



**Uleam**  
UNIVERSIDAD LAICA  
ELOY ALFARO DE MANABÍ

*Ingeniería Civil*  
Facultad de Ingeniería



**UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA, Industria y Arquitectura**

**CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

**Tema**

“Uso de pavimento con Plástico Reciclado en pavimentos flexibles como alternativa ecologica”

**Autora**

Bravo Cedeño Natalia Isabel

**Tutor**

Ing. Javier Enrique Baque Solis

**Materia**

Trabajo De Integración Curricular: Fase de Resultados

**Curso**

9no Semestre

Manta - 2024

## CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante Bravo Cedeño Natalia Isabel, legalmente matriculado en la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2024-2025, cumpliendo el total de 192 horas, cuyo tema del proyecto es " Uso de pavimento con plástico reciclado como pavimento flexible para reducción de la mancha ecológica".

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 16 de diciembre de 2024

Lo certifico,



Ing. Javier Baque Solis  
Docente Tutor  
Área: Vías

Declaratoria de Autoría:

Yo, Bravo Cedeño Natalia Isabel, declaro bajo mi responsabilidad que el presente trabajo de titulación, titulado “Uso de pavimento con Plástico Reciclado en pavimentos flexibles como alternativa ecológica”, es de mi completa autoría. Este documento es resultado de mi esfuerzo, investigación y análisis, y no ha sido presentado previamente para la obtención de ningún título académico ni se encuentran en proceso de evaluación en otra institución educativa.

Certifico que todas las fuentes de información y referencias utilizadas han sido debidamente citadas y reconocidas, cumpliendo con los estándares éticos y académicos correspondientes. Asimismo, cualquier similitud con otros trabajos es puramente incidental.

Por lo tanto, asumo la total responsabilidad sobre el contenido, análisis y resultados presentados en este documento.



## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL EXAMINADOR



**UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA**

Los miembros del Tribunal Examinador aprueban el Trabajo de Titulación siguiendo la modalidad de Proyecto de Investigación, titulado: “USO DE PAVIMENTO CON PLASTICO RECICLADO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES COMO ALTERNATIVA ECOLOGICA” elaborado por la egresada: BRAVO CEDENO NATALIA ISABEL, de la Carrera de Ingeniería Civil.

### INGENIERO CIVIL

Aprobado por el Tribunal Examinador

Ing. Xavier Moreira Cevallos  
**Miembro del tribunal**

Ing. Efrén Loor Loor  
**Miembro del tribunal**



## DEDICATORIA

A mi familia, que ha sido mi refugio y mi mayor fortaleza a lo largo de este camino.

A mis padres, quienes con su amor, esfuerzo y valores me han mostrado que los sueños se alcanzan con dedicación y perseverancia. Gracias por ser mi ejemplo constante, por sus palabras de ánimo en los momentos más difíciles y por confiar en mí incluso cuando yo dudaba de mis propias capacidades. Este logro es un reflejo de todo lo que ustedes han hecho por mí.

A mis hijos, mi razón de ser y mi mayor motivación. Cada paso que doy está inspirado en ustedes, en su sonrisa, en sus sueños y en el deseo de construir un futuro mejor para todos. Espero que este trabajo les enseñe que con esfuerzo y determinación no hay meta imposible de alcanzar.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento y amor, porque este logro no es solo mío, sino también suyo.

*Natalia Isabel Bravo Cedeño*

*Autora*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, en especial a la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura, por brindarme las herramientas necesarias para mi formación académica y profesional.

A mi tutor, el Ing. Javier Enrique Baque Solís, por su invaluable guía, apoyo constante y paciencia durante todo el desarrollo de este trabajo. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para completar este estudio.

A mi familia, por su amor incondicional, apoyo emocional y motivación en cada etapa de mi vida universitaria. Sin ellos, este logro no habría sido posible.

Finalmente, agradezco a mis compañeros y amigos, quienes con sus consejos y compañerismo hicieron de este camino una experiencia enriquecedora y memorable.

Este trabajo es el resultado de un esfuerzo conjunto y de la inspiración de quienes siempre han creído en mis capacidades.

*Natalia Isabel Bravo Cedeño*

*Autora*

## RESUMEN

Durante los últimos 50 a 60 años, los humanos han contribuido a la degradación y uso insostenible de aproximadamente el 60% de los ecosistemas. Este deterioro ha generado consecuencias negativas, ya que se están agotando los recursos que estos ecosistemas nos brindan. Por tanto, se propone el proyecto tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica, económica y medioambiental del agregado de plástico reciclado en pavimentos flexibles, con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica, económica y medioambiental del agregado de plástico reciclado en pavimentos flexibles, con el fin de desarrollar una infraestructura vial más sostenible y ecoamigable. Esta investigación se clasifica como experimental, ya que implica la manipulación directa de las variables independientes para determinar si estas modificaciones generan cambios en las variables dependientes. Para la preparación de la mezcla asfáltica con PAR, se siguió el procedimiento establecido en las normas AASHTO, ASTM y las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP - 001-F 2002, utilizando un aparato Marshall. El análisis de la gravedad específica teórica máxima (Gmm) en mezclas de áridos muestra una disminución progresiva del valor de Gmm a medida que aumenta el contenido de asfalto, pasando de 2.457 g/cm<sup>3</sup> con un 5.0% de asfalto a 2.377 g/cm<sup>3</sup> con un 7.0%. Este comportamiento indica una relación inversa entre el contenido de asfalto y la densidad teórica de las mezclas. Los resultados evidencian que el incremento en el contenido de asfalto provoca un mayor volumen de vacíos en las mezclas, reduciendo así la densidad total del material compactado. Este patrón es consistente con estudios previos que señalan que el exceso de asfalto puede disminuir la cohesión interna de las mezclas y aumentar la susceptibilidad a deformaciones.

**Palabras clave:** Gravedad específica, mezclas asfálticas, contenido de asfalto, densidad teórica, diseño de pavimentos



## ABSTRACT

Over the last 50 to 60 years, humans have contributed to the degradation and unsustainable use of approximately 60% of ecosystems. This deterioration has generated negative consequences, since the resources that these ecosystems provide us are being depleted. Therefore, the project aims to evaluate the technical, economic and environmental feasibility of recycled plastic aggregate in flexible pavements, with the objective of evaluating the technical, economic and environmental feasibility of recycled plastic aggregate in flexible pavements, in order to develop a more sustainable and eco-friendly road infrastructure. This research is classified as experimental, since it involves the direct manipulation of the independent variables to determine if these modifications generate changes in the dependent variables. For the preparation of the asphalt mixture with PAR, the procedure established in the AASHTO and ASTM standards and the General Specifications for Road and Bridge Construction MOP - 001-F 2002 was followed, using a Marshall apparatus. The analysis of the maximum theoretical specific gravity (Gmm) in aggregate mixtures shows a progressive decrease in the value of Gmm as the asphalt content increases, going from 2.457 g/cm<sup>3</sup> with 5.0% asphalt to 2.377 g/cm<sup>3</sup> with 7.0%. This behavior indicates an inverse relationship between the asphalt content and the theoretical density of the mixes. The results show that the increase in asphalt content causes a greater volume of voids in the mixes, thus reducing the total density of the compacted material. This pattern is consistent with previous studies that indicate that excess asphalt can decrease the internal cohesion of the mixes and increase the susceptibility to deformation.

**Key words:** Specific gravity, asphalt mixtures, asphalt content, theoretical density, pavement design



## ÍNDICE

RESUMEN .....	ii
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE.....	viii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
Justificación .....	2
Planteamiento del problema.....	2
Formulación del problema .....	3
Objetivos.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos: .....	4
Hipótesis de investigación. ....	4
Hipótesis general.....	4
Hipótesis Alternativa (H1).....	4
Limitaciones de la investigación.....	5
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....	6
Revisión de literatura sobre pavimentos flexibles y aditivos ecológicos. ....	6
Historia de las carreteras .....	8
Historia de los pavimentos.....	10
Historia de los pavimentos reciclados.....	10
Pavimentos asfálticos reciclados.....	11
Bases teóricas.....	12
Concepto de pavimentos .....	12
Tipos de pavimentos asfálticos reciclados. ....	12
Reciclaje del plástico .....	14
Experiencias utilizadas en PAR en otros países.....	15
Métodos para el diseño de mezclas asfálticas.....	15
Métodos de Marshall para Diseño Caliente en Mezcla Asfáltica .....	18
CAPITULO III: METODOLOGIA .....	19
Descripción detallada de los ensayos y experimentos a realizar .....	19

Diseño experimental, materiales y variables a medir .....	19
Diseño experimental .....	19
Materiales y método.....	20
Variables de investigación.....	29
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>30</b>
Datos obtenidos en los ensayos.....	30
Origen de los Agregados Pétreos .....	30
Ensayos Iniciales.....	30
Combinación de los agregados. ....	30
Diseño del cálculo de método Marshall .....	31
Graduación combinada para la mezcla .....	35
Análisis Volumétrico.....	38
Gravedades específicas .....	41
Gravedad específica Bulk de la mezcla de agregados .....	42
Análisis granulométrico .....	42
Gravedad Especifica Efectiva.....	47
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>58</b>

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 50 a 60 años, los humanos han contribuido a la degradación y uso insostenible de aproximadamente el 60% de los ecosistemas. Este deterioro ha generado consecuencias negativas, ya que se están agotando los recursos que estos ecosistemas nos brindan. Este cambio acelerado se debe principalmente al crecimiento de la población ya la transformación en los patrones de consumo en diversos sectores productivos (Reid *et al.*, 2005), lo cual ha incrementado la demanda de bienes y servicios. Entre los recursos cuyo uso ha crecido considerablemente en las últimas décadas están los productos derivados del petróleo como diferentes tipos de plásticos.

La relevancia de establecer una metodología para el diseño de pavimento asfáltico reciclado en la capa de rodadura en caliente de vías urbanas se debe a su significativo aporte a la sostenibilidad ambiental, ya que facilita la disminución de residuos y promueve la utilización de materiales reciclados en la construcción y rehabilitación de carreteras. Esto conlleva una menor demanda de agregados naturales y una reducción en la extracción de recursos, logrando así una huella ambiental más baja (Abarca Guerrero *et al.*, 2019).

Asimismo, el uso de materiales reciclados ofrece ventajas económicas al disminuir los costos de adquisición y transporte en comparación con los materiales tradicionales. Esta metodología no solo incrementa la durabilidad y resistencia de las vías urbanas, mejorando así la calidad de la infraestructura, sino que también impulsa la innovación tecnológica y el progreso dentro de la industria de la construcción. El reciclaje de pavimentos es esencial, ya que no solo evita la acumulación de residuos, sino que también mejora la gestión de los materiales de construcción, disminuye las emisiones contaminantes y aporta beneficios económicos. De este modo, se establece como una tecnología crucial para promover un desarrollo más sostenible en el sector de la construcción (Xiao *et al.*, 2018).

En diversos estudios, se ha analizado la viabilidad técnica de utilizar pavimento modificado con PET, demostrando que este material mejora de forma significativa el rendimiento del pavimento, aumenta su resistencia a la fatiga y puede ejercer una función rejuvenecedora, lo que contribuye a retrasar su envejecimiento. (Leng *et al.*, 2018). También se ha señalado que la inclusión de PET en los pavimentos incrementa su elasticidad y mejora la consistencia del



aglutinante, permitiendo la construcción de carreteras que requieren menos mantenimiento (Mohamed Meftaha *et al.*, 2021).

Sin embargo, el empleo de plásticos PET en mezclas asfálticas conlleva ciertas limitaciones, ya que no siempre garantiza la misma efectividad en el comportamiento elástico del betún asfáltico ante cambios abruptos y repentinos de temperatura diaria. Esto puede llevar a una degradación de las características del pavimento y una disminución de las propiedades del asfalto (Mohamed Meftaha *et al.*, 2021)

En las últimas décadas, diversos proyectos de ingeniería, especialmente en el ámbito de la Ingeniería Civil, se han enfocado en explorar las posibilidades de reciclaje del PET. Estos proyectos tienen el propósito de desarrollar infraestructura que no solo beneficia a la sociedad, sino que también integra un enfoque ambiental, promoviendo así soluciones que sean sostenibles.

### **Justificación**

La creciente acumulación de residuos plásticos plantea un desafío ambiental urgente que demanda soluciones innovadoras. La incorporación de plásticos reciclados en pavimentos flexibles se perfila como una alternativa viable para enfrentar esta problemática, ofreciendo al mismo tiempo una opción más sostenible en comparación con los materiales de construcción convencionales.

Investigaciones en este campo son relevantes, ya que podrían contribuir a reducir la huella de carbono de la industria de la construcción y fomentar una economía circular (Choudhary *et al.*, 2020). Además, los hallazgos de este tipo de estudios podrían influir en el desarrollo de políticas públicas y en las prácticas de la industria, incentivando la adopción de estrategias más sostenibles y amigables con el ambiente (Arulrajah *et al.*, 2020).

### **Planteamiento del problema**

A pesar de los avances en los programas de reciclaje, un gran porcentaje de estos desechos termina en vertederos o dispersos en el medio ambiente, donde persisten y generan consecuencias negativas. Según lo planteado por Geyer *et al.* (2017), se estima que, desde la década de 1950, se han generado más de 8.300 millones de toneladas de plásticos en el mundo, de las cuales solo una pequeña fracción ha sido reciclada o incinerada.



Además, el uso de materiales en el sector de la construcción, como en la pavimentación de carreteras, demanda grandes cantidades de recursos naturales, lo que representa otro desafío ambiental (Sharma *et al.*, 2020). Ante esta problemática, se han explorado alternativas que integran residuos plásticos en la construcción de pavimentos, promoviendo así una solución sostenible que reduce la cantidad de desechos plásticos y disminuye la explotación de recursos naturales no renovables.

Además, los desafíos relacionados con la infraestructura vial urbana están en constante evolución. El aumento del tráfico, el desarrollo urbano y los cambios en los patrones de viaje plantean nuevos requisitos y desafíos para el diseño de pavimentos. Abordar estos desafíos es esencial para garantizar la seguridad, la eficiencia y el confort de los usuarios de las vías urbanas.

En el frente de I+D, se están realizando esfuerzos para mejorar las tecnologías de reciclaje y desarrollar métodos más precisos y fiables para diseñar pavimentos asfálticos reciclados. Se están explorando varios enfoques, como el uso de aditivos innovadores, la mejora de las mezclas asfálticas recicladas y el seguimiento de la calidad del pavimento durante toda su vida útil.

### **Formulación del problema**

La acumulación de residuos plásticos sigue siendo un desafío ambiental de escala global. A pesar de los esfuerzos por implementar programas de reciclaje, una proporción considerable de estos residuos termina acumulándose en vertederos o dispersándose en el entorno natural, lo que provoca efectos nocivos para los ecosistemas (Lebreton y Andrady, 2019). Simultáneamente, la construcción de infraestructuras viales, como carreteras y pavimentos, implica el consumo de grandes cantidades de materiales cuyos costos y efectos ambientales también son motivo de preocupación.

La reutilización de plásticos en pavimentos podría ofrecer una solución sostenible que reduce tanto la acumulación de desechos como el impacto ambiental de la construcción tradicional (Arulrajah *et al.*, 2020). Por tanto, se plantea la siguiente interrogante: ¿Cómo integrar de manera efectiva el plástico reciclado en la construcción de pavimentos flexibles, considerando las implicaciones técnicas, económicas y ambientales, y de qué manera este uso influye en las propiedades y el rendimiento de los pavimentos?

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

El objetivo general de este proyecto de investigación es evaluar la viabilidad técnica, económica y medioambiental del agregado de plástico reciclado en pavimentos flexibles, con el fin de desarrollar una infraestructura vial más sostenible y ecoamigable.

### **Objetivos Específicos:**

- Diseñar briquetas asfálticas incorporando partículas en forma de hojuelas de plástico reciclado (PET) en proporciones del 15%, 20% y 25%, con el objetivo de evaluar sus propiedades físico-mecánicas.
- Analizar las propiedades físico-mecánicas de las muestras de briquetas asfálticas, enfocándose en parámetros como peso específico, estabilidad, absorción y densidad.
- Realizar una comparación entre los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de las briquetas asfálticas y los valores establecidos en el Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas bituminosas.

### **Hipótesis de investigación.**

#### **Hipótesis general.**

El uso de plástico reciclado en la construcción de pavimentos flexibles puede mejorar la resistencia y durabilidad de los pavimentos, al tiempo que reduce el impacto ambiental y los costos de construcción.

#### **Hipótesis Alternativa (H1)**

La incorporación de plástico reciclado en la construcción de pavimentos flexibles tiene un impacto significativo en las propiedades mecánicas y el rendimiento de los pavimentos, mejorando su durabilidad y sostenibilidad en comparación con los pavimentos construidos únicamente con materiales convencionales.

### **Limitaciones de la investigación**

La presente investigación sobre el uso de plástico reciclado en pavimentos flexibles presenta limitaciones como la disponibilidad de plástico reciclado en la región puede ser limitada, lo que podría afectar la cantidad de material que se puede obtener para la investigación. Además, las instalaciones y equipos disponibles en la región pueden no ser suficientes para realizar ciertos ensayos o pruebas. El clima de la región puede influir en los resultados de los ensayos de pavimentos flexibles con plástico reciclado. Finalmente, pueden existir regulaciones locales o nacionales que limiten el uso de plásticos reciclados en la construcción de carreteras y pavimentos.



## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### **Revisión de literatura sobre pavimentos flexibles y aditivos ecológicos.**

En su tesis de ingeniería civil titulada “Influencia de la adición de residuos plásticos en el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica en caliente en la ciudad de Chiclayo 2018”, Silva (2018) de la Universidad Privada del Norte tuvo como objetivo principal emplear plástico reciclado en forma pulverizada para el diseño de pavimentos flexibles, reemplazando un porcentaje del agregado fino sin modificar la cantidad de cemento asfáltico. La metodología utilizada fue un diseño experimental de tipo exploratorio y aplicado, con una población y muestra de 30 briquetas.

Se realizaron pruebas con diversas proporciones de adición de plástico reciclado y diferentes porcentajes de cemento asfáltico PEN 60/70 para comparar sus propiedades con las de la mezcla asfáltica base. Los resultados indicaron que la incorporación de plástico reciclado mejora significativamente las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente. Además, se suryó que estas mezclas deben cumplir con los estándares establecidos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), garantizando así que posean las características mínimas requeridas para su uso en pavimentos.

Ramírez y Tananta (2018), en su tesis de ingeniería civil titulada “Diseño de carpeta asfáltica aplicando gránulos de plástico reciclado para mejorar la transitabilidad del Jr. San Martín, distrito de Tabalosos-2018” de la Universidad César Vallejo, tuvieron como objetivo principal determine una carpeta asfáltica con propiedades mejoradas al incorporar plástico reciclado en forma de gránulos. También se propusieron realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos frente a una carpeta asfáltica convencional. La investigación se clasificó como experimental descriptiva, con un enfoque en las vías del distrito de Tabalosos. La muestra incluyó 10 diseños con variaciones en el porcentaje de cemento asfáltico.

Los ensayos realizados en el laboratorio llevaron a la conclusión de que la inclusión de plástico reciclado en gránulos en la mezcla asfáltica redujo los porcentajes de vacíos, lo que puede contribuir a prolongar considerablemente la vida útil y el tiempo de servicio del pavimento flexible. Desde una perspectiva económica, se llevó a cabo un análisis de costo unitario (ACU) para comparar el costo total de la mezcla asfáltica convencional con el de la mezcla que contenía plástico reciclado en gránulos, resultando en una carpeta asfáltica más económica por metro



cúbico. Este estudio destaca tanto las ventajas mecánicas como los beneficios económicos que puede ofrecer la incorporación de plásticos reciclados en la construcción.

Silvestre (2017), en su tesis de ingeniería civil titulada “Comparación técnica y económica entre las mezclas asfálticas tradicionales y reforzadas con plástico reciclado en la ciudad de Lima-2017” de la Universidad César Vallejo, tuvo como objetivo principal determinar el porcentaje óptimo de Plástico reciclado que se puede incorporar en la mezcla asfáltica para mejorar sus características físicas y estructurales en comparación con la mezcla convencional. La metodología utilizada fue experimental y de nivel explicativo, considerando una muestra consistió en 60 briquetas sometidas al ensayo Marshall.

Los resultados mostraron que, al agregar plástico reciclado en diferentes porcentajes a la mezcla asfáltica, se obtuvo un diseño que presentó una mínima reducción en el flujo en comparación con la mezcla asfáltica base, además de mejorar las propiedades elásticas y de rigidez. A través de las pruebas experimentales, se logró una mezcla asfáltica con resistencia a las deformaciones, y se observó que el costo total para producir esta mezcla por metro cúbico es más económico que el de una mezcla asfáltica convencional. Asimismo, esta mezcla cumplió con todos los parámetros mínimos establecidos por el Ministerio de Transporte.

Navarro (2017), en su tesis de ingeniería civil titulada “Propuesta de diseño de mezclas asfálticas con adiciones de PET” de la Universidad Señor de Sipán, tuvo como objetivo principal analizar la elaboración de mezclas asfálticas que incorporan polietileno de tereftalato (PET) y comparar la reacción del plástico con briquetas de muestras patrón. La investigación se propuso como finalidad ofrecer una alternativa que amplíe la vida útil de las mezclas y, de este modo, genere un ahorro significativo en la inversión.

La metodología aplicada en este proyecto fue de tipo tecnológico, con un diseño experimental y un nivel explicativo. La población era equivalente a la muestra, ya que consistía en 18 briquetas elaboradas en laboratorio. Los resultados obtenidos a través de diversos ensayos para cada tipo de tránsito vehicular (liviano, medio y pesado) indicaron que las briquetas son aptas para tránsito liviano, aunque se observó que, al variar los porcentajes, estas fallaron por desintegración. Se concluyó que esta tecnología está en proceso de mejora, ya que los ensayos presentaron factores

que podrían afectar el desempeño de la mezcla, impidiendo su cumplimiento con los requisitos establecidos por el Ministerio de Transportes.

Rojas (2019), en su tesis de ingeniería civil titulada “Diseño de pavimento modificado con la adición de plástico reciclado para ciclovías” de la Universidad de Cuenca, tuvo como objetivo principal presentar un diseño alternativo de pavimento flexible que incorpora PET triturado reciclado en una mezcla asfáltica, garantizando que este nuevo material mantenga o supere el rendimiento del asfalto convencional.

La metodología aplicada en esta investigación consistió en un diseño experimental de nivel exploratorio. La población y la muestra estuvieron compuestas por 8 briquetas, las cuales se elaboraron a partir de ensayos con diferentes porcentajes de adición de plástico reciclado PET triturado. Los resultados del ensayo Marshall indicaron que el porcentaje óptimo de incorporación. Por tanto, se propone un diseño de mezcla que no solo resulta más económico, sino que también es sostenible, dado el impacto ambiental positivo que conlleva. Esto es especialmente relevante en el contexto actual, donde la contaminación por residuos plásticos es elevada y se hace urgente implementar estrategias de reciclaje en el sector.

En su tesis, Marcillo (2018) se enfocó en mejorar el rendimiento del pavimento flexible mediante la incorporación de plástico PET reciclado en una mezcla de hormigón asfáltico para vías de segundo orden, utilizando el método de vía seca. Realizado en la Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil, este estudio buscó cumplir con las normas de construcción vigentes al mismo tiempo que ofrecía una solución estructuralmente reforzada para este tipo de pavimento.

Empleando una metodología de diseño experimental aplicada y una muestra de 24 briquetas, la investigación indicó que agregar PET reciclado incrementa la durabilidad de la mezcla y reduce las deformaciones por el tránsito vehicular, lo que prolonga su vida útil y disminuye los costos de mantenimiento. Como conclusión, se inició que el método de vía seca, con un 3% de PET reciclado, resultó ser el más efectivo, superando los resultados obtenidos con el proceso de vía húmeda.

### **Historia de las carreteras**

Las carreteras modernas tal como las conocemos hoy surgieron en el siglo XX. Sin embargo, es importante señalar que ciertos métodos avanzados de construcción y mantenimiento



fueron descubiertos siglos atrás. Un tratado de 1755 ya mencionaba el uso de materiales como el alpechín (subproducto del aceite de oliva) para fortalecer el terreno de las carreteras (Ramos, 2007).

La invención de la rueda en Mesopotamia hace unos 5000 años impulsó la necesidad de construir caminos para facilitar el tránsito de vehículos. Se atribuye a los mesopotámicos la construcción de las primeras carreteras alrededor del 3500 aC. La Carretera Real Persa, que funcionó desde aproximadamente 3500 aC hasta 300 aC, es considerada la carretera de larga distancia más antigua. Su ruta ha sido reconstruida con base en escritos del historiador griego Heródoto y otras fuentes históricas (Cal *et al.*, 1995; Ramos, 2007).

En ese tiempo, los asirios y egipcios también comenzaron a desarrollar caminos, conectando rutas entre Asia y Egipto. Los cartagineses crearon un sistema de caminos de piedra a lo largo de la costa sur del Mediterráneo hacia el 500 aC, y los etruscos construyeron caminos antes de la fundación de Roma. Heródoto menciona que el rey Keops de Egipto construyó caminos de piedra para el transporte de piedras destinadas a las pirámides. Sin embargo, los caminos construidos científicamente aparecieron con el Imperio Romano, donde la Vía Apia, construida por Appius Claudius en el 312 aC, es un ejemplo destacado. Los romanos son reconocidos por introducir un método científico en la construcción de caminos. Civilizaciones prehispánicas, como los mayas, toltecas, aztecas e incas, también desarrollaron avanzadas técnicas de construcción de caminos, destacándose los Caminos Blancos de los mayas en el sur de México y norte de Centroamérica (Cal *et al.*, 1995).

En China, se construyó la Ruta de la Seda, la más larga del mundo, la cual se extendió a lo largo de 2.000 años. En el siglo XI aC, los chinos desarrollaron una red de caminos que alcanzó su máxima extensión alrededor del 200 aC, conectando con las calzadas romanas y formando una red de 12.800 km desde Cádiz en el Atlántico hasta Shanghái en el Pacífico. En Sudamérica, los incas construyeron una avanzada red de caminos sin el uso de la rueda, a abarcar desde Quito en Ecuador hasta el sur de Cuzco en Perú, incluyendo galerías talladas en roca y muros de contención con un ancho de hasta 7,5 metros (Ramos, 2007).

## **Historia de los pavimentos**

El Museo de Zaragoza alberga una colección de pavimentos romanos, principalmente mosaicos con decoraciones figurativas y geométricas. Estos pavimentos, de gran atractivo para los visitantes, provienen de distintas zonas y se exhiben de manera permanente (González, 2018). En la historia de los pavimentos, los de cocciopesto aparecieron en el siglo V a C en el norte de África y se expandieron en el Mediterráneo gracias al imperio romano.

Estos pavimentos eran lisos, duraderos y económicos, pero para satisfacer las exigencias estéticas romanas, en el siglo I a C se comenzó a decorar con teselas de mármol o piedra caliza. En Hispania, tras la conquista romana, se adoptan estas prácticas. En el siglo XVIII, Thomas Telford desarrolló un sistema de construcción de caminos con una base central de roca pesada para mejorar el drenaje. Este sistema, conocido como firme de Telford, demostró gran resistencia y capacidad de carga (Blecua Roca, 2021; Ramos, 2007).

John McAdam perfeccionó el sistema al introducir áridos de distintos tamaños y una capa superior de árido grueso. Este método, llamado pavimento de macadán, ganó popularidad en el siglo XIX. Sin embargo, durante la Primera Guerra Mundial se retomó el sistema de Telford para construir carreteras más robustas. La aplicación de alquitrán de hulla en pavimentos de macadán mejoró la resistencia de la superficie, marcando el inicio de los pavimentos modernos. Con el tiempo, los métodos y materiales han evolucionado, generando carreteras más seguras y duraderas (Ramos, 2007).

## **Historia de los pavimentos reciclados**

El reciclaje en pavimentos es una preocupación actual debido a las grandes cantidades de residuos de construcción y demolición (RCD) generados anualmente. Entre estos se incluyen residuos inertes, como cerámica triturada, cuyo manejo presenta desafíos. La falta de aplicación de políticas de reducción, reciclaje y reutilización (3R) y la escasez de investigaciones sobre el uso de residuos inertes en producciones industriales son factores que agravan el problema (Solarte Vanegas, 2022). Es crucial realizar estudios rigurosos que evalúen el desempeño de las mezclas de pavimento con residuos, lo que podría reducir la incertidumbre y ofrecer soluciones económicas y sostenibles.



El uso de residuos cerámicos como material de construcción en pavimentos reciclados tiene el potencial de reducir la dependencia de recursos naturales y contribuir a la sostenibilidad ambiental, siempre que se respalde con investigaciones que aseguren su efectividad y durabilidad (Solarte Vanegas, 2022).

#### **1.1.4. Residuos en el mundo**

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 examina el impacto de la generación de residuos. El sector de la construcción es responsable del 10-35% de los residuos en los sitios de disposición, además de consumir el 40% de los materiales extraídos (Abarca Guerrero *et al.*, 2019). El informe subraya la necesidad de una gestión adecuada de residuos, destacando desafíos como el crecimiento económico y demográfico y su efecto en el aumento de residuos, que podría incrementar en un 69% para 2050, sumando 1,39 billones de toneladas.

Un estudio en Costa Rica identificó que los residuos en la construcción provienen de etapas como el diseño, la gestión de compras y la ejecución del proyecto. Estos hallazgos enfatizan la importancia de reducir el impacto ambiental a través de prácticas de construcción sostenibles y de planificación eficiente (Abarca Guerrero *et al.*, 2019).

#### **Pavimentos asfálticos reciclados**

El pavimento asfáltico reciclado (PAR) es un subproducto del fresado de pavimentos en procesos de rehabilitación. Esta mezcla de agregados medianos a finos con asfalto ha ganado importancia como material para capas base en pavimentos debido a su creciente disponibilidad. Estudios sobre su ciclo de vida han revelado su potencial para reducir las emisiones, aunque algunos han demostrado que el beneficio ambiental no siempre es significativo en comparación con las mezclas asfálticas convencionales (Castro Medina & Sabogal Melendez, 2021; Ullah *et al.*, 2018).

El PAR ha sido evaluado como alternativa para reducir residuos y emisiones en mezclas asfálticas. Aunque se suele limitar su inclusión a un 15% para evitar variaciones en la mezcla, estudios han demostrado que una mezcla con 17% de PAR puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> más que una con 20%. Mezclas con hasta un 30% de PAR han logrado reducir emisiones hasta en

un 30%, respaldando su uso para disminuir el impacto ambiental (Castro Medina & Sabogal Melendez, 2021; Ullah *et al.*, 2018).

## **Bases teóricas**

### **Concepto de pavimentos**

Los pavimentos son estructuras construidas sobre el terreno natural para ofrecer una superficie segura y cómoda para la circulación. Están formados por capas de materiales diseñados para dispersar la energía de las cargas de tránsito sin exceder la capacidad del terreno natural (Bonilla *et al.*, 2017). Estas capas descansan sobre la subrasante de la vía, la cual se obtiene tras el movimiento de tierras. Para mantener su funcionalidad, los pavimentos requieren resistencia a las cargas de tráfico repetitivas (Vallejo, 2022).

Existen distintos tipos de pavimentos: flexibles, rígidos y articulados. Los flexibles, con una capa asfáltica delgada, necesitan un mantenimiento adecuado para garantizar la seguridad y reducir costos operativos, mientras que los rígidos emplean lasas de concreto hidráulico que otorgan resistencia al pavimento (Vallejo, 2022).

### **Tipos de pavimentos asfálticos reciclados.**

Hay muchos tipos de recubrimientos reciclados que se han estudiado por su impacto y desempeño ambiental. Algunos de ellos incluyen:

#### ***Agregado de Concreto Reciclado (ACR)***

Su inclusión en mezclas bituminosas puede tener un mayor impacto que el uso de árido natural debido a la distancia de transporte del material. Sin embargo, también se ha registrado una reducción de emisiones ambientales cuando se utiliza hormigón reciclado en la mezcla (Castro Medina & Sabogal Meléndez, 2021).

#### ***Caucho molido de llantas***

Las mezclas asfálticas con gránulos de caucho añadidos no mostraron diferencias significativas en las emisiones de dióxido de carbono en comparación con las mezclas sin modificar. Su uso como modificador de betún o aditivo en mezclas mejora la resistencia y durabilidad y reduce la necesidad de explotar los recursos naturales. Agregar caucho y vidrio



triturado a una mezcla densa y caliente tiene un efecto menor, mientras que el vidrio triturado aumenta el consumo de energía (Castro Medina & Sabogal Melendez, 2021; Praticò *et al.*, 2020).

#### ***Aditivos naturales y nanoaditivos***

Se ha demostrado que las cenizas de dátil, los desechos de carburo de calcio, la nanoarcilla, la nanopiedra, el óxido nanoporoso, el polibutileno y la cal hidratada mejoran propiedades como la resistencia a la humedad, la adhesión y la durabilidad de las mezclas de plástico y azúcar modificado (Vásquez *et al.*, 2021). Estos estudios demuestran que el pavimento reciclado, ya sea mediante el uso de agregados de concreto reciclado o caucho molido de neumáticos, puede tener un impacto positivo en la reducción de emisiones y la durabilidad estructural de la superficie de la carretera.

#### ***Pavimento flexible***

Se reconoce que un diseño efectivo de pavimento es aquel que logra el rendimiento esperado en función de su presupuesto disponible. La demostración de la relación entre un diseño de pavimento de calidad y su deterioro se logra mediante la experiencia, pruebas o una mezcla de ambas. Las condiciones ambientales y la composición de cada capa componente limitan el camino (Ranadev and colleagues, 2016).

Durante un largo período de tiempo, el diseño de pavimentos se llevó a cabo a través de procedimientos experimentales; sin embargo, con el transcurso del tiempo han surgido métodos mecánicos experimentales, en los cuales se consideran no solo el grosor de las capas de cimentación y las condiciones ambientales, sino también la carga que actúa sobre la superficie. Cada eje del vehículo fue considerado, lo cual fue descrito como una evaluación de tránsito destinada a entender la reacción de la infraestructura de la carretera (Pereira *et al.*, 2017).

El desarrollo de las naciones continúa progresando, en particular el desarrollo económico, lo que resulta en un incremento en la cantidad de automóviles y debido a la mayor cantidad de vehículos en las carreteras, la carga por eje también se incrementa, lo cual demanda la creación de nuevos diseños de pavimentos donde sea necesario. El método AASHTO (1993), que es el más comúnmente utilizado hasta ahora, se considera al evaluar la fatiga porque es un método diferido (Nuri *et al.*, 2018).



Las vías principales, que reciben la mayor cantidad de tráfico de vehículos, son las que sufren más debido a las cargas que soportan, y los daños más habituales son las grietas y la fatiga. Las estructuras del pavimento se deterioran de dos formas: en primer lugar, por tensión de tracción (horizontal), donde la capa superficial se agrieta y deteriora debido a la fatiga, y por tensión de compresión (vertical), donde se deforma permanentemente muy por encima de la superficie de la estructura del pavimento debido a la carga excesiva en el suelo (Ibrahim, 2012).

### **Reciclaje del plástico**

Las propiedades físicas y químicas del plástico le permiten tener diversos usos, sin embargo, su falta de degradabilidad provoca contaminación al generar desechos que afectan el medio ambiente. El desafío principal con el plástico es cambiar de la economía lineal "extraer, fabricar y desechar" a una economía circular, lograr esa transición en la cual una vez utilizado, pueda reintegrarse en el ciclo (Cruz *et al.*, 2020).

El objetivo principal es crear conciencia sobre la reutilización del plástico mediante el diseño, la producción y la comercialización de un plástico que sea fácil de recuperar y reciclar, con el fin de reducir al mínimo el impacto ambiental (Hahladakis *et al.*, 2018). El manejo de los residuos plásticos a menudo implica quemarlos o llevarlos al relleno sanitario, pero estos métodos no son amigables con el medio ambiente ni sostenibles, ya que emiten humo, dióxido de carbono, monóxido de carbono y óxido nitroso, los principales gases responsables del calentamiento global y conocidos como gases de efecto invernadero.

Además, generan metano, como en el caso de los lixiviados que contienen patógenos. El plástico no es biodegradable y su descomposición requiere grandes cantidades de energía, por lo que es un desecho no deseable en los vertederos (Agyeman *et al.*, 2019).

En el instante en el que se fabrica el plástico, se están utilizando recursos energéticos y naturales, por lo tanto, la idea es evitar su disposición en vertederos y comenzar a reutilizarlo a través del reciclaje, ya sea para su uso original o para uno diferente. La intención es el reciclaje y la reutilización, creando un impacto positivo en el medio ambiente y teniendo en cuenta que el reciclaje genera más puestos de trabajo que los vertederos (Huysman *et al.*, 2015).

### **Experiencias utilizadas en PAR en otros países**

El reciclaje de pavimentos ha sido empleado en múltiples proyectos en América, Canadá, Europa y Asia. Han sido llevados a cabo estudios con el fin de mejorar las características y el desempeño de las mezclas recicladas, además de evaluar la influencia de diversos factores en la formulación y la excelencia de los pavimentos reciclados (Xiao *et al.*, 2018). Es necesario establecer tácticas para evitar y disminuir la producción de desechos de construcción, fomentando la reutilización de materiales y apoyando el desarrollo del mercado de reciclaje.

Las compañías de construcción generalmente adoptan las estrategias de sus competidores, lo que significa que implementar métodos efectivos de gestión de materiales y construcción sustentable puede beneficiar su reputación y aumentar su alcance en el mercado. Los proveedores de materiales son de vital importancia al proporcionar apoyo e instrucciones acerca de equipamiento y materiales sostenibles. Además, la solicitud de construcciones sustentables por parte de los consumidores puede provocar un cambio en la actitud y comportamiento de los empleados de la industria (Abarca Guerrero *et al.*, 2019).

### **Métodos para el diseño de mezclas asfálticas.**

El método AASHTO 93, conocido como el método de diseño AASHTO de 1993, consiste en tomar en cuenta factores como el tráfico, el clima, las propiedades de los materiales y las características del suelo subyacente con el fin de calcular el espesor y las especificaciones de las capas del pavimento que se utilizaron en el diseño de pavimentos flexibles en carreteras. Se emplean modelos matemáticos y análisis de tensión-deformación para investigar el desempeño estructural del pavimento y anticipar su resistencia a las deformaciones y capacidad de soporte (Castro Vásquez *et al.*, 2020).

El Método MEPDG (Guía de Diseño de Pavimentos Mecánico-Empírico), creado por el *Transportation Research Board* (TRB) de los Estados Unidos, emplea modelos matemáticos sofisticados para analizar la respuesta de los pavimentos teniendo en cuenta diversos factores como el tráfico, el clima, los materiales y las propiedades del suelo. Se considera más preciso y actualizado que el método AASHTO, permitiendo la predicción y mitigación de problemas de fatiga en la capa superficial, lo que resulta en una prolongación de la vida útil y una mejora en el rendimiento de los pavimentos.



El MEPDG considera los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en variadas capas del pavimento. Adicionalmente, se han creado modelos de fatiga con el fin de anticipar el desempeño de la capa superior frente a cargas repetitivas de tráfico, tomando en cuenta factores como la composición de las mezclas asfálticas, las condiciones de los ensayos de fatiga y la ajuste del modelo en instalaciones de investigación (Brasil *et al.*, 2021).

El Método CBR (Coeficiente de Portante de California) se emplea en el diseño de carreteras flexibles. El proceso implica realizar pruebas en laboratorio para determinar la resistencia del suelo y decidir el grosor correcto de las capas de pavimento basándose en el valor del CBR. No obstante, investigaciones han comprobado que este método puede resultar en pavimentos con dimensiones excesivas. A pesar de que implica más trabajo de campo y de laboratorio, es un método factible y rentable, utilizando equipos estándar.

Los resultados de la prueba de CCBR pueden calcular el módulo resiliente de los suelos blandos de la subrasante, proporcionando una estimación precisa de la rigidez, aunque a niveles de esfuerzo inferiores a los ensayos mecanicistas convencionales. Es recomendable agregar más ensayos en investigaciones futuras, como utilizar la relación de Poisson, para mejorar los resultados obtenidos. A pesar de la requerida cantidad adicional de trabajo en la recolección y revisión de muestras, los resultados obtenidos del examen de CCBR confirman su eficacia y precisión al calcular la rigidez de los suelos (Bojacá Torres *et al.*, 2022).

Los resultados de la utilización de PAR muestran que tanto el material PAR al 100% como el material PAR al 50% / VA al 50% producen resultados de módulo similares al VA, especialmente a presiones de confinamiento más elevadas. El PAR tiene un impacto significativo en el comportamiento de los materiales, especialmente en relación con las tensiones de confinamiento.

Los modelos estudiados presentan una descripción equivalente del comportamiento de los materiales con PAR, lo que respalda su incorporación en proyectos tanto nuevos como de rehabilitación en el ámbito de la sostenibilidad. Se sugiere crear modelos que tomen en cuenta las particularidades del PAR, como el envejecimiento del asfalto, para mejorar la exactitud del diseño del pavimento. Los resultados indican que se recomienda un límite inicial del 50% de PAR.

Es crucial definir requisitos que posibiliten una mayor integración de PAR en las capas fundamentales del pavimento, de acuerdo con las metas de sostenibilidad (Plati & Cliatt, 2018).



Se resalta la importancia de llevar a cabo una investigación constante para alcanzar dichos objetivos y mejorar la sostenibilidad, teniendo en cuenta la posibilidad de reciclar por completo el PAR. Se realizó una investigación para analizar cómo se comportan las combinaciones de PAR-VA al someterlas a pruebas de deformación permanente con cargas de tráfico que reflejan condiciones reales.

Se determinó que la adición de PAR a las mezclas de VA disminuye las deformaciones permanentes, sin embargo, hay un nivel de contenido de PAR que no debe superarse con el fin de preservar la calidad del asfalto sin mezclar. Los valores de umbral varían dependiendo de la fuente de PAR y son influenciados por la cantidad de ciclos de carga. Se pudo notar que las características del PAR tienen un impacto en los resultados, y ciertas combinaciones de PAR-VA presentan mayor cantidad de deformaciones permanentes que el asfalto sin modificar (Ullah *et al.*, 2018).

El Método de diseño de mezclas asfálticas Hubbard-Field (década de 1920) fue uno de los primeros en examinar los contenidos de vacíos tanto en la mezcla asfáltica como en el agregado mineral. Se utilizó la estabilidad como un método de prueba para cuantificar la deformación, resultando efectivo en la evaluación de mezclas con agregados pequeños o de granulometría fina, pero no fue igualmente eficaz en mezclas que contenían agregados de gran tamaño (Ortiz, 2016).

El Método Marshall, que data de la década de 1930, es un método para diseñar mezclas asfálticas que fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial y posteriormente adoptado para su utilización en carreteras. Utilice una estabilidad y un porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales. Salvo modificaciones en las especificaciones, el procedimiento no ha sido alterado desde la década de los años 40 (Ortiz, 2016).

Sistema de análisis de mezcla de agregado de asfalto. AAMAS (1987) Reconoció la necesidad de realizar modificaciones en el diseño de las mezclas, lo que llevó dos años para crear un nuevo enfoque para el diseño de mezclas. Este nuevo enfoque incorporaba un método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas. Además, se desarrollaron pruebas para detectar deformaciones permanentes, grietas por fatiga y resistencia a las grietas a bajas temperaturas (Ortiz, 2016).

*Superior Performing Asphalt Pavement* (Superpave) es el nombre del nuevo sistema desarrollado para especificar materiales asfálticos, que se encuentra en fase de desarrollo. Se trata

de una tecnología que ha sido implementada de tal forma que permita identificar, examinar y hacer pronósticos sobre la calidad del pavimento. Se incluye una especificación para cementos asfálticos, un diseño y sistema de análisis de mezclas asfálticas. Las especificaciones del cemento y el sistema de diseño del Superpave incluyen diversos equipos y métodos de pruebas, junto con criterios para los mismos (Ortiz, 2016).

### **Métodos de Marshall para Diseño Caliente en Mezcla Asfáltica**

Especímenes de Prueba Estándar El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64mm (2 ½”) y 102 mm (4”) de diámetro, se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto –agregado (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad –análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y el flujo de los especímenes compactados (Ortiz, 2016).

#### ***Estabilidad de Especímenes de Prueba Estándar***

La estabilidad de los especímenes de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que en los especímenes estándar desarrollará a 60°C cuando es ensayada, el valor del flujo es el movimiento total o deformación en unidades de 0.25 mm (1/100mm) que ocurre en los especímenes entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad (Ortiz, 2016).

#### ***Grafica Semi logarítmica***

El Método Marshall utiliza una gráfica semi-logarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm graficadas en forma logarítmica. Curva Granulométrica La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior) (Ortiz, 2016).



## CAPITULO III: METODOLOGIA

### **Descripción detallada de los ensayos y experimentos a realizar**

Se determinaron los porcentajes de pavimento asfáltico reciclado (PAR) que se emplearon, los cuales se combinaron con los agregados vírgenes. Estos últimos, conforme a las especificaciones técnicas del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, ajustó a la faja granulométrica para mezcla asfáltica de alto tráfico o de 1/2". Para la preparación de la mezcla asfáltica con PAR, se siguió el procedimiento establecido en las normas AASHTO, ASTM y las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP - 001-F 2002, utilizando un aparato Marshall. Dichas normas indican que se elaboraron briquetas mediante la adición de diferentes porcentajes de asfalto hasta determinar el porcentaje óptimo de este material.

### **Diseño experimental, materiales y variables a medir**

#### **Diseño experimental**

Esta investigación se clasifica como experimental, ya que implica la manipulación directa de las variables independientes para determinar si estas modificaciones generan cambios en las variables dependientes. En este estudio, se ajustaron tanto el tipo como la cantidad de plástico reciclado en la mezcla de pavimento para evaluar su impacto en la resistencia, durabilidad y efectos ambientales del material. Además, se controlaron otras variables, como el método de construcción y las condiciones ambientales, para garantizar que cualquier variación en las variables dependientes sea atribuible exclusivamente a las manipulaciones realizadas en las variables independientes.

El material utilizado en la construcción de carreteras de asfalto flexible proviene principalmente de Manta, y su empleo ha crecido debido a sus beneficios ecológicos, económicos, reciclables y a su idoneidad para la zona. Idealmente, el suelo empleado debe contar con bajos niveles de materia orgánica y arcilla expansiva. Esta composición permite que el suelo se combine eficazmente con otros materiales, como hojuelas de PET, que contribuyen a mejorar el aislamiento de los materiales naturales.



## **Materiales y método**

### ***Betún***

El betún se obtiene mediante la destilación fraccionada del petróleo crudo. Es el componente más denso y posee el punto de ebullición más elevado, alcanzando los 525 °C.

### ***Arena***

Este árido fino es un material derivado de la descomposición natural de rocas o por procesos de trituración artificial. En la trituración artificial, las rocas se fragmentan en instalaciones conocidas como plantas de agregados. En el caso de producción natural, la arena se extrae de los lechos de ríos y luego se tamiza. Sus partículas presentan tamaños entre 2 mm y 0,05 mm (Pública-DGIP, Dirección General de Inversión, 2015).

### ***Piedra triturada***

Este árido grueso se obtiene mediante extracción, trituración y clasificación de material de cantera, asegurando altos estándares de calidad y homogeneidad en las propiedades físicas y distribución de partículas de los productos obtenidos (M. D. E. González, 2018).

### ***Grava triturada***

La grava se compone de fragmentos de rocas sedimentarias duras, formados de manera natural o mediante procesos de trituración de otras rocas y minerales. Los guijarros varían en tamaño entre 2 y 64 mm de diámetro y presentan diferentes composiciones químicas, predominando rocas ricas en cuarzo y cuarcita, así como fragmentos de caliza, basalto, granito y dolomita (Cevallos, 2011)

### ***Equipos***

Para asegurar que las propiedades del suelo sean adecuadas, es esencial realizar un análisis que correlacione su composición física. Esto es posible mediante equipos especializados que facilitan la extracción, control y prueba de muestras representativas, permitiendo así el desarrollo de un modelo muy cercano a las condiciones reales en el laboratorio.

### ***Molde de compactación especial de 4”***

Las especificaciones del molde de compactación especial de 4 pulgadas son las siguientes:

- **Cuerpo:** Diámetro interior de 101,6 mm (4") y altura de 116,4 mm.
- **Placa base:** Dimensiones de 12,7 mm x 150 mm x 150 mm.
- **Collar:** Diámetro interior de 101,6 mm (4") y altura de 60,33 mm

Figura 5.- Molde de método Marshall



Fuente: Calderón 2018

Martillo de compactación con base circular: Empleado para la compresión dinámica de muestras de asfalto en sustratos compactados, cuenta con un protector de puntera, un peso de 10 libras y una altura de caída de 18 pulgadas (Hernández, 2021).

Figura 6.- Martillo de compactación



Fuente: Calderón 2018

### *Pedestal de compactación*

Placa superior de acero de 305 mm x 305 mm x 25 mm (12" x 12" x 1") con una base de madera de 203 mm x 203 mm x 457 mm (8" x 8" x 18"). Incluye un soporte sujetador para el molde Marshall (Pérez, 2010).

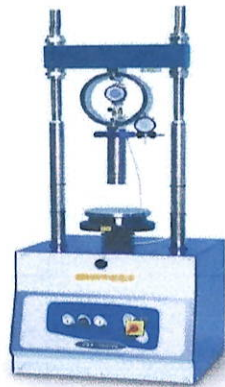
Figura 7.- Pedestal de compactación de método Marshall.



Fuente: Calderón 2018

Prensa para ensayo (máquina Marshall): Un equipo especialmente diseñado para pruebas de estabilidad, compuesto por dos segmentos semicirculares con un diámetro interno de 5 cm (González, 2018).

Figura 8.- Prensa para el ensayo de compactación de método Marshall



Fuente: Calderón 2018



### ***Equipo de baño María***

Es un dispositivo experimental en forma de recipiente que se llena con agua caliente, empleado para mantener muestras a una temperatura constante en agua durante períodos prolongados de tiempo (Dirección General de Servicios Técnicos, 2014).

### ***Bandejas para calentamiento***

Fabricadas con material anticorrosivo que mantiene su calidad incluso con ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento. Deben contar con tapas adecuadas para evitar la pérdida de humedad de la muestra antes del pesaje inicial y prevenir la absorción de humedad ambiental después del secado y antes del pesaje final. Se recomienda el uso de aluminio o acero inoxidable, con dimensiones de 2,5 cm de altura y 5 cm de diámetro (Hernández, 2021).

### ***Balanza***

Cumple con la especificación D 475 3, clase GP1, sensibilidad 0,01 g (Instituto Nacional de Estadísticas y Censo - INEC, 2019).

### ***Horno***

El horno es un equipo regulado por calor, diseñado para mantener una temperatura constante de  $110 \pm 5$  °C, ideal para el secado de muestras. No se debe ajustar el termostato sin autorización del instructor, ya que el proceso de estabilización y retorno a la temperatura deseada puede ser prolongado (INEC, 2019).

### ***Termómetro digital***

Utiliza un sensor y luego usa un circuito electrónico para convertir pequeños cambios de voltaje en un número final que muestra la temperatura en la pantalla.

### ***Espátula y guantes de cuero***

Se utilizaron estos utensilios versátiles consisten en una cuchara triangular de chapa con borde afilado y un mango largo, útil para raspar superficies de mampostería, limpiar, enlucir, mezclar y aplicar pinturas, así como para manipular y esparcir sustancias semilíquidas en farmacias y cocinas. (INEC, 2019).

### *Tamizadora*

Para columna de tamiz fuerte vibración y movimiento de rotación. Tiene un temporizador de 0 a 99 minutos y mide 496 x 406 x 946 mm. Está fabricado según las normas de calidad ISO 9001.

### *Tamices debidamente enumerados*

La Tabla 1 presenta las dimensiones de estas aberturas en milímetros, empleadas para evaluar el tamaño de las partículas del suelo. Estos contenedores se fabrican de acuerdo con normas de calidad específicas, como ISO 565, 3310-1, 3310-2 y ASTM E11. La malla debe estar firmemente instalada en el marco, el cual debe impedir la pérdida de material durante el tamizado. Tanto la malla como el marco deben cumplir con los requisitos de la norma NTE INEN 154 (Pérez, 2010).

Tabla 1.- Valores estandarizados de ensayo granulométrico

Tamaño de malla – pulg.	Tamaño de malla – mm
3"	76.2
2"	50.8
1.5"	38.1
1"	25.4
¾"	19.1
3/8"	9.52
N°4	4.76
N°10	3.36
N°40	0.42
N°200	0.074

Fuente: Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN NTE 154

Los tipos y niveles de investigación que se emplearon en este proyecto incluyen enfoques correlacionales, experimentales, de campo y bibliográficos. Estos constituyen los principales métodos metodológicos que se utilizaron a lo largo del desarrollo de la investigación y experimentación, mediante técnicas de recolección de datos y el diseño y aplicación de instrumentos que funcionaron como fuentes primarias en el análisis de datos (tabla 2). La

resistencia al flujo plástico de las mezclas bituminosas se medirá de forma precisa y rápida, siguiendo los estándares establecidos en las normas AASHTO T 245, ASTM D 1559 y AASHTO T 225 (AASHTO. LRFD, 2014).

Tabla 2.- Factores de estudio

Tratamiento	# de muestras	% de cemento asfáltico	% de plástico	Unidad experimental (gr)
Tratamiento testigo	4	6.0%	0%	1200,0
	4	6,5%	0%	1200,0
	4	7.0%	0%	1200,0
	4	6.0%	15%	1210,8
Tratamiento 1	4	6,5%	15%	1211,7
	4	7.0%	15%	1212,6
	4	6.0%	20%	1214,4
Tratamiento 2	4	6,5%	20%	1215,6
	4	7.0%	20%	1216,8
	4	6.0%	25%	1218,0
Tratamiento 3	4	6,5%	25%	1219,5
	4	7.0%	25%	1221,0

**Fuente:** Vargas, A (2022)

Durante el trabajo de campo, se producirá una mezcla bituminosa con adición de plástico reciclado tipo PET, aplicando condiciones de prueba adecuadas y en un periodo de tiempo determinado. Se evaluará la resistencia a la compresión, calculada mediante dispositivos de recolección de datos. Los niveles y tipos de investigación previamente detallados se implementaron a lo largo del estudio y de las pruebas prácticas, permitiendo alcanzar los objetivos propuestos para extraer conclusiones y recomendaciones fundamentadas en los procedimientos.

Este proceso técnico es medible y no requiere manipulación, proporcionando a los beneficiarios información sobre herramientas de consultoría seleccionadas y modelos prácticos. Para asegurar una correcta aplicación de los procesos de análisis, se detalla a continuación la secuencia que deberá seguirse en el trabajo experimental.



### *Ensayos previos*

- Granulometría (Norma INEN 696),
- Gravedad específica y absorción de los agregados finos (Norma ASTM C128),
- Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (Norma ASTM C127),
- Desgaste por abrasión del agregado grueso, Norma AASHTO T96 (ASTM C131),
- Porcentaje de caras fracturadas en los agregados, (ASTM D5821-95) Obtención del plástico (tamizado)
- Diseño del método Marshall para mezcla asfáltica y mezcla asfáltica con partículas plásticas, Norma ASTM 1559
- Preparación de briquetas
- Compactación de las briquetas asfálticas con botellas plásticas
- Ensayo de briquetas asfálticas con botellas plásticas
- Determinación del peso específico “bulk”,
- Ensayo de la estabilidad y flujo,
- Análisis de densidad y vacíos de las briquetas asfálticas con botellas plásticas (Ensayo RICE, Norma ASTM D2041)

### *Curvas de diseño de mezcla asfáltica modificada*

Análisis de resultados de la mezcla asfáltica modificada (AASHTO. LRFD, 2014).

El proceso consiste en la fabricación de briquetas utilizando una mezcla de agregados, asfalto caliente y materiales reciclados. Cada grupo de briquetas se preparará con distintos porcentajes de materiales reciclados para evaluar sus propiedades y comportamiento.

- Granulometría, Norma INEN 696:2011, áridos y análisis granulométricos en los análisis finos y gruesos.

La norma establece el método de ensayo para determinar la distribución granulométrica de las partículas en áridos finos y gruesos mediante tamizado. El ensayo de granulometría comienza con el cuarteo de las muestras a analizar, que luego se colocan en una serie de tamices dispuestos de la siguiente manera:  $\frac{3}{4}$ ”,  $\frac{1}{2}$ ”,  $\frac{3}{8}$ ”, N°4, N°8, N°50 y N°200, apilados en una torre sobre un pedestal vibratorio (tabla 3). Este procedimiento permite que las partículas se retengan o pasen a

través de cada tamiz de acuerdo con su tamaño. Este proceso corresponde a la franja de  $\frac{3}{4}$ " para mezclas asfálticas en planta, cumpliendo con las especificaciones de la MTOP.

Tabla 3.- Granulometría

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$	Nº4
1" (25,4 mm)	100	---	---	---
$\frac{3}{4}$	90-100	100	---	---
$\frac{1}{2}$	---	90-100	100	---
$\frac{3}{8}$	56-80	--	90-100	100
Nº4	35-65	44-74	55-85	80-100
Nº8	23-49	28-58	32-67	65-100
Nº16	---	--	---	40-80
Nº30	---	--	---	25-65
Nº50	5-19	5-21	7-23	7-40
Nº100	--	--	---	3-20
Nº200	2-8	2-10	2-10	2-10

**Fuente:** Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F2002.

### **Gravedad específica y absorción de agregados finos según la Norma ASTM C128 (INEN 856)**

La norma NTE INEN 856:2010 describe el procedimiento para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de los agregados finos. Este ensayo evalúa la gravedad específica y la capacidad de absorción de agua en los agregados finos, sumergiéndolos en agua durante 24 horas, logrando un estado de saturación superficialmente seca mediante el método del picnómetro.

Para realizar la prueba, las muestras se sumergen completamente en agua durante  $24 \pm 4$  horas. Una vez transcurrido el tiempo, se retiraron del agua y se colocaron en una superficie lisa. Luego, se aplica una corriente de aire caliente, frotando las partículas con las manos para asegurar un secado uniforme de la superficie.

A continuación, la muestra se coloca en un molde cónico, y se compacta con una varilla mediante golpes de forma homogénea para derrumbar la muestra en estado de saturación superficialmente seca (SSS). Este picnómetro, con la muestra y agua hasta la marca de aforo, se pesa en conjunto. Se agita el picnómetro para liberar posibles burbujas de aire atrapadas, se mide la temperatura de la mezcla y se permite un breve reposo. La muestra se retira del agua, se seca en horno durante  $24 \pm 4$  horas, y se realiza un último pesado para finalizar el ensayo.

Ecuación (Campagnoli *et al.*, 2019) Peso suelo seco (A):

$$W_s = (W_r + W_s) - W_r$$

De acuerdo a la siguiente ecuación:

Ecuación (Campagnoli *et al.*, 2019) Gravedad específica:

$$G_s = \frac{B * K}{A + C - D}$$

Ecuación (Aizaga, 1988).

Cálculo del porcentaje de absorción mediante la tabla 4:

Tabla 4.- Factor de corrección de constante K (temperatura)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,9999	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999
10	0,9997	0,9996	0,9995	0,9994	0,9993	0,9991	0,9990	0,9988	0,9986	0,9984
20	0,9982	0,9980	0,9978	0,9976	0,9973	0,9971	0,9968	0,9965	0,9963	0,9960
30	0,9957	0,9954	0,9951	0,9947	0,9944	0,9941	0,9937	0,9934	0,9930	0,9885
40	0,9922	0,9919	0,9915	0,9911	0,9907	0,9902	0,9898	0,9894	0,9890	0,9784
50	0,9881	0,9876	0,9872	0,9867	0,9811	0,9806	0,9800	0,9795	0,9789	0,9784
60	0,9832	0,9827	0,9822	0,9817	0,9811	0,9806	0,9800	0,9795	0,9731	0,9784
70	0,9778	0,9772	0,9772	0,9761	0,9755	0,9749	0,9743	0,9737	0,9731	0,9724
80	0,9718	0,9712	0,9712	0,9699	0,9693	0,9686	0,9680	0,9673	0,9667	0,9660
90	0,9653	0,9647	0,9647	0,9633	0,9633	0,961	0,9616	0,9605	0,9598	0,9591

Fuente: Norma ASTM C128



## **Variables de investigación**

### *Variables Independientes:*

Plástico reciclado utilizado en la mezcla de pavimento puede variar (PET, HDPE, PVC, etc.).

### *Variables Dependientes:*

Resistencia del pavimento (medida en términos de resistencia al desgaste y cargas pesadas).

Durabilidad del pavimento (evaluada mediante la vida útil del pavimento).

Costo de construcción (comparación de costos en relación con el uso de materiales tradicionales vs. plástico reciclado).

El Método Marshall para construir el pavimento debe ser constante para asegurar que cualquier cambio en las variables dependientes se debe a las variables independientes y no a diferencias en el método de construcción.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### **Datos obtenidos en los ensayos**

Para la producción y dosificación de las briquetas asfálticas destinadas al uso en pavimentos flexibles con plástico reciclado como alternativa ecológica, se utilizaron agregados provenientes de una cantera en la provincia de Manabí. Posteriormente, se realizaron los ensayos pertinentes según las normativas establecidas tanto para briquetas convencionales como para las modificadas con plástico reciclado, con el objetivo de obtener resultados que cumplan con las propiedades requeridas.

### **Origen de los Agregados Pétreos**

Los agregados pétreos fueron extraídos de una cantera localizada en la ciudad de Manta, provincia de Manabí, específicamente seleccionada para garantizar la calidad requerida en la fabricación de pavimentos flexibles. Estos materiales se destinaron a la producción de mezclas asfálticas diseñadas para las condiciones ambientales y estructurales de la región. La evaluación y caracterización de los agregados se llevó a cabo en un laboratorio especializado para asegurar el cumplimiento de los estándares técnicos.

### **Ensayos Iniciales**

#### *Granulometría*

El ensayo de granulometría se utilizó para analizar la distribución del tamaño de las partículas en los áridos finos y gruesos empleados en las mezclas asfálticas. Este procedimiento permite asegurar el cumplimiento de las especificaciones técnicas relacionadas con la distribución granulométrica, garantizando así un adecuado desempeño en la mezcla asfáltica modificada con plástico reciclado.

### **Combinación de los agregados.**

Luego de haber realizado un juego de granulometrías de los materiales: Se procedió a encontrar los porcentajes (%) con los cuales los agregados entraran en combinación con el asfalto. Con el fin de cumplir con la faja de especificaciones que encontramos en la tabla 405-5.1, que



consta en las Especificaciones Generales del MOP del año 2002 faja de (1/2"). De los juegos de granulometrías obtenidos, se obtuvieron los siguientes (%), para el diseño.

Tabla 5. Resultados obtenidos de granulometría

Agregados	Porcentajes
Árido #1	18%
Árido #2	32%
Árido #3	35%
Árido #4	15%

### Diseño del cálculo de método Marshall

Se presenta a continuación en el siguiente cuadro los resultados para la dosificación de los agregados, así como los parámetros resistentes y volumétricos de la mezcla de tanteo confeccionadas para: 5.00 – 5.50 – 6.00 – 6.50 – 7.00 % en peso de asfalto.

Tabla 6. Diseño del cálculo de método Marshall.

Tamiz Nº.	Abertura mm	P. Retenido Acumulado	Retenido %	Pasante %	Especif. %
1"	25.00	0.0	0.0	100.0	
3/4"	19.00	0.0	0.0	100.0	
1/2"	12.50	3108.0	59.3	40.7	
3/8"	9.50	4280.0	81.7	18.3	
Nº. 4	4.75	5182.0	98.9	1.1	
Nº. 8	2.36	5210.0	99.4	0.6	
Nº. 16	1.18	5214.0	99.5	0.5	
Nº. 30	0.600	5215.0	99.5	0.5	
Nº. 50	0.300	5217.0	99.5	0.5	
Nº. 100	0.150	5223.0	99.7	0.3	
Nº. 200	0.075	5234.0	99.9	0.1	
<b>TOTAL:</b>		5241.0			



Los resultados de la dosificación granulométrica de los agregados y los parámetros resistentes y volumétricos de las mezclas asfálticas confeccionadas con contenidos de asfalto entre 5.00% y 7.00% en peso reflejan que los tamices de mayor tamaño (1" y 3/4") no retienen material, permitiendo el paso del 100%, mientras que a partir del tamiz de 1/2" (12.50 mm) se acumula un 59.3% de material retenido, indicando que más de la mitad del agregado tiene un tamaño igual o superior a este diámetro. En los tamices menores, como el N°. 4 (4.75 mm) y el N°. 8 (2.36 mm), los valores acumulados alcanzan el 98.9% y el 99.4%, respectivamente, lo que asegura la presencia mínima de finos.

Finalmente, en el tamiz N°. 200 (0.075 mm), solo un 0.1% del material pasa, garantizando así una mezcla con bajo contenido de finos, lo cual es fundamental para evitar problemas de estabilidad o exceso de plasticidad. En general, los resultados cumplen con las especificaciones necesarias para una mezcla bien graduada, asegurando una adecuada compactación, resistencia estructural y durabilidad del pavimento.

Tabla 7. Árido #2 (Triturado Pasa Tamiz 1/2").

Tamiz N°.	Abertura mm	P. Retenido Acumulado	Retenido %	Pasante %	Especif. %
1"	25.00	0.0	0.0	100.0	
3/4"	19.00	0.0	0.0	100.0	
1/2"	12.50	0.0	0.0	100.0	
3/8"	9.50	0.6	0.2	99.8	
N°. 4	4.75	1316.0	53.8	46.2	
N°. 8	2.36	2144.0	87.7	12.3	
N°. 16	1.18	2311.0	94.6	5.4	
N°. 30	0.600	2362.0	96.6	3.4	
N°. 50	0.300	2383.0	97.5	2.5	
N°. 100	0.150	2399.0	98.2	1.8	
N°. 200	0.075	2418.0	98.9	1.1	
	TOTAL:	2444.0			

La Tabla 7 presenta los resultados de la granulometría del árido #2, un material triturado que pasa completamente por el tamiz de 1/2" (12.50 mm), confirmando que todos los tamaños superiores tienen un porcentaje de pasante del 100%. A partir del tamiz de 3/8" (9.50 mm), se observa un 99.8% de material pasante, evidenciando que solo una fracción muy pequeña del material se retiene en tamices de mayor tamaño. La mayor retención acumulada ocurre en el tamiz N°. 4 (4.75 mm), donde se retiene un 53.8% del material, dejando un 46.2% de pasante. En los tamices más finos, como el N°. 8 (2.36 mm) y el N°. 16 (1.18 mm), los valores de pasante son del 12.3% y 5.4%, respectivamente, lo que refleja una disminución progresiva en el tamaño de las partículas.

Finalmente, en el tamiz N°. 200 (0.075 mm), solo un 1.1% del material pasa, lo que asegura un bajo contenido de finos. Estos resultados son indicativos de un árido bien triturado y clasificado, cumpliendo con las especificaciones requeridas para su uso en mezclas asfálticas, ya que proporciona una adecuada distribución granulométrica para garantizar la estabilidad y resistencia del pavimento.

Tabla 8. Árido #3 (Cisco).

Tamiz N°.	Abertura mm	P. Retenido Acumulado	Retenido %	Pasante %	Especif. %
1"	25.00	0.0	0.0	100.0	
3/4"	19.00	0.0	0.0	100.0	
1/2"	12.50	0.0	0.0	100.0	
3/8"	9.50	0.0	0.0	100.0	
N°. 4	4.75	50.0	7.1	92.9	
N°. 8	2.36	224.0	32.0	68.0	
N°. 16	1.18	347.0	49.6	50.4	
N°. 30	0.600	443.0	63.3	36.7	
N°. 50	0.300	523.0	74.7	25.3	
N°. 100	0.150	586.0	83.7	16.3	
N°. 200	0.075	615.0	87.9	12.1	
TOTAL:		700.0			

Los resultados del análisis granulométrico en la tabla 8 para el árido #3 (Cisco) muestran que la totalidad del material pasa por los tamices de mayor tamaño, hasta el tamiz de 3/8" (9.50 mm), lo que indica que este árido está compuesto por partículas más finas. A partir del tamiz N°. 4 (4.75 mm), se retiene un 7.1% del material, dejando un 92.9% de pasante. En los tamices intermedios, como el N°. 8 (2.36 mm) y el N°. 16 (1.18 mm), los porcentajes de pasante disminuyen progresivamente a 68.0% y 50.4%, respectivamente, mostrando una distribución significativa de partículas en este rango.

En los tamices más finos, como el N°. 30 (0.600 mm) y el N°. 50 (0.300 mm), los porcentajes de pasante continúan disminuyendo a 36.7% y 25.3%, respectivamente, lo que indica una mayor retención de partículas más pequeñas. Finalmente, en el tamiz N°. 200 (0.075 mm), solo el 12.1% del material pasa, lo que denota un contenido considerable de partículas finas.

Esta distribución granulométrica refleja un material predominantemente fino, adecuado para su uso en mezclas asfálticas donde se requiere un aporte de finos para mejorar la cohesión y estabilidad de la mezcla. Además, el árido #3 cumple con las especificaciones granulométricas necesarias para garantizar un comportamiento óptimo en la estructura del pavimento.

Tabla 9. Árido #4 (Arena Natural).

Tamiz N°.	Abertura mm	P. Retenido Acumulado	Retenido %	Pasante %	Especif. %
1"	25.00	0.0	0.0	100.0	
3/4"	19.00	0.0	0.0	100.0	
1/2"	12.50	0.0	0.0	100.0	
3/8"	9.50	0.0	0.0	100.0	
N°. 4	4.75	0.0	0.0	100.0	
N°. 8	2.36	0.0	0.0	100.0	
N°. 16	1.18	1.0	0.1	99.9	
N°. 30	0.600	3.0	0.4	99.6	
N°. 50	0.300	329.0	47.0	53.0	
N°. 100	0.150	659.0	94.1	5.9	
N°. 200	0.075	694.0	99.1	0.9	



---

TOTAL: 700.0

---

Los resultados del análisis granulométrico para el árido #4 (Arena Natural) muestran que el material pasa completamente por los tamices de mayor tamaño, desde el tamiz de 1" (25.00 mm) hasta el tamiz N°. 8 (2.36 mm), indicando que está compuesto por partículas finas, características de una arena natural. A partir del tamiz N°. 16 (1.18 mm), comienza una mínima retención, con un 0.1% retenido y un 99.9% de pasante, lo que confirma que la mayoría del material tiene un tamaño menor.

En el tamiz N°. 50 (0.300 mm), el porcentaje de retenido aumenta significativamente al 47%, dejando un 53% de pasante. Este comportamiento se acentúa en los tamices más finos, como el N°. 100 (0.150 mm), donde se retiene el 94.1% del material, y en el tamiz N°. 200 (0.075 mm), donde el porcentaje acumulado retenido alcanza el 99.1%, con solo un 0.9% de pasante. Esta distribución granulométrica indica que el árido #4 tiene un alto contenido de partículas muy finas, lo que lo hace adecuado para su uso en mezclas donde se requiere un aporte de material fino para mejorar la trabajabilidad y cohesión. Además, el cumplimiento de las especificaciones técnicas asegura que la arena natural es apta para aplicaciones en mezclas asfálticas o de concreto, dependiendo de los requisitos del proyecto.

### Graduación combinada para la mezcla

Tabla 10. Granulometrías de los agregados a utilizar en la mezcla.

% que pasan en las granulometrías de los agregados a utilizar en la mezcla.					
Tamiz N°.	Abertura mm	1/2" Árido # 1	3/8" Árido # 2	Cisco Árido # 3	Arena Árido # 4
3/4"	19.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	12.50	40.70	100.00	100.00	100.00
3/8"	9.50	18.34	99.80	100.00	100.00
N°. 4	4.75	1.13	46.15	92.86	100.00
N°. 8	2.36	0.59	12.27	68.00	100.00

Nº. 16	1.18	0.52	5.44	50.43	99.86
Nº. 30	0.600	0.50	3.36	36.71	99.57
Nº. 50	0.300	0.46	2.50	25.29	53.00
Nº. 100	0.150	0.34	1.84	16.29	5.86
Nº. 200	0.075	0.13	1.06	12.14	0.86

Se lavaron los agregados para los ensayos.

La tabla 10 presenta las granulometrías de los agregados utilizados en la mezcla, mostrando el porcentaje que pasa por cada tamiz en los diferentes áridos: Árido #1 (Triturado pasa tamiz 1/2"), Árido #2 (Triturado pasa tamiz 3/8"), Cisco Árido #3 y Arena Árido #4. En general, todos los áridos presentan un 100% de material pasante en los tamices de mayor tamaño (3/4" y 1/2"), lo que indica la ausencia de partículas grandes. Conforme disminuye el tamaño del tamiz, se observa que los porcentajes de pasante varían según las características granulométricas de cada árido. El Árido #1 posee una granulometría más gruesa, con un 18.34% de pasante en el tamiz de 3/8" y valores decrecientes hasta alcanzar un 0.13% en el tamiz N° 200. Por su parte, el Árido #2 muestra una granulometría más uniforme, con un 99.80% de pasante en el tamiz de 3/8" y un 1.06% en el tamiz N° 200.

El Cisco Árido #3 contiene una mayor proporción de partículas finas, con un 68.00% de pasante en el tamiz N° 8 y un 12.14% en el tamiz N° 200. Finalmente, la Arena Árido #4 es el más fino de todos, presentando un 99.86% de pasante en el tamiz N° 16 y un 0.86% en el tamiz N° 200. Todos los agregados fueron lavados previamente para garantizar la precisión de los ensayos, eliminando impurezas que podrían alterar los resultados. Esta información es crucial para diseñar mezclas que cumplan con los requisitos técnicos, asegurando una adecuada proporción y homogeneidad en la composición final.

Tabla 11. Graduación Combinada para Mezcla de Prueba

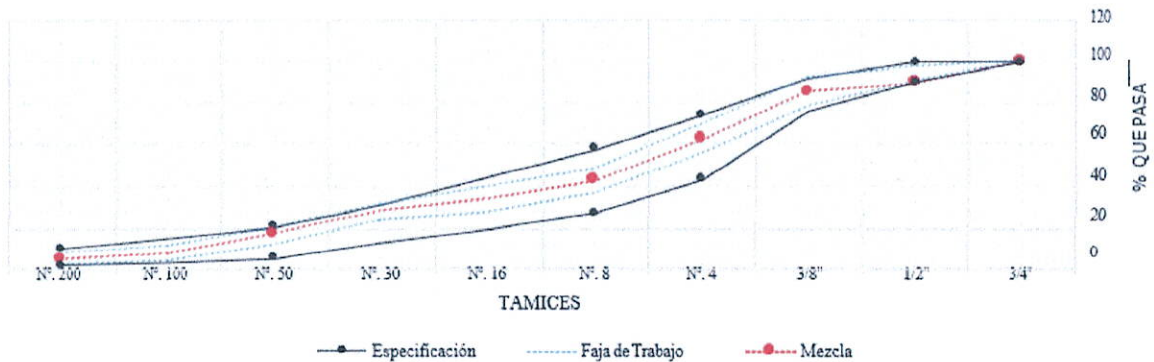
Agregados	%	Graduación Combinada para Mezcla de Prueba										
		Mezcla	3/4"	1/2"	3/8"	Nº. 4	Nº. 8	Nº. 16	Nº. 30	Nº. 50	Nº. 100	Nº. 200
Arido #1	18.0	18.0	7.3	3.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
Arido #2	32.0	32.0	32.0	31.9	14.8	3.9	1.7	1.1	0.8	0.6	0.3	
Arido #3	35.0	35.0	35.0	35.0	32.5	23.8	17.7	12.8	8.9	5.7	4.2	
Arido #4	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	14.9	8.0	0.9	0.1	

Total:	100.0	100.0	89.3	85.2	62.5	42.8	34.5	28.9	17.7	7.2	4.7
Deseadas (%)		100	95		59	43			13		6

La tabla 11 presenta los resultados de la graduación combinada de agregados para una mezcla de prueba, mostrando la distribución granulométrica a través de diferentes tamaños de tamiz. Los valores obtenidos se comparan con los límites superiores e inferiores establecidos, y en general, la mezcla parece ajustarse a estos parámetros, asegurando el cumplimiento de las especificaciones técnicas.

Los tamaños mayores, como 3/4" y 1/2", cumplen con los valores deseados, garantizando la resistencia estructural de la mezcla, mientras que los tamaños más finos (N°. 100 y N°. 200) presentan bajos porcentajes, lo cual es ideal para evitar problemas de estabilidad en pavimentos flexibles. Además, las desviaciones observadas se encuentran dentro de las tolerancias permitidas, lo que sugiere que la mezcla es adecuada desde un punto de vista granulométrico. Sin embargo, se recomienda realizar ensayos complementarios, como estabilidad, densidad y absorción, para confirmar las propiedades físico-mecánicas y garantizar el desempeño óptimo en la aplicación práctica del pavimento.

COMBINACIÓN DE AGREGADOS





### Análisis Volumétrico

Tabla 12. Gravedad específica árido #1 (triturado pasa tamiz 3/4"), agregado grueso, material que pasa el tamiz 3/4" y retiene en el tamiz #4

<b>Materiales agregados</b>		
A: Peso en el Aire de la Muestra Secada al Horno:	4880.8	gr
B: Peso en el Aire de la Muestra Saturada:	5000.0	gr.
C: Peso en el Agua de la Muestra Saturada:	3159.5	gr.
Gravedad Específica de la Masa:	2.652	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad Específica S.S.S.	2.717	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad Específica Aparente	2.836	gr/cm <sup>3</sup>
% De Absorción	2.44	%

El análisis volumétrico realizado sobre el Árido #1 (triturado que pasa por el tamiz 3/4" y se retiene en el tamiz #4) muestra los resultados obtenidos en la Tabla 12. El peso en el aire de la muestra secada al horno fue de 4880.8 gramos, mientras que el peso en el aire de la muestra saturada alcanzó los 5000.0 gramos. Por otro lado, el peso en el agua de la muestra saturada fue de 3159.5 gramos.

La gravedad específica de la masa resultó ser de 2.652 gr/cm<sup>3</sup>, mientras que la gravedad específica en estado saturado superficie seca (S.S.S.) fue de 2.717 gr/cm<sup>3</sup>. La gravedad específica aparente fue ligeramente mayor, con un valor de 2.836 gr/cm<sup>3</sup>. Finalmente, el porcentaje de absorción se calculó en un 2.44%. Estos datos son fundamentales para evaluar las propiedades físicas del material, que influyen directamente en la calidad y comportamiento de la mezcla en aplicaciones constructivas.

Tabla 13. Gravedad específica, árido #2 (triturado pasa tamiz 1/2").

<b>Agregado Grueso, material que Pasa el Tamiz 1/2" y Retiene en el tamiz #4</b>		
A: Peso en el Aire de la Muestra Secada al Horno:	<u>1906.2</u>	gr
B: Peso en el Aire de la Muestra Saturada:	<u>2000.0</u>	gr.
C: Peso en el Agua de la Muestra Saturada:	<u>1225.3</u>	gr.

Gravedad Especifica de la Masa:	2.461	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad Especifica S.S.S.	2.582	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad Especifica Aparente	2.800	gr/cm <sup>3</sup>
% De Absorción	4.92	%

El análisis de las propiedades físicas del árido #2 (triturado, pasa tamiz 1/2") revela información clave sobre su comportamiento en condiciones de saturación y secado. La muestra, al ser secada al horno, tiene un peso de 1906.2 g, mientras que su peso en el aire saturado es de 2000.0 g, lo que indica la cantidad de agua que el material puede retener en sus poros. Además, al sumergir la muestra en agua, su peso disminuye a 1225.3 g, lo que permite calcular una gravedad específica de la masa de 2.461 g/cm<sup>3</sup>, lo que sugiere que el material es más pesado que el agua, pero no excesivamente denso.

La gravedad específica S.S.S. es de 2.582 g/cm<sup>3</sup>, lo que refleja el comportamiento del agregado cuando está saturado, pero con el agua superficialmente eliminada. Por otro lado, la gravedad específica aparente alcanza los 2.800 g/cm<sup>3</sup>, un valor mayor que indica que el material tiene poros vacíos. Finalmente, el porcentaje de absorción del 4.92% señala que el árido puede retener una cantidad significativa de agua, lo cual es un factor importante a considerar en la preparación de mezclas de concreto, ya que puede afectar la cantidad de agua disponible en la mezcla y, por ende, la resistencia del concreto.

Tabla 14. Gravedad específica, árido #3 (cisco), agregado fino, material que pasa el tamiz #4 y retiene en el tamiz #200

Gravedad específica, árido #3 (cisco)		
A: Peso en el Aire de la Muestra Secada al Horno:	478.0	gr.
V: Volumen de la Probeta:	500.0	gr.
w: Peso en gr. o volumen ml. del Agua Añadida:	307.3	gr.
Gravedad Especifica de la Masa:	2.481	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad Especifica S.S.S.	2.595	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad Especifica Aparente	2.800	gr/cm <sup>3</sup>
% De Absorción	4.60	%



El análisis de las propiedades físicas del árido #3 (cisco), un agregado fino que pasa el tamiz #4 y retiene en el tamiz #200, se basa en varios parámetros obtenidos a través de experimentos de pesaje y medición de volumen. La muestra secada al horno tiene un peso de 478.0 g, lo que representa la masa del material sin humedad. El volumen de la probeta utilizada para la medición es 500.0 ml, y el peso del agua añadida para saturar la muestra es 307.3 g, lo que indica la cantidad de agua absorbida por el material.

A partir de estos valores, se obtiene una gravedad específica de la masa de 2.481 g/cm<sup>3</sup>, lo que sugiere que el material es más denso que el agua, pero relativamente liviano en comparación con otros materiales de construcción. La gravedad específica S.S.S. de 2.595 g/cm<sup>3</sup> muestra el comportamiento del material cuando está saturado con agua, pero con el agua superficialmente eliminada. La gravedad específica aparente, que es de 2.800 g/cm<sup>3</sup>, refleja la densidad total del material, incluyendo los vacíos internos. Finalmente, el porcentaje de absorción es del 4.60%, lo que indica que el material tiene una capacidad moderada de retener agua.

Este valor es relevante para la preparación de mezclas de concreto, ya que el agua absorbida por el agregado puede influir en la cantidad de agua disponible en la mezcla, afectando la hidratación del cemento y la resistencia final del concreto. En conjunto, estos resultados proporcionan una evaluación completa de las características físicas del cisco y su idoneidad para ser utilizado en la construcción, especialmente en aplicaciones que requieran agregados finos.

Tabla 15. Análisis volumétrico, gravedad específica, árido #4 (arena natural).

<b>Agregado Fino, Material que Pasa el Tamiz #4 y Retiene en el tamiz #200</b>		
A: Peso en el Aire de la Muestra Secada al Horno:	497.0	gr.
V: Volumen de la Probeta:	500.0	gr.
w: Peso en gr. o volumen ml. del Agua Añadida:	314.6	gr.
Gravedad Especifica de la Masa:	2.681	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad Especifica S.S.S.	2.697	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad Especifica Aparente	2.725	gr/cm <sup>3</sup>
% De Absorción	0.60	%



El análisis volumétrico del árido #4 (arena natural), un agregado fino que pasa el tamiz #4 y retiene en el tamiz #200, proporciona información clave sobre sus propiedades físicas. El peso de la muestra secada al horno es de 497.0 g, lo que indica su masa sin humedad. Para medir la cantidad de agua absorbida, se utilizó una probeta con un volumen de 500.0 ml, y se añadió 314.6 g de agua, lo que refleja la capacidad de absorción del material. Con estos datos, se calcula una gravedad específica de la masa de 2.681 g/cm<sup>3</sup>, lo que significa que el material tiene una densidad mayor que el agua, pero no tan alta como otros agregados más gruesos.

La gravedad específica S.S.S. es de 2.697 g/cm<sup>3</sup>, lo que indica cómo se comporta el material cuando está completamente saturado con agua, pero con el agua superficialmente eliminada. La gravedad específica aparente de 2.725 g/cm<sup>3</sup> muestra la densidad total del agregado, considerando tanto los sólidos como los poros vacíos. Finalmente, el porcentaje de absorción es 0.60%, lo que sugiere que el material tiene una capacidad muy baja para absorber agua.

Este valor es importante en la preparación de mezclas de concreto, ya que una absorción baja implica que el agregado no interferirá significativamente en la cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento, lo que puede ayudar a obtener una mezcla con la proporción adecuada de agua y garantizar una buena resistencia del concreto. En conjunto, estos resultados muestran que la arena natural tiene características adecuadas para ser utilizada en la fabricación de concreto, especialmente en mezclas que requieren agregados finos con baja absorción.

### Gravedades específicas

Tabla 16. Gravedad específica de los agregados

Agregados para la Mezcla	Árido #1	Árido #2	Árido #3	Árido #4
Gravedad Especifica de la Masa:	2.652	2.461	2.481	2.681
Gravedad Especifica S.S.S.	2.717	2.582	2.595	2.697
Gravedad Especifica Aparente	2.836	2.800	2.800	2.725
% De Absorción	2.44	4.92	4.60	0.60

### Gravedad específica Bulk de la mezcla de agregados

### Gravedad específica bulk de la mezcla de agregados

$$G_{sb} = 100 \times (18.0 \cdot 2.652 + 32.0 \cdot 2.461 + 35.0 \cdot 2.481 + 15.0 \cdot 2.681) = 2.532$$

### % De absorción de la mezcla de agregados

$$\%A = 100 / (18.0 \cdot 2.44 + 32.0 \cdot 4.92 + 35.0 \cdot 4.60 + 15.0 \cdot 0.60) = 2.16$$

### Asfalto

El peso específico según ensayo AASHTO T - 228 es: 1.015

### Análisis granulométrico

Tabla 17. Gravedad Especifica Teórica Máxima Gmm (RICE), árido #1-Arido #2-Arido #3-Arido #4.

Muestra	Asfalto %	Peso Material Gr.	del Peso Picnometro Agua Gr.	Peso + Picnometro Agua + Material Gr.	+ Gmm (Rice) Gr/Cm <sup>3</sup>
1	5.0	1500.0	7321.0	8210.5	2.457
2	5.5	1500.0	7321.0	8205.7	2.438
3	6.0	1500.0	7321.0	8201.0	2.419
4	6.5	1500.0	7321.0	8195.4	2.398
5	7.0	1500.0	7321.0	8189.9	2.377

A medida que aumenta el porcentaje de asfalto en las muestras, se observa una disminución en la gravedad específica teórica máxima (Gmm), lo que sugiere que el asfalto, al ser menos denso que los áridos utilizados, reduce la densidad global de la mezcla. Los valores de Gmm varían entre 2.457 g/cm<sup>3</sup> para la muestra con 5.0% de asfalto y 2.377 g/cm<sup>3</sup> para la muestra con 7.0% de asfalto, lo que refleja una tendencia de reducción conforme incrementa el contenido de asfalto. Esta disminución de la Gmm indica una mayor porosidad en la mezcla, lo que podría afectar la durabilidad y resistencia del material, especialmente en aplicaciones de pavimentos. Por lo tanto,

es crucial controlar el porcentaje de asfalto en la mezcla para asegurar que las propiedades del material sean adecuadas para su desempeño en condiciones de tráfico y clima.

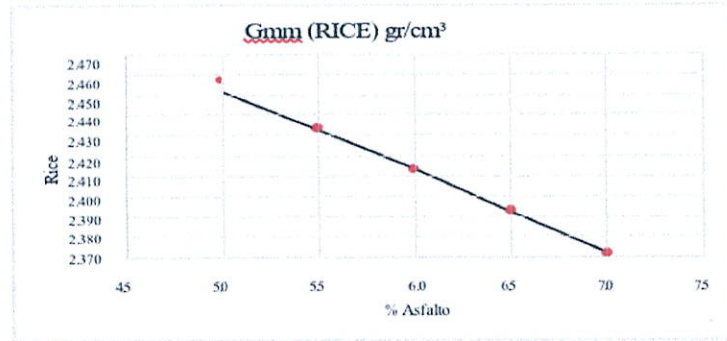




Tabla 18. Comprobación del diseño de asfalto por el método Marshall

Muestra	Material	% Dosf.	Dof. Real	P.E. Bulk Agregados (Gsb)	PESO MUESTRA			Volumen ccc	DENSIDAD		% ENVOLMEN		Asfalto Efectivo Pbe	Factor de corrección	ESTABILIDAD Ib.		FLUJO (mm)
					PESO AIRE	PESO S.S.S	PESO AGUA		Probeta BULK (Gmb)	Gmm	AGREG.	VACIOS			C.A	DIAL	
1	Arido #1	18.00	17.10		1111.1	1112.7	613.7	499.0	2.227				1.04	3.003	3.123	11	
2	Arido #2	32.00	30.40		1112.7	1114.5	619.2	495.3	2.247			1.09	2.879	3.138	10		
3	Arido #3	35.00	33.25		1116.0	1117.9	618.7	499.2	2.236			1.04	3.013	3.134	10		
4	Arido #4	15.00	14.25														
	%CA	5.00	5.00	<b>2.532</b>													
	total	105.00	100						<b>2.236</b>	<b>2.457</b>	<b>83.93</b>	<b>8.97</b>	<b>7.11</b>		<b>3.132</b>	<b>10</b>	

Muestra	Material	% Dosf.	Dof. Real	P.E. Bulk Agregados (Gsb)	PESO MUESTRA			Volumen ccc	DENSIDAD		% ENVOLMEN		Asfalto Efectivo Pbe	Factor de corrección	ESTABILIDAD		FLUJO (mm)
					PESO AIRE	PESO S.S.S	PESO AGUA		Probeta BULK (Gmb)	Gmm	AGREG.	VACIOS			C.A	DIAL (KN)	
1	Arido #1	18.00	17.01		1126.1	1127.4	625.9	501.3	2.245				1.04	3.241	3.371	11	
2	Arido #2	32.00	30.24		1109.8	1111.0	618.9	492.1	2.255			1.09	3.032	3.305	11		
3	Arido #3	35.00	33.08		1126.7	1129.2	629.5	499.7	2.255			1.04	3.051	3.173	10		
4	Arido #4	15.00	14.18														
	%CA	5.50	5.50	<b>2.532</b>													
	total	105.50	100						<b>2.252</b>	<b>2.438</b>	<b>84.05</b>	<b>7.64</b>	<b>8.32</b>		<b>3.283</b>	<b>11</b>	

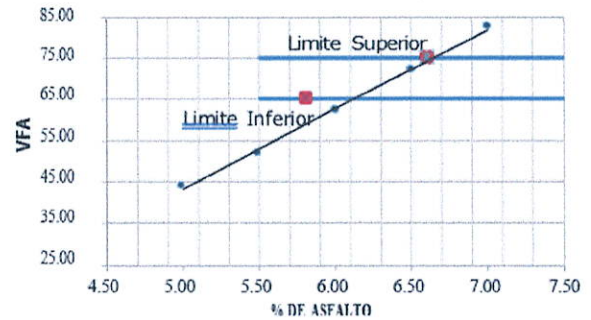
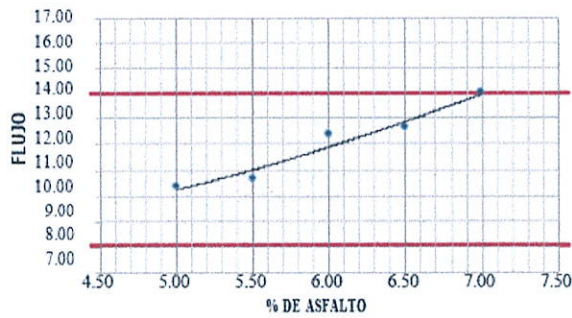
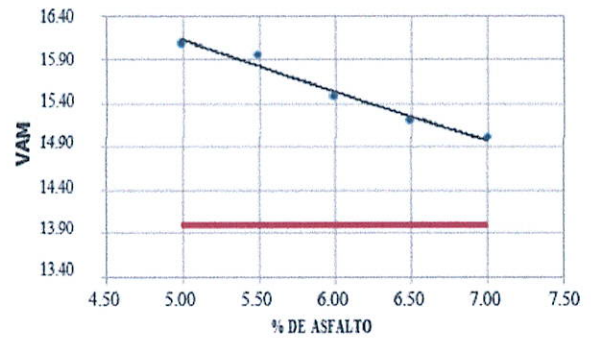
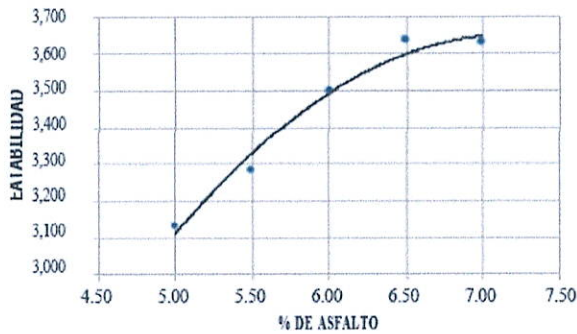
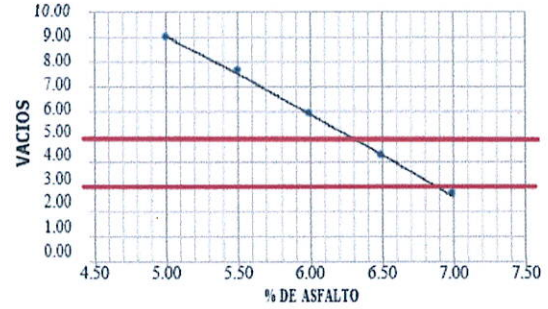
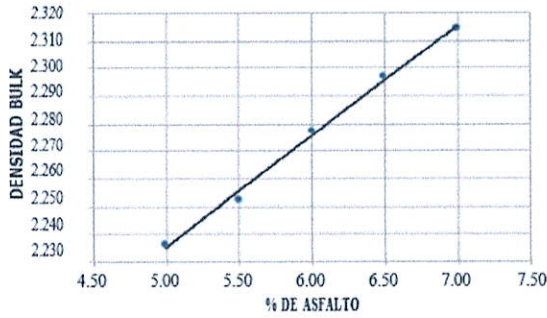
Muestra	Material	% Dosf.	Dof. Real	P.E. Bulk Agregados (Gsb)	PESO MUESTRA			Volumen ccc	DENSIDAD		% ENVOLMEN			Asfalto Efectivo Pbe	Factor de corrección	ESTABILIDAD		FLUJO (mm)
					PESO AIRE	PESO S.S.S	PESO AGUA		Probeta BULK (Gmb)	Gmm	AGREG.	VACIOS	C.A			DIAL (KN)	CORREG. (Lbf)	
1	Arido #1	18.00	16.92		1136.4	1137.2	637.8	499.4	2.276					1.04	3.432	3.569	12	
2	Arido #2	32.00	30.08		1151.4	1152.7	647.2	505.5	2.278				1.04	3.337	3.470	12		
3	Arido #3	35.00	32.90		1142.6	1144.1	642.3	501.8	2.277				1.04	3.318	3.451	13		
4	Arido #4	15.00	14.10															
	%CA	6.00	6.00	<b>2.532</b>														
	total	106.00	100						<b>2.277</b>	<b>2.419</b>	<b>84.53</b>	<b>5.89</b>	<b>9.57</b>		<b>3.497</b>	<b>12</b>		



Muestra	Material	% Dosf.	Dosf. Real	P.E. Bulk Agregados (Gsb)	PESO MUESTRA			Volume nccc	DENSIDAD			% EN VOLUMEN			Asfalto Efectivo Pbc	Factor de corrección	ESTABILIDAD		FLUJO 0.00
					PESO AIRE	PESO S.S.S.	PESO AGUA		Probeta BULK (Gmb)	Gmm	AGREG.	VACIOS	CA	DIAL (KN)			CORR. EG. (Lb)		
1	Arido #1	18.00	16.83		1157.5	1158.6	655.2	503.4	2.299					1.04	3.347	3.689	14		
2	Arido #2	32.00	29.92		1136.7	1137.5	642.4	495.1	2.296					1.09	3.337	3.637	12		
3	Arido #3	35.00	32.73		1128.2	1129.4	637.8	491.6	2.295					1.09	3.28	3.575	12		
4	Arido #4	15.00	14.03																
	%CA	6.50	6.50	2.532															
	total	106.50	100						2.297	2.398	84.82	4.21	10.97		15.18	72.26	4.85	3.634	13

Muestra	Material	% Dosf.	Dosf. Real	P.E. Bulk Agregados (Gsb)	PESO MUESTRA			Volume nccc	DENSIDAD			% EN VOLUMEN			Asfalto Efectivo Pbc	Factor de corrección	ESTABILIDAD		FLUJO 0.00
					PESO AIRE	PESO S.S.S.	PESO AGUA		Probeta BULK (Gmb)	Gmm	AGREG.	VACIOS	CA	DIAL (KN)			CORREG. (Lb)		
1	Arido #1	18.00	16.74		1141.6	1142.1	649.1	493.0	2.316					1.09	3.328	3.846	14		
2	Arido #2	32.00	29.76		1139.5	1140.4	648.3	492.1	2.316					1.09	3.241	3.533	14		
3	Arido #3	35.00	32.55		1144.8	1145.7	650.3	495.4	2.311					1.09	3.213	3.502	14		
4	Arido #4	15.00	13.95																
	%CA	7.00	7.00	2.532															
	total	107.00	100						2.314	2.377	85.00	2.64	12.36		82.39	15.00	5.42	3.627	14





Una vez determinado los ensayos de densidad para la mezcla asfáltica suelta ( $G_{mm}$ ) y compactada ( $G_{mb}$ ) para las probetas elaboradas con la metodología MARSHALL, se tiene toda la información necesaria para determinar los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica, y obtener el contenido óptimo de Asfalto.



Tabla 18. Determinado los ensayos de densidad para la mezcla asfáltica suelta (Gmm) y compactada (Gmb)

Óptimo de Asfalto (%)	6.60	Especificaciones
Estabilidad	3611	> 1800 (Lb)
Flujo	13.1	8 - 14 (0.01")
Vacíos	3.9	3 - 5 (%)
VMA	15.2	> 14 (%)
VFA	74.2	65 - 75 (%)

Los resultados de los ensayos de densidad para la mezcla asfáltica suelta (Gmm) y compactada (Gmb) muestran que la mezcla cumple con las especificaciones requeridas para garantizar su durabilidad y rendimiento. Con un óptimo de asfalto del 6.60%, la mezcla presenta una estabilidad de 3611 lb, lo que supera ampliamente el mínimo de 1800 lb, indicando una alta resistencia a la deformación bajo carga. El flujo de 13.1 0.01" se encuentra dentro del rango especificado de 8 - 14 0.01", lo que asegura que la mezcla tiene una deformación adecuada bajo esfuerzo. Los vacíos en la mezcla son del 3.9%, dentro del rango recomendado de 3 - 5%, lo que garantiza una buena compactación y resistencia.

Además, el volumen de vacíos en la mezcla asfáltica (VMA) es del 15.2%, por encima del mínimo de 14%, lo que favorece una adecuada circulación de aire y drenaje. Finalmente, el volumen de vacíos en los agregados (VFA) alcanza el 74.2%, cumpliendo con el rango de 65 - 75%, lo que asegura un equilibrio entre la densidad y la porosidad de la mezcla. En conjunto, estos resultados reflejan una mezcla asfáltica de excelente calidad, adecuada para soportar condiciones de tráfico y ambientales exigentes.

#### Gravedad Especifica Efectiva

#### Gravedad específica efectiva

$$G_{sc} = ((100 - 6.6)) + ((100 / 2.394) + (6.6 \times 1.015)) = 2.648$$

#### % Absorción de asfalto (pba)

$$P_{ba} = 100 \times (2.648 - 2.532) / (2.648 \times 2.532) \times 1.015 = 1.76\%$$

### Comprobación

$$G_{sb} = 2.532 \quad G_{se} = 2.648 \quad G_{sa} = 2.795$$

La gravedad específica efectiva ( $G_{se}$ ) se calcula utilizando una fórmula que tiene en cuenta el contenido de asfalto en la mezcla. En este caso, con un contenido de asfalto del 6.6%, el valor de  $G_{se}$  se obtiene como 2.648. Para determinar el porcentaje de absorción de asfalto ( $P_{ba}$ ), se utiliza la fórmula que compara la diferencia entre la gravedad específica efectiva ( $G_{se}$ ) y la gravedad específica aparente ( $G_{sb}$ ), y se multiplica por un factor de corrección.

El resultado obtenido es un 1.76% de absorción de asfalto, lo que indica la cantidad de asfalto que la mezcla es capaz de retener. Finalmente, los valores de gravedad específica obtenidos son:  $G_{sb} = 2.532$ ,  $G_{se} = 2.648$  y  $G_{sa} = 2.795$ , lo que refleja las propiedades de la mezcla asfáltica en cuanto a su densidad y capacidad de absorción. Estos cálculos son fundamentales para entender el comportamiento de la mezcla asfáltica, ya que la absorción de asfalto influye en la adherencia, durabilidad y rendimiento del material en condiciones de tráfico y clima.

Tabla 19. Contenido óptimo de asfalto

Propiedades	Valor Obtenido	Exigencias
Estabilidad	3611 lbs	>1800
Flujo	13.1 /0.01"	8 - 14 /0.01"
Vacios en mezcla	3.9%	3.0 – 5.0 %
Vacios en agregados	15.2%	>14 %
Vacios rellenos	74.2%	65 – 75 %

Por lo anterior, el contenido óptimo de asfalto es de 6.6%. La tolerancia recogida en las especificaciones del MOP 001-F 2002 para el contenido de asfalto es de +/- 0.3%. El diseño desarrollado con asfalto AC-20, producido en Manta, el contenido óptimo de asfalto es de 7.25% para la dosificación de agregados utilizada

Tabla 20. Diseño desarrollado con asfalto AC-20

Agregados	Porcentajes
Árido #1	18%

Árido #2	32%
Árido #3	35%
Árido #4	15%

La mezcla de los agregados y el cemento asfáltico en planta y la compactación en obra debe tener las siguientes temperaturas.

Tabla 21. Mezcla de los agregados y el cemento asfáltico

Al salir de Planta	160 C°
Mezcla entregada en Vía	> 135 C°
Temperatura de Compactación	130 C° - 135 C°

Los resultados obtenidos en este estudio muestran una clara tendencia a que a medida que aumenta el porcentaje de asfalto, el peso específico teórico máximo (Gmm) disminuye. Las muestras analizadas indicaron esta tendencia pasando de 2,457 g/cm<sup>3</sup> (con 5% de asfalto) a 2,377 g/cm<sup>3</sup> (con 7% de asfalto). Esto está en línea con la tendencia descrita por Tito y Savino (2020) donde al aumentar el porcentaje de asfalto se reduce la densidad de la mezcla debido a que la densidad del ligante es considerablemente menor que la de los agregados; por lo tanto, las mezclas tendrán menor masa y volumen, por lo que el peso específico disminuirá.

Los valores obtenidos para el Gmm en este estudio (2,457 g/cm<sup>3</sup> a 2,377 g/cm<sup>3</sup>) concuerdan con los resultados obtenidos por Martín et al. (2020) para sus mezclas, que mostraron una tendencia similar en valores decrecientes con el porcentaje de asfalto en la mezcla. Sin embargo, es importante destacar que en este estudio la disminución fue progresiva, con una reducción de 0,08 g/cm<sup>3</sup> entre la muestra 1 (5% asfalto) y la muestra 5 (7% asfalto), sugiriendo una relación casi lineal entre el contenido de asfalto y Gmm.

Por el contrario, los resultados obtenidos en este estudio muestran una ligera variación con los datos reportados por Rutter y Quine (1994), quienes observaron que Gmm se reduciría aún más en mezclas de mayores contenidos de asfalto debido a la interacción que tendría con los agregados. En el presente caso, aunque la tendencia es en realidad la misma, la disminución observada no es



tan marcada como debería ser según estos trabajadores. La razón de esto podría ser que su morfología tiene mayor angularidad en comparación con la utilizada.

Sin embargo, es importante destacar que en este estudio la disminución fue progresiva, con una reducción de  $0,08 \text{ g/cm}^3$  entre la muestra 1 (5% asfalto) y la muestra 5 (7% asfalto), sugiriendo una relación casi lineal entre el contenido de asfalto y Gmm. Por el contrario, los resultados obtenidos en este estudio muestran una ligera variación con los datos reportados por Rutter y Quine (1994), quienes observaron que Gmm se reduciría aún más en mezclas de mayores contenidos de asfalto debido a la interacción que tendría con los agregados. En el presente caso, aunque la tendencia es en realidad la misma, la disminución observada no es tan marcada como debería ser según estos trabajadores. La razón de esto podría ser que su morfología tiene mayor angularidad en comparación con la utilizada en el estudio.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

En cuanto al peso específico, se observó una ligera disminución a medida que aumentaba la proporción de PET, lo cual es consistente con las características más ligeras del plástico comparado con los áridos convencionales. En términos de estabilidad, las briquetas asfálticas con una mayor cantidad de PET presentaron una ligera disminución en la resistencia, lo que podría indicar que el plástico reciclado afecta negativamente la cohesión de la mezcla. Sin embargo, la absorción de agua mostró una mejora moderada en las mezclas con PET, lo que podría reflejar una mayor capacidad de retención de agua debido a la estructura porosa del plástico. La densidad también disminuyó con el aumento del contenido de PET, lo cual es coherente con la reducción del peso específico.

Los resultados sugieren que el uso de PET reciclado en briquetas asfálticas puede ser una alternativa viable para la construcción de pavimentos, siempre y cuando se controlen las proporciones del material reciclado. La incorporación de hasta un 20% de PET parece ser la más adecuada, ya que mantiene propiedades físico-mecánicas dentro de los rangos aceptables para el diseño de pavimentos, según los parámetros establecidos en el Método Marshall. Sin embargo, las mezclas con un 25% de PET mostraron una disminución significativa en la estabilidad, lo cual podría comprometer el rendimiento de la mezcla en condiciones de tráfico pesado y temperaturas extremas.

Se recomienda que los diseñadores de mezclas asfálticas consideren la posibilidad de utilizar PET reciclado en pavimentos urbanos y proyectos de menor tráfico, donde las exigencias mecánicas no sean tan estrictas. Además, sería beneficioso seguir investigando la compatibilidad del asfalto con otros tipos de plásticos reciclados, para optimizar las propiedades de las mezclas y fomentar prácticas sostenibles en la construcción de infraestructura vial.

Para avanzar en el uso de PET reciclado en mezclas asfálticas, se sugiere realizar investigaciones adicionales que evalúen el comportamiento de estas mezclas a largo plazo, especialmente en condiciones climáticas extremas y en pavimentos sometidos a tráfico constante. Sería interesante también estudiar el impacto de diferentes tipos de plásticos reciclados en la mejora de las propiedades de las briquetas asfálticas, comparando el PET con otros plásticos como el HDPE o el PVC.

Además, se podría investigar la posibilidad de modificar el proceso de producción de las briquetas asfálticas para mejorar la adherencia entre el plástico reciclado y el asfalto, lo que podría potenciar la estabilidad y durabilidad de las mezclas. Por último, sería útil realizar un análisis económico que compare los costos de producción de briquetas asfálticas con PET reciclado frente a las mezclas convencionales, para determinar la viabilidad económica de este tipo de mezclas en la industria de la construcción.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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>
- Aizaga V., M. (1988). La vialidad y su importancia para el desarrollo y la seguridad nacional.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). *LRFD Bridge Design Specification*. Washington, DC.
- Arulrajah, A., Yaghoubi, E., Horpibulsuk, S., & Rahman, M. A. (2020). Recycled waste plastic for extending and modifying asphalt pavements. *Sustainable Materials and Technologies*, 24, e00179.
- 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 64 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>
- Cal y Mayor, R., & Cárdenas G., J. (1995). Ingeniería de tránsito. Fundamentos y aplicaciones. In Alfaomega.
- Campagnoli, F., Sánchez, X., & Sbogal, S. (2016). Pavimentos asfálticos de carreteras: guía para pavimentos y diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

- 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.V5I9.171765>
- Cevallos, M. S. R. (2011). Modelo de rehabilitación vial que permita desarrollar un plan que mejore las condiciones de la estructura de la capa de rodadura para 82 vías interparroquiales del cantón Guano de la provincia de Chimborazo. Universidad Técnica de Ambato.
- Choudhary, J., Jha, D., & Gill, K. S. (2020). A review on sustainable utilization of plastic waste in road construction. *Materials Today: Proceedings*, 32, 775-782.
- Dirección General de Inversión Pública-DGIP. (2015). Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en carretera.
- Dirección General de Servicios Técnicos. (2014). Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México. México.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- 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.
- González, M. D. E. (2018). Metodologías de reparación para pavimentos flexibles de mediano y bajo tránsito. Universidad Andrés Bello.
- 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, O. S. J. (2021). *Mecánica de suelos*. Quetzaltenango: División de Ciencias de la Ingeniería.
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill, 1(Mexico), 714.  
<https://doi.org/10.2436/20.8070.01.46>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2019). *Transporte. Ecuador en cifras*. Quito.
- Lebreton, L., & Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 5(1), 6.
- 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>
- Martín, J., Pérez, A., & García, M. (2020). Estudio de la influencia del contenido de asfalto en las propiedades de las mezclas bituminosas. *Revista Internacional de Materiales y Construcción*, 34(2), 123-134.
- Ministerio de Obras Públicas. (2002). *Especificaciones generales para la construcción para la construcción de caminos y puentes de caminos y puentes*.
- Norma Técnica Ecuatoriana. (2010). NTE INEN 856:2010. Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso. Quito.
- Norma Técnica Ecuatoriana. (2011). NTE INEN 696:2011. Áridos. Análisis granulométrico en los áridos fino y grueso. Quito.
- Ortiz, K. (2016). *Diseño de mezclas asfálticas con caucho SBR usando método Marshall*. [Tesis de grado, Universidad de Especialidades Espíritu Santo].  
<http://repositorio.uees.edu.ec/bitstream/123456789/599/1/TESIS%20KERLLY%20ORTIZ%2016-09-2016%20mod%202%20final.pdf>
- Pérez, L. (2010). *Mecánica de suelos elemental*. Universidad Técnica de Ambato.



- 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>
- Pública-DGIP, Dirección General de Inversión. (2015). Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en carretera.
- 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.
- Rico y Lorenzo, C. (2006). Contribución sobre los paradigmas de investigación. *Educação. Revista Do Centro de Educação*, 31(1), 11–22.
- Rutter, D. R., & Quine, L. (1994). *Social Psychology and Health: European Perspectives*. Avebury.
- Sharma, R., Gupta, A., & Sharma, A. (2020). A review on the utilization of waste plastic materials in the bituminous pavement. *Materials Today: Proceedings*, 32, 861-865.
- Solarte Vanegas, N. C. (2022). Efecto en el módulo dinámico de la mezcla asfáltica modificada con añadido de residuos triturados de la industria cerámica. 1. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=315500&info=resumen&idioma=SPA> 67
- Stanfeld, S. A. (2002). Work, personality and mental health. *British Journal of Psychiatry*, 181(1), 96-98.
- Tito, M., & Savino, S. (2020). Impacto del contenido de asfalto en la estabilidad de las mezclas asfálticas. *Journal of Asphalt Technology*, 28(4), 243-250.

- 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>
- 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>
- 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>

## ANEXOS





