cuidadosa, los cálculos resultaron en un porcentaje de asfalto del 4.84%. Este valor sirve como punto de partida

fundamental para la caracterización y el diseño subsiguiente de la mezcla asfáltica utilizando el PAR.

Caracterización del agregado de pavimento asfáltico reciclado

El segundo paso de la metodología se enfoca en la caracterización del agregado de pavimento asfáltico reciclado (PAR), con especial atención al análisis granulométrico del material proveniente del yacimiento E584. Este análisis proporciona información esencial sobre la distribución de tamaños de partículas, un aspecto crítico para comprender las propiedades físicas del material. Los resultados del análisis granulométrico se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5 Análisis granulométrico de material bituminoso reciclado

TAMIZ	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0.00	0.00	100.00
3/4"	0.00	0.00	100.00
1/2"	1059.00	18	82
3/8"	2160.00	38	62
No. 4	4002.00	70	30
PASA No. 4			
No.8	5175.00	90	10
No. 16	5514.00	96	4
No. 30	5565.00	97	3
No. 50	5662.00	99	1
No. 100	5686.00	99	1
No. 200	5712.00	100	0
PASA No. 200	20.00	0	
TOTAL	5732.00		

Fuente: Elaboración propia

Estos datos granulométricos son fundamentales para la formulación de la mezcla asfáltica, ya que permiten ajustar la proporción de diferentes tamaños de partículas para alcanzar las características deseadas de la mezcla. Este análisis proporciona una visión detallada de la composición del PAR y orienta las decisiones en el diseño de la mezcla asfáltica para garantizar un rendimiento óptimo en el pavimento reciclado.

4.1.2. Material Virgen

Caracterización del agregado virgen

El tercer punto de la metodología se centra en la caracterización de los agregados gruesos, medianos y finos provenientes de tres yacimientos distintos: Cantera Germania y

Arena Chimbo. Estos análisis granulométricos proporcionan información sobre la distribución de tamaños de partículas en cada tipo de agregado virgen.

YACIMIENTO: CANTERA GERMANIA - AGREGADOS GRUESOS

El análisis granulométrico de los agregados gruesos de la Cantera Germania se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 6 Análisis granulométrico de agregados gruesos

TAMIZ	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0.00	0.00	100.00
3/4"	0.00	0.00	100.00
1/2"	2870.00	57	43
3/8"	4768.00	95	5
No. 4	4982.00	100	0
PASA No. 4			
No.8	4984.00	100	0.32
No. 16	4985.00	100	0.30
No. 30	4987.00	100	0.26
No. 50	4989.00	100	0.22
No. 100	4990.00	100	0.20
No. 200	4992.00	100	0.16
PASA No. 200	8.00	0	
TOTAL	5000.00		

Fuente: Elaboración propia

YACIMIENTO: CANTERA GERMANIA - AGREGADOS MEDIOS

Para los agregados medios de la Cantera Germania, el análisis granulométrico se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 7 Análisis granulométrico de agregados medios

TAMIZ	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0.00	0.00	100.00
3/4"	0.00	0.00	100.00
1/2"	0.00	0.00	100.00
3/8"	379.00	9	91
No. 4	1776.00	44	56
PASA No. 4	2224.00	56	
No.8	191.00	21	34
No. 16	273.00	30	25
No. 30	327.00	36	19
No. 50	370.00	41	14
No. 100	400.00	44	11
No. 200	437.00	49	7
PASA No. 200	67.00	7	
TOTAL	4000.00		

Fuente: Elaboración propia

YACIMIENTO: ARENA CHIMBO - AGREGADOS FINOS

El análisis granulométrico de los agregados finos de Arena Chimbo se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 8 Análisis granulométrico de agregados finos

TAMIZ	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0.00	0.00	100.00
3/4"	0.00	0.00	100.00
1/2"	0.00	0.00	100.00
3/8"	0.00	0	100
No. 4	2.00	0	100
PASA No. 4			
No.8	44.00	4	96
No. 16	120.00	12	88
No. 30	322.00	32	68
No. 50	887.00	89	11
No. 100	978.00	98	2
No. 200	999.00	100	0
PASA No. 200	1.00	0	
TOTAL	1000.00		

Fuente: Elaboración propia

Estos análisis granulométricos proporcionaron información valiosa sobre la distribución de tamaños de partículas en los agregados gruesos y medianos de Cantera Germania, así como en los agregados finos de Arena Chimbo. La comprensión detallada de estas características es esencial para lograr una mezcla asfáltica equilibrada y de alta calidad en el diseño de pavimentos.

4.1.3. Diseño de mezcla asfáltica utilizando PAR

En esta fase, se llevaron a cabo diversas combinaciones de materiales con el objetivo de cumplir con las normativas del MTOP con los parámetros establecidos de la estructura del pavimento. Se exploraron proporciones variables de material reciclado en las mezclas, específicamente el 10%, 25%, y 50%, generando composiciones distintas, como se ilustra en la figura de granulometría obtenida.

Tabla 9 Combinación de mezclas con varios porcentajes de pavimento reciclado

GRADUACION COMBINADA PARA MEZCLAS - PRUEBA No. 1

Tamaño del Tamiz	Porcentaje Usado	TAMAÑO DEL TAMIZ PORCENTAJE QUE PASA										
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
A. M.B.R.	10%	10.0	10.0	8.2	6.2	3.0	1.0	0.4	0.3	0.1	0.1	0.0
A. Grueso	10%	10.0	10.0	4.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A. Medio	65%	65.0	65.0	65.0	58.8	36.1	22.3	16.4	12.5	9.4	7.2	4.6
A. Fino	15%	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	14.3	13.2	10.2	1.7	0.3	0.0
	100%	100.0	100	92	81	54	38	30	23	11	8	5
Especificaciones Deseadas												
			100	90-100		44-74	28-58			7-21		2-10

GRADUACION COMBINADA PARA MEZCLAS - PRUEBA No. 2

Tamaño del Tamiz	Porcentaje Usado	TAMAÑO DEL TAMIZ PORCENTAJE QUE PASA										
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
A. M.B.R.	25%	25.0	25.0	20.4	15.6	7.5	2.4	1.0	0.7	0.3	0.2	0.1
A. Grueso	10%	10.0	10.0	8.3	5.6	4.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A. Medio	53%	53.0	53.0	53.0	44.7	34.2	25.9	23.7	21.3	12.0	8.5	3.3
A. Fino	12%	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	11.5	10.6	8.1	1.4	0.3	0.0
	100%	100.0	100	94	78	58	41	35	30	14	9	3
100.0												
			100	90-100		44-74	28-58			7-21		2-10

GRADUACION COMBINADA PARA MEZCLAS - PRUEBA No.3

Tamaño del Tamiz	Porcentaje Usado	TAMAÑO DEL TAMIZ PORCENTAJE QUE PASA										
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
A. M.B.R.	50%	50.0	50.0	40.8	31.2	15.1	4.9	1.9	1.5	0.6	0.4	0.2
A. Grueso	0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A. Medio	35%	35.0	35.0	35.0	31.7	19.5	12.0	8.8	6.7	5.1	3.9	2.5
A. Fino	15%	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	14.3	13.2	10.2	1.7	0.3	0.0
	100%	100.0	100	91	78	50	31	24	18	7	5	3
Especificaciones Deseadas												
			100	90-100		44-74	28-58			7-21		2-10

Fuente: Elaboración propia

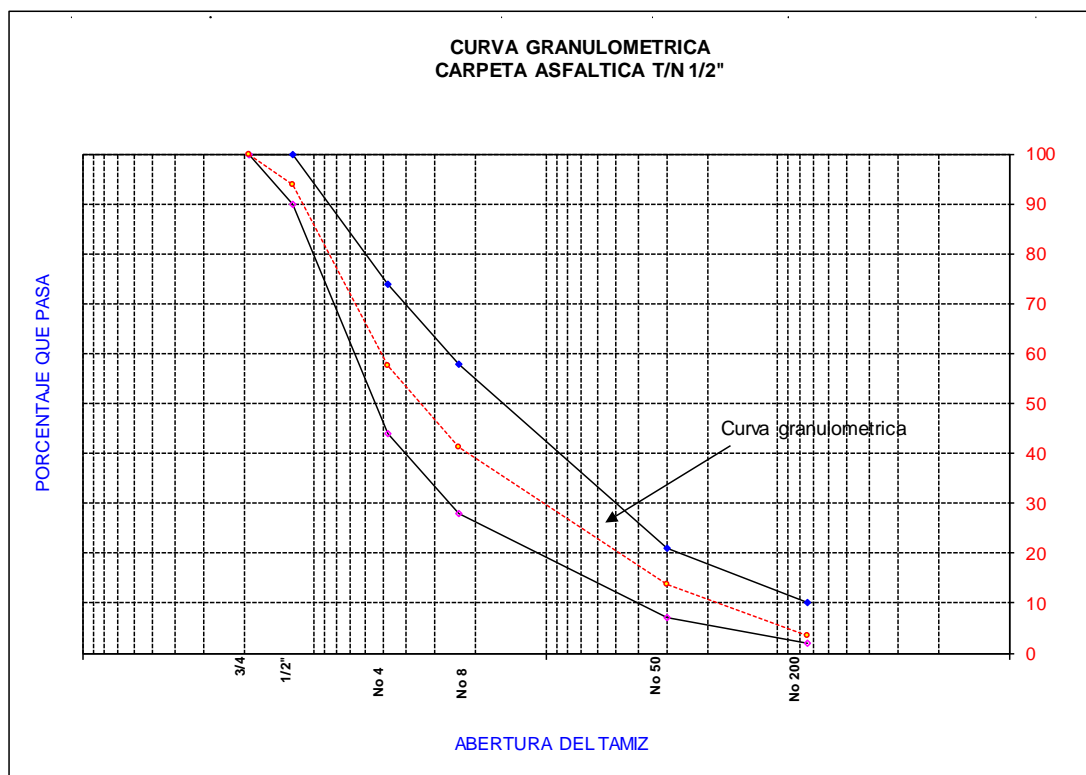


Ilustración 3 Curva granulométrica carpeta asfáltica t/n 1/2"

Fuente: Elaboración propia

Después de un análisis detenido, se seleccionó la combinación que incorpora un 25% de material reciclado y 75% material virgen como la opción óptima. Esta elección se respalda con los siguientes parámetros de diseño para la mezcla asfáltica los cuales se obtienen de la normativa MTOP:

Tabla 10 Parámetros cumplidos para el diseño de pavimento

PARAMETROS DE DISEÑO MEZCLA ASFALTICA		RESULTADO OPTIMO 5.90 % ASFALTO 25% MATERIAL DE RECICLADO
VAM (%)	14	14.4
VAF (%)	65-75	75
VACIOS (%)	(3-5)	3.59
FLUJO (pulg/100)	(8-14)	10.7
FILLER – BETUN	(0.80-1.20)	1
ESTABILIDAD (Lb)	MIN 2200	2722

Fuente: Elaboración propia

Además, se realizaron ensayos específicos para el asfalto AC-20, cumpliendo con las normativas establecidas para este tipo de asfalto tales como ASTM D5-97, ASTM D 113-99, ASTM D 2170-95, ASTM D 36-95, ASTM D 3143-98:

Tabla 11 Parámetros cumplidos para el diseño de pavimento

PARAMETROS MINIMOS PARA ASFATO AC-20		BITUMEN ASFALTICO USADO
PENETRACION (dmm)	60	81
PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)	48-57	48.6
PUNTO DE INFLAMACION (°C)	MIN 232	282
DENSIDAD REALTIVA	MIN 1	1.011

Fuente: Elaboración propia

Con el cumplimiento de estos parámetros de mezcla convencional y en función de la metodología establecida podemos indicar que nuestro diseño de mezcla asfáltica con material reciclado es aplicable en vías urbanas.

CONCLUSIONES

- La revisión exhaustiva de los fundamentos bibliográficos y criterios técnicos normativos relacionados con el pavimento asfáltico reciclado (PAR) destaca la sólida base teórica y práctica de este material. Numerosos estudios han explorado su ciclo de vida y su impacto ambiental, revelando que, a pesar de ciertas investigaciones que no evidencian una reducción significativa de emisiones al compararlo con mezclas convencionales, el PAR puede tener un impacto positivo en la reducción de gases de efecto invernadero. Investigaciones como la realizada por Castro Medina y Sabogal Melendez (2021) y Ullah et al. (2018) demuestran que los pavimentos reciclados pueden ofrecer una alternativa más sostenible. Sin embargo, investigaciones recientes, como la de Castro Vásquez et al. (2020), proponen consideraciones específicas para la incorporación de PAR en las mezclas. Se sugiere mantener porcentajes por debajo del 20%, comprender los factores limitantes y adaptar el diseño a condiciones específicas del proyecto, destacando la importancia de la caracterización detallada del PAR mediante ensayos específicos. En especial, se recomienda dosificar contenidos de PAR por debajo del 20%, especialmente en casos de asfaltos muy deteriorados (Miranda Argüello, 2019). Estas directrices aseguran un diseño óptimo y duradero de pavimentos asfálticos reciclados, abordando los desafíos específicos asociados con la inclusión de PAR en las mezclas.
- La caracterización detallada de los materiales, que incluye el Reclaimed Asphalt Pavement (PAR), emerge como un pilar esencial para proporcionar información crucial sobre las propiedades físicas y mecánicas necesarias para el diseño de pavimentos asfálticos reciclados. Este proceso involucra la evaluación de diferentes tipos de materiales, desde el PAR en sus variadas fracciones hasta agregados gruesos, medios y finos. La granulometría es un factor crítico. Este proceso analiza la distribución de tamaños de partículas, y los resultados indican la importancia de encontrar proporciones y combinaciones específicas. Paralelamente, se hace necesario evaluar las características del material bituminoso, del cual se obtienen parámetros clave como la penetración, el punto de ablandamiento, el punto de inflamación y la densidad relativa. Estos aspectos son fundamentales para comprender la

respuesta del asfalto reciclado en diferentes condiciones y garantizar que cumple con los estándares requeridos de resistencia y durabilidad.

- La metodología propuesta abarca desde la toma de muestras hasta el diseño de mezclas asfálticas, considerando aspectos como la extracción de asfalto, análisis granulométricos de materiales reciclados y vírgenes, y la elaboración de mezclas asfálticas. Los resultados de laboratorio y pruebas de campo muestran que, al utilizar el 25% de material reciclado, se logra una mezcla que cumple con los estándares de diseño, a su vez con el cumplimiento de estos parámetros de mezcla convencional podemos indicar que nuestro diseño de mezcla asfáltica con material reciclado es aplicable en vías urbanas.

RECOMENDACIONES

Recomiendo llevar a cabo estudios adicionales para optimizar las proporciones y gradaciones de los materiales utilizados en las mezclas de pavimento asfáltico reciclado (PAR/RCA).

Dado el énfasis actual en la sostenibilidad y considerando que el PAR se origina en el reciclaje de pavimentos existentes, sugiero que se realicen estudios más detallados sobre el impacto ambiental y el ciclo de vida de las mezclas de PAR.

BIBLIOGRAFIA

- Abarca Guerrero, L., Hernández, A. G., Hasbum, I., & Solano Soto, J. (2019). Gestión de materiales de construcción en Costa Rica para reducción de residuos: barreras y motivaciones. *Tecnología En Marcha*, ISSN 0379-3962, ISSN-e 2215-3241, 32(9), 65–77. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i6.4230>
- Arias Gonzáles, L., Covinos Gallardo, M., & Cáceres Chávez, M. (2020). Formulación de los objetivos específicos desde el alcance correlacional en trabajos de investigación. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 4(2), 237–247. https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V4I2.73
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., & Disfani, M. M. (2013). Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 349–357. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000850](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000850)
- Baena Paz, G. (2017). *Metodología de la investigación*. http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/metodologia%20de%20la%20investigacion.pdf
- Betancourt, L. (2014). *Elaboración de un manual que sirva como guía para realizar la señalización vertical vial de cruces de línea férrea*. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/7910>
- Blecua Roca, M. P. (2021). *Pavimentos musivos en la colonia romana Caesraugusta: siglos I a.C.- IV d.C* [Universidad de Zaragoza]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=303565&info=resumen&idioma=SPA>
- Bojacá Torres, D. C., Campagnoli Martínez, S. X., Bojacá Torres, D. C., & Campagnoli Martínez, S. X. (2022). CBR cíclico como método alternativo para la determinación del módulo resiliente en suelos blandos de subrasante. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 32(2), 85–98. <https://doi.org/10.18359/RCIN.5896>
- Bonilla, M., Quintana, J., Carrión, F., Martínez, L., Hernández, J., Gasca, H., Hernández, A., & Zea, M. (2017). Análisis del comportamiento estructural de un pavimento de

concreto estructuralmente reforzado continuo (PCERC). *INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE*.

Brasil, N., Oliveira Da Silva, T., Nunes, H., & Luciano De Oliveira Marques, G. (2021). Use of mechanistic-empirical method of pavement design for performance sensitivity analysis to asphalt pavement fatigue. *Revista Materia*, 26(3). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.1345>

Bressi, S., Primavera, M., & Santos, J. (2022). A comparative life cycle assessment study with uncertainty analysis of cement treated base (CTB) pavement layers containing recycled asphalt pavement (PAR) materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106160. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2022.106160>

Cal y Mayor, R., & Cárdenas G., J. (1995). Ingeniería de tránsito. Fundamentos y aplicaciones. In *Alfaomega*.

Carvache Franco, M., Carvache Franco, W., Macas López, C., & Orden Mejía, M. (2018). Motivaciones, Valoración y Satisfacción del Turista en un destino de Sol y Playa de Ecuador Motivations. *Revista Espacios*, 39(13).

Carvache Franco, M., Carvache Franco, W., Orden Mejía, M., & Macas López, C. (2017). Satisfacción y motivación de la demanda gastronómica en General Villamil Playas, Ecuador. *Revista Iberoamericana de Turismo*, 7(1), 68–84. <https://doi.org/10.2436/20.8070.01.46>

Castro Medina, C. A., & Sabogal Melendez, D. F. (2021). Sistema de calificación de sostenibilidad ambiental de pavimentos rígidos y flexibles con inclusión de materiales reciclados. *Pontificia Universidad Javeriana*. <https://doi.org/10.11144/JAVERIANA.10554.57850>

Castro Vásquez, M. G., Castro Vásquez, L. A., & Castro Vásquez, P. G. (2020). Aplicación práctica del método AASHTO-93 para el diseño de pavimento rígido. *Revista Científico-Académica Multidisciplinaria Polo Del Conocimiento ISSN: 2550-682X*, 5(9), 640–663. <https://doi.org/10.23857/PC.V5I9.1717>

- Figuroa Infante, A. S., & Fonseca Santanilla, E. (2020). Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-PAR y grano de caucho reciclado-GCR. *Infraestructura Vial*, 22(39), 20–28. <https://doi.org/10.15517/IV.V22I39.41205>
- Finol de Franco, M., & Vera Solórzano, J. L. (2020). Paradigmas, enfoques y métodos de investigación: análisis teórico. *MUNDO RECURSIVO ISSN: 2600-5700*, 3(1), 1–24. <https://atlantic.edu.ec/ojs/index.php/mundor/article/view/38>
- Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Playas. (2014). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón playas*.
- González, M. (2018). Los mosaicos romanos de la exposición permanente del Museo de Zaragoza: historia de su conservación-restauración. *Boletín Del Museo Arqueológico Nacional*, 37, 339–358.
- Gulotta, T. M., Mistretta, M., & Praticò, F. G. (2019). A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads. *Science of The Total Environment*, 673, 585–593. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.046>
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. *Mc Graw Hill*, 1(Mexico), 714.
- Hidalgo Capitán, A. L., García Álvarez, S., Cubillo Guevara, A. P., & Medina Carranco, N. (2019). Los Objetivos del Buen Vivir. Una propuesta alternativa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible - Dialnet. *Revista Iberoamericana de Estudios de Desarrollo ISSN-e 2254-2035*, 8(1), 6–57. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6933773>
- Leiva Villacorta, F., & Vargas Nordbeck, A. (2017). Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (PAR). *Infraestructura Vial*, 19(33). <https://doi.org/10.15517/IV.V19I33.32921>
- León Ramírez, F., Fajardo Chalén, S., & Dick Zambrano, N. P. (2020). Análisis y manejo del contenido de información turística en medios digitales del cantón General Villamil Playas en tiempos de COVID-19. *Alcance*, 9(24), 176–199.

- Lisboa, J. C. (2016). Apuntes sobre métodos de investigación. *Método En La Ciencia*, 18–25. <http://www.medisur.sld.cu/index.php/medisur/article/view/2977>
- Ministerio de Obras Publicas. (2002). *Especificaciones generales para la construccion para la construccion de caminos y puentes de caminos y puentes*.
- Miranda Argüello, F. (2019). Mezclas Asfálticas con PAR: Pavimento Asfáltico Reciclado. *Boletin Tecnico Programa de Infraestructura Del Transporte*, 10.
- Plati, C., & Cliatt, B. (2018). A Sustainability Perspective for Unbound Reclaimed Asphalt Pavement (PAR) as a Pavement Base Material. *Sustainability*, 11(1), 78. <https://doi.org/10.3390/SU11010078>
- Praticò, F. G., Giunta, M., Mistretta, M., & Gulotta, T. M. (2020). Energy and Environmental Life Cycle Assessment of Sustainable Pavement Materials and Technologies for Urban Roads. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 704, 12(2), 704. <https://doi.org/10.3390/SU12020704>
- Qian, Y., Guo, F., Leng, Z., Zhang, Y., & Yu, H. (2020). Simulation of the field aging of asphalt binders in different reclaimed asphalt pavement (PAR) materials in Hong Kong through laboratory tests. *Construction and Building Materials*, 265, 120651. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120651>
- Qiu, J., Huurman, M., de Bruin, B., Demmink, E. W., & Frunt, M. H. T. (2018). Towards 90% warm re-use of porous asphalt using foaming technology. *Journal of Cleaner Production*, 190, 251–260. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.04.086>
- Ramos, R. T. (2007). Vías, carreteras y otras calzadas: Breve historia de las mismas. *Cimbra, Revista Del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas ISSN: 0210-0479*, 376, 16–25.
- Ricoy Lorenzo, C. (2006). Contribución sobre los paradigmas de investigación. *Educação. Revista Do Centro de Educação*, 31(1), 11–22.
- Solarte Vanegas, N. C. (2022). *Efecto en el módulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada con añadido de residuos triturados de la industria ceramica*. 1. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=315500&info=resumen&idioma=SPA>

- Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review. *Materials* 2020, Vol. 13, Page 4052, 13(18), 4052. <https://doi.org/10.3390/MA13184052>
- Terranova Mera, J., & Bravo Bravo, Á. (2018). Satisfacción del cliente mediante la medición para mejorar el turismo en los hoteles del Cantón General Villamil Playas Provincia del Guayas. *Journal of Business and Entrepreneurial Studies ISSN-e: 2576-0971*, 2(2). <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/383/3831592004/>
- Ullah, S., Tanyu, B. F., & Hoppe, E. J. (2018). Optimizing the Gradation of Fine Processed Reclaimed Asphalt Pavement and Aggregate Blends for Unbound Base Courses. *Transportation Research Record*, 2672(52), 57–66. <https://doi.org/10.1177/0361198118758683>
- Ullah, S., Tanyu, B. F., & Zainab, B. (2020). Development of an artificial neural network (ANN)-based model to predict permanent deformation of base course containing reclaimed asphalt pavement (PAR). *Road Materials and Pavement Design*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1773304>
- Useche, M. C., Artigas, W., Queipo, B., & Perozo, É. (2019). Técnicas e instrumentos de recolección de datos cuali-cuantitativos. *Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos Cualitativos* ISBN: 978-956-6037-04-0, 1. <https://repositoryinst.uniguajira.edu.co/handle/uniguajira/467>
- Vallejo, E. T. T. (2022). La historia del pavimento enfermo del parque del Cholado: estudio de caso. *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería*, 1–11. <https://doi.org/10.26507/PAPER.2264>
- Vasquez, R., Vasquez, W., & Muñoz, S. (2021). Uso de aditivos adherentes en el diseño de mezclas asfálticas en caliente: una revisión. *Revista Gaceta Técnica* ISSN: 2477-9539, 22(1), 66–78. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18901.55520>
- Vera, I., Thenoux, G., Solminihac, H. D., & Echaveguren, T. (2010). Modelo de evaluación técnica del desempeño del mantenimiento de pavimentos flexibles. *Revista de La Construcción*, 9(2), 76–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2010000200008>

- Villegas, R. E. V., Moya, J. P. A., & Salazar, L. G. L. (2018). Diseño de mezcla asfáltica con materiales de desecho. *Revista Ingeniería De Obras Civiles ISSN: 0719-0514*, 8(1), 07–18. <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/2000>
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., & Amirkhanian, S. (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 180, 579–604. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.06.006>
- Xu, X., Luo, Y., Sreeram, A., Wu, Q., Chen, G., Cheng, S., Chen, Z., & Chen, X. (2022). Potential use of recycled concrete aggregate (RCA) for sustainable asphalt pavements of the future: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 344, 130893. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130893>

ANEXOS

Anexo 1: Fichas de ensayos



Identificación de la Muestra: CONCESION GUAYAQUIL - SALINAS, PROGRESO - PLAYAS
 Entidad que Solicita Ensayos: VERDÚ
 Tipo de Muestra: RECICLADA
 Fecha de toma de la muestra: 9 de diciembre del 2023
 Fecha de Reporte: Guayaquil, 30 de diciembre del 2023

PROPIEDAD	NORMA	UNIDAD	RESULTADO	NTE INEN 2515:2010 / Enmienda 1			
				AC 20		AC 30	
				Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Penetración, 25 °C, 100g.,5s.	ASTM D-5	0.1 mm	67				
Punto de Ablandamiento A y B	ASTM D-36	°C	49,2				
Índice de Penetración	NLT 181	-	-0,7	-1,5	+1,0	-1,5	+1,0
Gravedad Específica, 25 °C/25 °C	ASTM D-70	-	1,014	Informe		Informe	
Flash Point, Copa Cleveland	ASTM D-92	°C	278	232		232	
Viscosidad Dinámica 60 °C	ASTM D-4402	Pa.s	229,0	160	240	240	360
Viscosidad Cinemática, 135 °C	ASTM D 2170	mm ² s ⁻¹	369,6	300		350	
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%w		99		99	
ENVEJECIMIENTO RTFOT							
Pérdida de masa	ASTM D-1754	%w/w	-0,4		1,0		1,0
Penetración, 25 °C, 100g.,5s.	ASTM D-5	0.1 mm					
% Penetración del Envejecido		%					
Ductilidad, 25°C, 5cm/min	ASTM D 113	cm	45	50		40	
Viscosidad Dinámica 60 °C	ASTM D 4402	Pa.s	1.020,0		800		1.200

Responsable:

Ilustración 4 Ensayo de material AC 20

**EP - PETROECUADOR
INFORME DE RESULTADOS**



Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con
ACREDITACIÓN No. SAE LEN 13-002.

GERENCIA: GERENCIA DE REFINACION REFERENCIA: PROGRAMA DE TRANSFERENCIA # 342
ORGANIZACIÓN: M01_REFINERIA ESMERALDAS PRODUCTO ANALIZADO: 0280 ASFALTO AC-20
INFORME NO. MD1-1476-2023 CODIGO MUESTRA: ECC-23-2100

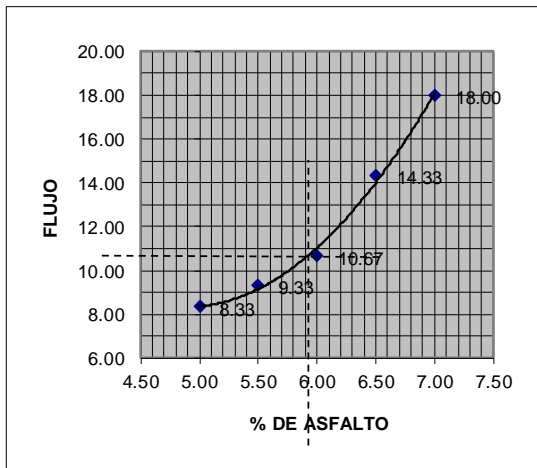
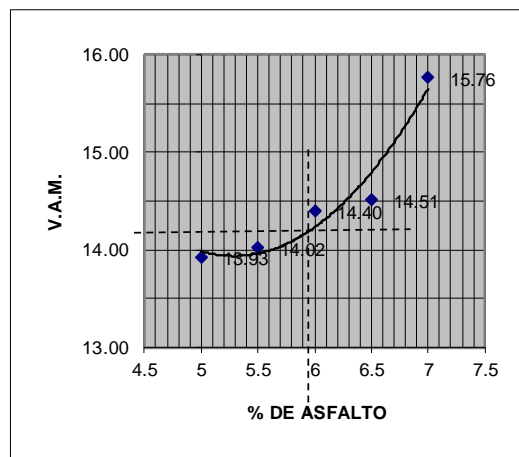
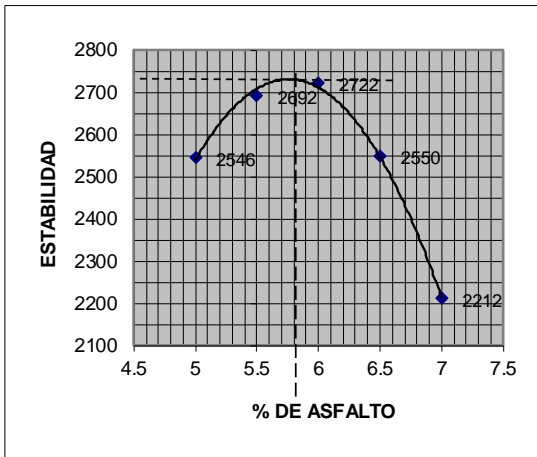
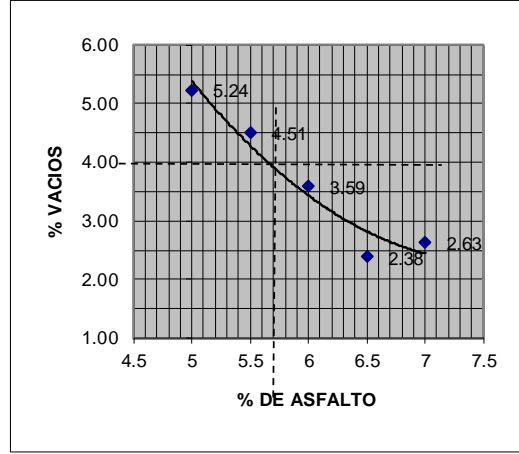
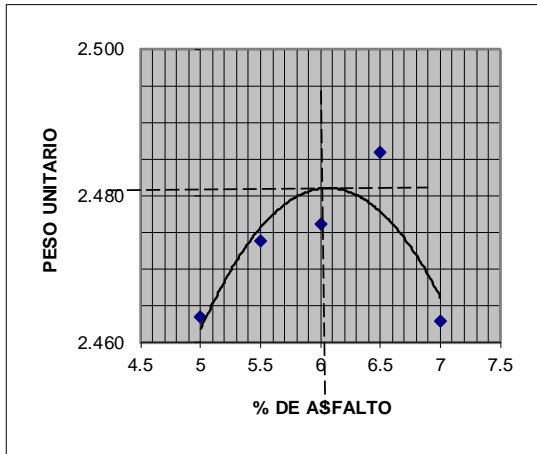
DATOS CLIENTE	
NOMBRE	JEFE DE CONTROL Y PROGRAMACION DE LA PRODUCCION (ING. ALEJANDRO CAMACHO)
DIRECCION	Km 7 1/2 Antigua Via Alacames.
TELEFONO	062994000 (85070_85074)
SOLICITADO POR	ING. MIGUEL GUAGUA - ESPECIALISTA DE PROGRAMACION DE LA PRODUCCION

DATOS DE LA MUESTRA			
ORIGEN DE LA MUESTRA	AO-V16	HORA TOMA DE MUESTRA	00:00:15
FECHA DE TOMA DE MUESTRA	2023/12/09		
CANTIDAD DE MUESTRA	2000 ml	HORA DE RECEPCION DE MUESTRA	00:10:19
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA	2023/12/09	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA	AFORO DE TANQUE
LUGAR TOMA DE MUESTRA	ASFALTOS		

DATOS DE ANALISIS			
TEMPERATURA AMBIENTE	25.0 °C	PRESION BAROMETRICA	101.0 kPa
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTE	63.0 %HR	FECHA FINALIZACION DE LOS ENSAYOS	2023/12/09 08:00:15
FECHA DE INICIO DE LOS ENSAYOS	2023/12/09 00:15:19		
FECHA DE EMISION DEL INFORME	2023/12/09		

RESULTADOS							
PARAMETRO	METODO		ESPECIFICACION ¹⁰		RESULTADO	UNIDAD DE MEDIDA	UI ¹¹
	(ASTM_INEN)	INTERNO	MIN.	MAX.			
VISCOSIDAD ABSOLUTA 140 °F (60 °C)	ASTM D2171_NTE INEN 810	V03.06.01.03-T-22	160	240	163,0	Pa s	±4.3 %
VISCOSIDAD CINEMATICA 275 °F (135 °C)	ASTM D2170_NTE INEN 810/1981	V03.06.01.03-T-23	300	-	364,0	mm ² /s	±1.9 %
PENETRACION 77 °F (25 °C) 100 G, 5s	ASTM D5_NTE INEN 918	V03.06.01.03-T-20	60	-	81	dmm	±4 dmm
PUNTO DE INFLAMACION	ASTM D82_NTE INEN 808	V03.06.01.03-T-21	282	-	282	°C	±8 °C
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO*	ASTM D2042_NTE INEN 815	V03.06.01.03-T-31	99	-	99,96	%P	-
RESIDUO DE ENSAYOS DE PELICULA FINA EN HORNO ROTATORIO*	N/A	V03.06.01.03-T-30	N/A	N/A	N/A	-	-
VISCOSIDAD 60°C*	ASTM D2171_NTE INEN 810	V03.06.01.03-T-22	-	600	612,0	Pa s	±N/A
DUCTILIDAD 77 °F (25 °C) 5cm/min*	ASTM D113_NTE INEN 916	V03.06.01.03-T-24	50	-	64,0	cm	-
GRAVEDAD API A 60 °F (15.6 °C)	ASTM D1298_NTE INEN 2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	7,1	*API	±N/A
GRAVEDAD API A 60 °F (15.6 °C)	ASTM D1298_NTE INEN 2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	1,0209	-	±N/A
DENSIDAD RELATIVA (15.6/15.6°C)	ASTM D1298_NTE INEN 2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	1,011	-	±0.002
GRAVEDAD ESPECIFICA 25/25 °C	ASTM 70	V03.06.01.03-T-57	REPORTE	REPORTE	48,6	°C	±2.1 °C
PUNTO DE ABLANDAMIENTO*	ASTM D36	V03.06.01.03-T-26	-	-	-0,4	-	-
INDICE DE PENETRACION*	ASTM D5	V03.06.01.03-T-26	-1.5	1	-0,4	-	-
CAMBIO DE MASA*	ASTM D2872	V03.06.01.03-T-30	-	1	-0,190	%P	-

Ilustración 5 Ensayo de material AC virgen



PORCENTAJE OPTIMO DE ASFALTO

Peso Unitario	6.05 %
Vacios	5.70 %
Estabilidad	5.80 %
PROMEDIO	5.9 %

Ilustración 6 Resultados de diseño de mezcla asfáltica

Anexo 2: Memoria Fotográfica



Ilustración 7 Vía utilizada para extracción de material PAR

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 8 Material PAR en stock

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 9 Recolección de material PAR

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 10 Muestra de material PAR de stock

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 11 Ensayos de material PAR, pesaje de muestra para ensayo de extracción de asfalto
Fuente: Elaboración propia



Ilustración 12 Ensayos de material PAR, agregado de disolvente
Fuente: Elaboración propia



Ilustración 13 Ensayos de material PAR, extracción de asfalto.

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 14 Ensayos de material PAR, pesaje para ensayo de gravedad

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 15 Ensayos de material PAR, graduación del material

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 16 Explotación de materiales vírgenes

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 17 Recolección material virgen

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 18 Ensayos de material virgen, graduación de material

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 19 Ensayos de material virgen, Gravedad

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 20 Mezcla de material Virgen y Reciclado, pesaje

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 21 Inclusión de Asfalto AC-20 para Elaboración de mezcla asfáltica con 25% de PAR

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 22 Mezcla asfáltica con PAR en caliente, toma de temperatura

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 23 Elaboración de briquetas

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 24 Identificación de briquetas de mezcla asfáltica con PAR

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 25 Pesaje de Briquetas de mezcla asfáltica con PAR

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 26 Mezcla asfáltica con PAR en caliente, Equipo Rice

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 27 Briquetas de mezcla asfáltica con PAR, previo a prueba de estabilidad

Fuente: Elaboración propia