

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL



**Valoración de técnicas de conservación y mantenimiento sostenibles para
pavimentos de Ruta Nacional N°27**

Proyecto de graduación para optar por el grado académico de

Maestría en Ingeniería Vial

Realizado por:

Antonio Acuña Hernández

San José, julio del 2022

DEDICATORIA

A mí padre Jorge Acuña Mora que me guía desde el cielo en todo momento y a mí madre Elizabeth Hernández Jiménez, que es la persona que más admiro en toda mi vida. A ambos con mucho orgullo les dedico este proyecto de graduación.

AGRADECIMIENTOS

A todas esas personas que Dios ha cruzado en mí camino para acompañarme, desde mi etapa de estudiante hasta mi desarrollo profesional, en la ejecución de diferentes proyectos de los cuales he aprendido invaluable experiencias, que me motivaron a especializarme en esta área de la infraestructura vial.

EPÍGRAFE

“Porque veo al
final de mi rudo
camino que yo fui el
arquitecto de mi
propio destino”

Amado Nervo

Tabla de Contenido

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
EPÍGRAFE	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
GLOSARIO, TÉRMINOS Y DEFINICIONES.....	VIII
ABREVIATURAS	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT	XII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Generalidades de la Investigación.....	4
<i>1.1 Antecedentes</i>	4
<i>1.2 Planteamiento del Problema</i>	13
<i>1.3 Justificación del estudio</i>	14
<i>1.4 Objetivos</i>	16
<i>1.5 Alcance y Limitaciones</i>	16
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	18
<i>2.1 Pavimentos</i>	18
<i>2.2 Tipos de Pavimentos</i>	18
<i>2.3 Deterioro de pavimentos</i>	19
<i>2.4 Indicadores para pavimentos asfálticos para Ruta 27</i>	21
<i>2.5 Determinación de tipo de mantenimiento en función del PCI</i>	23

<i>2.6 Control y aseguramiento de la calidad</i>	<i>24</i>
<i>2.7 Proyectos de Construcción bajo una perspectiva de Economía Circular.....</i>	<i>25</i>
<i>2.8 Técnicas de mantenimiento y conservación sostenibles para pavimentos.....</i>	<i>27</i>
<i>2.9 Paños o tramos de prueba a escala real.....</i>	<i>33</i>
<i>2.10 Ventajas y bondades de técnicas de conservación y mantenimiento sostenibles</i>	<i>34</i>
CAPÍTULO 3 MARCO METODOLÓGICO	36
<i>3.1 Tipo de Investigación</i>	<i>36</i>
<i>3.2 Diseño de la investigación.....</i>	<i>36</i>
<i>3.3 Fuentes y sujetos de información</i>	<i>38</i>
<i>3.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos</i>	<i>40</i>
<i>3.5 Procesamiento y Análisis de Datos.....</i>	<i>57</i>
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	58
<i>4. Resultados y análisis durante el desarrollo de los objetivos específicos establecidos. 58</i>	<i>58</i>
<i>4.1 Desarrollo de información para objetivo específico 1.....</i>	<i>58</i>
<i>4.2 Desarrollo de información para objetivo específico 2.....</i>	<i>73</i>
Capítulo 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	104
<i>Conclusiones.....</i>	<i>104</i>
<i>Recomendaciones.....</i>	<i>106</i>
Capítulo 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
Capítulo 7 ANEXOS.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1-1. Detalle de contribuciones de Globalvia a los ODS.....	7
TABLA 1-2. Iniciativas sociales relacionadas con los ODS.....	8
TABLA 2-1. Estado del pavimento en función del indicador PCI.....	20
TABLA 2-2. Deterioros en el pavimento flexible.....	21
TABLA 2-3. Deterioros en el pavimento rígido	21
TABLA 2-4. Fases del ciclo de vida del pavimento.....	28
TABLA 2-5. Fases del ciclo de producción del pavimento	30
TABLA 2-6. Mejores prácticas e incertidumbres / desafíos / riesgos e el mantenimiento de carreteras.....	31
TABLA 2-7. Influencia tendencial de diferentes técnicas de mantenimiento en importantes criterios de sostenibilidad	32
TABLA 3-1. Tratamientos experimentales.....	43
TABLA 3-2. Ensayos recomendados para tramos experimentales a escala real.....	46
TABLA 3-3. Cantidades de material según cada ensayo requerido	49
TABLA 3-4. Graduaciones de materiales para estabilización con asfalto.....	50
TABLA 3-5. Requisitos de calidad en el agregado sin estabilizar	51
TABLA 3-6. Clasificación de materiales estabilizados con asfalto	53
TABLA 3-7. Cálculo de cantidad de material según proporción de pavimento	54
TABLA 4-1. Resultados de diseño y control de la calidad de parámetros	60
TABLA 4-2. Resultados del ensayo de Tracción Indirecta para los paños de prueba.....	61
TABLA 4-3. Resultados de compactación in situ mediante la extracción de núcleos para los paños de prueba	61
TABLA 4-4. Requisitos de desempeño para mezclas asfálticas	62
TABLA 4-5. Fatiga @400 μ S y @600 μ S, 21.1°C	63
TABLA 4-6. Deformación permanente, mm	65
TABLA 4-7. Valores de módulo dinámico, elástico y viscoso para todos los paños de prueba	67
TABLA 4-8. Módulo Dinámico (E*) @ 21,1°C y 10 Hz.....	68

TABLA 4-9. Resumen parámetros de diseño.	69
TABLA 4-10. Diseño ME de Pavimento Hipotético. Vidas de fatiga y deformación permanente.....	70
TABLA 4-11. Fechas de toma de muestras para diseño.....	73
TABLA 4-12. Certificados de calidad emulsiones CSS-1H y CRS-1.....	74
TABLA 4-13. Caracterización muestras de base granular muestra 1.....	76
TABLA 4-14. Caracterización muestras de base granular muestra 2.....	77
TABLA 4-15. Caracterización muestra de RAP.....	78
TABLA 4-16. Caracterización de material por estabilizar.....	79
TABLA 4-17. Estimación del porcentaje de asfalto inicial.....	81
TABLA 4-18. Resultados de densidad obtenida en función del contenido de asfalto residual, noviembre 2021.....	81
TABLA 4-19. Resultados de densidad bruta promedio, noviembre 2021.....	82
TABLA 4-20. Resultados de relación de tensión diametral, noviembre 2021.....	83
TABLA 4-21. Parámetros de la mezcla con el óptimo de emulsión establecido por la Guía de Diseño, noviembre 2021.....	85
TABLA 4-22. Deflexiones y módulos de rigidez previos a la rehabilitación, enero 2022.....	90
TABLA 4-23. Deflexiones y módulos de rigidez después de la rehabilitación, enero 2022.....	91
TABLA 4-24. Chequeos de compactación, enero 2022.....	92
TABLA 4-25. Chequeos de compactación, enero 2022.....	93
TABLA 4-26. Medición tasa de aspersión aplicada para estabilización, enero 2022.....	94
TABLA 4-27. Medición tasa de aspersión aplicada para construcción de TSB-1, enero 2022.....	94
TABLA 4-28. Resultados tensión diametral del material estabilizado, enero 2022.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1. Trazado general de la Ruta Nacional N°27	4
FIGURA 1-2. Globalvia y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	6
FIGURA 1-3. Sección típica de Tramo I.....	9
FIGURA 1-3. Fotografía aérea parte del tramo II.....	10
FIGURA 1-4. Salida a rampa La Garita / Turrúcares.....	10
FIGURA 1-5. Sección típica del tramo I.....	12
FIGURA 1-6. Sección típica del tramo II.....	12
FIGURA 1-7. Sección típica del tramo II.....	13
FIGURA 1-8. Análisis causa y efecto... ..	14
FIGURA 2-1. Curva de Deterioro de un Pavimento en función de su condición y tipo de mantenimiento propuesto.....	23
FIGURA 2-2. Esquema del modelo de control de la calidad aplicado en un proyecto vial en Costa Rica... ..	24
FIGURA 2-3. Esquema simplificado del proceso actual del sector construcción.....	26
FIGURA 2-4. Esquema simplificado del proceso futuro del sector construcción, basado en la economía circular... ..	27
FIGURA 2-5. Alternativas de aplicación de rap como capa de base en un pavimento flexible... ..	35
FIGURA 2-6. Construcción en etapas.....	35
FIGURA 3-1. Fases de un proceso cuantitativo.....	37
FIGURA 3-2. Esquema de marco metodológico.....	37
FIGURA 3-3. Área de estudio, km 65-66, Ruta 27.....	41
FIGURA 3-4. Deterioros localizados, km 76, Ruta 27... ..	42
FIGURA 3-5. Esquema experimental para el proceso de producción de los tratamientos de MAC... ..	44
FIGURA 3-6. Esquema experimental para el proceso constructivo.....	45
FIGURA 3-7. Distribución de tramos experimentales in situ.....	45
FIGURA 3-8. Localización marginal Hacienda Brasil, Ruta 27... ..	47

FIGURA 3-9. Esquema experimental para el proceso constructivo.....	50
FIGURA 3-10. Selección del tipo de estabilización.....	51
FIGURA 3-11. Esquema de diseño.....	52
FIGURA 3-12. Proporciones de mezclado de materiales.....	54
FIGURA 4-1. Ubicación de paños de prueba.....	57
FIGURA 4-2. Imágenes del proceso constructivo de los paños de prueba..	58
FIGURA 4-3. Granulometría de los tratamientos experimentales.....	59
FIGURA 4-4. Ejemplo de salida del ensayo de fatiga en la viga de 4-puntos.....	63
FIGURA 4-5. Vida de fatiga en la viga de 4-puntos para los diversos tratamientos de R8©MAC.....	64
FIGURA 4-6. Ejemplo de análisis de deformación permanente y punto de desnudamiento en la Rueda de Hamburgo (HWT).....	65
FIGURA 4-7. Deformación permanente para los diversos tratamientos de Resin8©-MAC... ..	66
FIGURA 4-8. Curvas maestras de módulo dinámico de los tratamientos experimentales.....	67
FIGURA 4-9. Módulo Dinámico (E^*) para los diversos tratamientos de R8©MAC.....	68
FIGURA 4-10. Estructura de pavimento estudiada... ..	69
FIGURA 4-11. Elaboración de calicata en sitio para toma de muestra y medición de espesores en octubre 2021... ..	72
FIGURA 4-12. Toma de muestra de RAP en sitio de apilamiento, octubre 2021.....	72
FIGURA 4-13. Agregados y emulsión asfáltica previo al moldeo de pastillas Marshall, noviembre 2021... ..	80
FIGURA 4-14. Ensayos de recubriendo y adherencia de los agregados y emulsión asfáltica, noviembre 2021.....	80
FIGURA 4-15. Gráfica de Densidad Bruta Seca versus Asfalto residual, noviembre 2021.....	82
FIGURA 4-16. Gráficas para parámetros de diseño, noviembre 2021... ..	84
FIGURA 4-17. Vista en planta y perfil longitudinal de marginal Hacienda Brasil... ..	87
FIGURA 4-18. Registro fotográfico de la condición de la marginal previo a la rehabilitación.....	88
FIGURA 4-19. Proceso de extendido de RAP sobre la superficie existente previo a la rehabilitación... ..	95
FIGURA 4-20. Proceso previo a la dosificación de emulsión asfáltica.....	95
FIGURA 4-21. Aplicación de humedad al material previo a la dosificación de emulsión asfáltica... ..	96

FIGURA 4-22. Aplicación de la dosificación de emulsión asfáltica de rompimiento lento.....	96
FIGURA 4-23. Estabilización de material con emulsión asfáltica de rompimiento lento a 15 cm de profundidad.....	97
FIGURA 4-24. Conformación y compactación de material estabilizado.....	98
FIGURA 4-25. Acabado de superficie de ruedo posterior a la estabilización.....	98
FIGURA 4-26. Construcción de TSB-1.....	98
FIGURA 4-26. Acabado final de marginal Hacienda Brasil, posterior a su rehabilitación.....	100

GLOSARIO, TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Curado: Es el proceso mediante el cual la mezcla estabilizada, pierde humedad por la repulsión del agua por parte del asfalto y la expulsión del agua inducida por la compactación, aumentando su resistencia y la rigidez del material.

Deformación permanente: Deterioro de las capas que conforman una estructura de pavimento; deformación inelástica acumulada por efecto de los esfuerzos cortantes (cargas que transitan una carretera), puede presentarse en forma de roderas o ahuellamientos (depressiones en las huellas de los neumáticos de los vehículos) y de desplazamientos horizontales.

Emulsión asfáltica: Es la dispersión de pequeñas micropartículas de asfalto dentro de una matriz acuosa que se mantiene estable por medio de un agente emulsificante. Las emulsiones típicamente contienen entre un 40 % a un 75 % de asfalto y, a temperatura ambiente, presentan consistencia líquida que va desde fluida hasta muy viscosa. El tamaño de la partícula se encuentra en un rango desde 0,01 a 20 micrones de diámetro. Existen emulsiones catiónicas o aniónicas, de rompimiento lento, medio o rápido, entre otras.

Fatiga: Consiste en una serie de grietas interconectadas causadas debido a la falla por fatiga (se excede la resistencia a la tensión del material por el paso repetido de vehículos). Las grietas se propagan desde el fondo de la capa de mezcla asfáltica hacia arriba. El deterioro aparece inicialmente como una serie de grietas longitudinales paralelas que conforme se someten a más pasadas vehiculares se interconectan y forman algo parecido al cuero de un lagarto. El deterioro ocurre solamente en áreas sujetas al paso repetido de los vehículos, así como sus huellas.

Ligante asfáltico: Es un producto natural que también se puede obtener a través del destilado del petróleo crudo y con el cual se generan mezclas asfálticas, asfaltos espumados y emulsiones asfálticas.

Material estabilizado con asfalto: material granular o combinación con material recuperado donde se incorpora emulsión asfáltica o asfalto espumado para aumentar la resistencia al corte y disminuir la susceptibilidad al daño por humedad.

Pavimento: Es una estructura constituida por un conjunto de capas superpuestas, de diferentes materiales, adecuadamente compactados, que se construyen sobre la subrasante de la vía. Esto con el objeto de soportar

las cargas del tránsito durante un período de varios años, brindando una superficie de rodamiento uniforme, cómoda y segura.

Fórmula de la mezcla para el trabajo: Es la fórmula de la mezcla propuesta por el contratista, verificada por la administración, en obra mediante un paño de prueba y con los ajustes que se deriven de su ejecución, que autorizada por el ingeniero del proyecto.

RAP: siglas del inglés (Reclaimed Asphalt Paviment), es el término que se le da a cualquier material de mezcla asfáltica recuperado de un pavimento existente. En Costa Rica también se utiliza el término “perfilado” para referirse a este material.

Rehabilitación de un pavimento asfáltico: Es el proceso por medio del cual la estructura de pavimento es restaurada a su condición original de soporte o se genera mayor aporte estructural. Se obtiene de la recuperación con o sin estabilización, del pavimento existente en combinación con material de aporte si es necesario.

Relleno mineral activo: es un agente que altera químicamente las propiedades de la mezcla con el objetivo de mejorar el desempeño del material. Los tipos más comunes son: cemento, cal hidráulica y cenizas volantes. La cantidad máxima permitida en la estabilización con asfalto es 1%.

Resin 8©: es una solución que transforma los desechos plásticos no valorizables en una materia prima para el mercado de la construcción, pudiendo ser utilizado en todo tipo de proyectos.

ABREVIATURAS

AASHTO: Asociación Americana de Carreteras del Estado y Oficiales de Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials).

AIPCR: Asociación Mundial de la Carretera.

HMA: Mezcla bituminosa en caliente (Hot Mix Asphalt).

Lanamme UCR: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, que bajo lo estipulado en el artículo 20 del Decreto Ejecutivo N° 37016-MOPT, del 7 de marzo de 2012, Reglamento al artículo 6 de la Ley de Simplificación y Eficiencia Tributaria N° 8114, tiene como función la creación y actualización del conjunto de documentos que conforman el Manual de Especificaciones.

MAV-2016: Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica.

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

PIARC: Asociación Mundial de la Carretera, es una organización sin fines de lucro establecida en 1909 para mejorar la cooperación internacional y fomentar el progreso en el ámbito de la carretera y el transporte por carretera.

RAP: Siglas del inglés (Reclaimed Asphalt Pavement), es el término que se le da a cualquier material de mezcla asfáltica recuperado de un pavimento existente. En Costa Rica también se utiliza el término “perfilado” para referirse a este material.

VFA: Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

VMA: Porcentajes mínimos de vacíos en el agregado mineral.

RESUMEN

En la presente investigación se pondrá en evidencia el efecto positivo de la aplicación de los principios del modelo de economía circular en la gestión profesional de los proyectos de infraestructura vial. Esto mediante una integración entre este concepto y técnicas de conservación y mantenimiento aplicadas en pavimentos.

La metodología de investigación utilizada fue descriptiva y aplicada, por medio de la utilización de distintas técnicas, entre ellas, entrevistas no estructuradas, revisión documental, realización de pruebas de campo y en laboratorio. La aplicación de técnicas de conservación y mantenimiento sostenibles en la carretera San José – Caldera, Ruta Nacional N°27 tiene como finalidad un enriquecimiento del acervo de conocimientos aplicados en el desarrollo de construcciones resilientes al servicio del desarrollo integral de las naciones.

Como parte de los hallazgos encontrados en la situación actual, existen múltiples aplicaciones del modelo de economía circular en proyectos relacionados con el sector construcción. Los beneficios esperados van desde el ámbito económico, ambiental, empresarial y social. En Costa Rica, la Ruta 27 se encuentra a la vanguardia, ya que esta ruta actualmente es operada bajo el modelo concesión de obra pública y es la primera carretera sostenible de nuestro país. La concesionaria impulsa un modelo de economía circular que da el mayor uso posible a los desechos y recursos, de esta manera la carretera se ha certificado como proyecto ISO 14001 de Gestión Ambiental y cuenta con Bandera Azul.

El papel de las instituciones públicas, incluidos los centros de formación, es imprescindible para lograr una transición de economía lineal a economía circular. Mayores incentivos y facilidades en el desarrollo de políticas de gestión de residuos, financiamiento de proyectos amigables con el ambiente, asesorías, programas, requerimientos, entre otros; provocarán el cambio de paradigmas necesario para redirigir el modelo económico vigente.

Palabras clave: economía circular, construcción, pavimentos, administración.

ABSTRACT

The present investigation evidences the positive effect of the application of circular economy principles in the professional practice of vial infrastructure projects. This through the integration of this concept and conservation techniques applied to pavement.

The investigation methodology used was descriptive and applied, through the utilization of different techniques, such as: non-structure interviews, documental reviews, field tests and laboratory. The application of sustainable conservation and maintenance techniques in San Jose – Caldera road (National route #27) intends to enrich the heritage of knowledge applied in the development of resilient construction, at the service of the holistic development of nations.

The investigation found multiple applications of the circular economy model in the construction sector projects. Expected benefits expand from economic, environmental, enterprise and social aspects. In Costa Rica, the 27 route is leading, this because the route is actually operated under the public concession model and is the first sustainable road in the country. The concession company fosters a circular economy model, which intends to fully utilize wastes and resources, in this manner the road has certified as ISO 14001 project in terms of environmental management and has the Blue Flag certification.

The role of public institutions, including formation centers, is fundamental to achieve a transition from lineal to circular economy. Higher incentives and facilities in the development of waste/resources policies, funding of environmentally friendly projects, consultancy programs, requirements, among others will drive a paradigm change required to redirect the current economy model.

Keywords: circular economy, construction, pavements, administration.

INTRODUCCIÓN

En el escenario actual que enfrenta la humanidad ante la crisis de una pandemia en la que ha habido que adaptarse a esta nueva situación de restricciones sanitarias y socioeconómicas, el cambio climático y el problema del calentamiento global son consideradas como una preocupación para todo el mundo y un foco de debate público, científico y político. Las consecuencias del calentamiento global incluyen alteraciones consistentes, imprevistas y fortuitas en el medio ambiente y el clima, con efectos deletéreos sobre los ecosistemas causados principalmente por el comportamiento de la población humana. Como resultado de esto, industrias de todo tipo buscan reducir el impacto ambiental de sus actividades.

El firme compromiso global con el cumplimiento de los principios recogidos en el Pacto Mundial de las Naciones Unidas, en el que surgen los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) enmarcados en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y compromisos ambientales formalizados en el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, buscan cambiar los modelos de progreso en los países para incorporar los aspectos de sostenibilidad ambiental y reducción de gases de efecto invernadero. (Alvarado, 2019)

La mezcla asfáltica caliente (MAC) también conocida en normas técnicas y reglamentos nacionales o internacionales como HMA (Hot Mix Asphalt, por sus siglas en inglés) es el material de construcción de carreteras más frecuentemente usado a nivel mundial y está presente en alrededor del 95% de las estructuras de pavimento desde autopistas hasta calles rurales o cantonales (Valdés, 2020). La industria de la pavimentación de carreteras en particular, tanto en los países en desarrollo que necesitan construir nueva infraestructura vial para completar sus redes de carreteras pavimentadas, como en los países desarrollados que necesitan renovar y mantener su infraestructura vial por medio de trabajos de rehabilitación, reconoce la necesidad de buscar una infraestructura más sostenible, alternativas para el diseño y fabricación de mezclas asfálticas.

La investigación sobre materiales de pavimento ha mostrado tres aristas principales de desarrollo que son:

- La reutilización de material de pavimento asfáltico recuperado (RAP), que contribuye a la economía circular de la industria.
- Incorporación de material reciclado (plásticos o caucho) en el proceso de homogenización y mezclado de los materiales en planta, o bien, de manera mecánica en sitio con la ayuda de una máquina perfiladora que desintegra el asfalto dañado

- El desarrollo de procedimientos que logran ahorros de energía y menores emisiones al reducir la temperatura de fabricación de mezclas asfálticas.

El modelo de producción y consumo utilizado comúnmente en el sector construcción, ha sido caracterizado por un seguir un sistema lineal de extracción, fabricación, utilización y eliminación del producto, bien o servicio. Por esto se crea dependencia de los recursos, lo cual deja de ser rentable e incluso viable, en un contexto en el que las materias primas pueden no ser suficientes para cubrir la demanda futura. El modelo de economía circular surge como una alternativa a este lineal tradicional.

De acuerdo con la fundación Ellen MacArthur (2015):

Una economía circular es restaurativa y regenerativa por diseño, y tiene como objetivo mantener los productos, componentes y materiales en su mayor utilidad y valor en todo momento. El concepto distingue entre ciclos técnicos y biológicos. Este nuevo modelo económico busca, en última instancia, desacoplar el desarrollo económico global del consumo finito de recursos. Impulsa objetivos estratégicos claves, como la generación de crecimiento económico, la creación de empleo y la reducción de los impactos ambientales, incluidas las emisiones de carbono. (p.1)

La ingeniería vial juega un papel fundamental en el desarrollo y avance tecnológico de todas las civilizaciones. A través de la historia, la sociedad ha buscado mejorar su calidad de vida siendo responsable de movilizar una gran cantidad de insumos, impulsar el crecimiento de un territorio, crear fuentes de empleo, pero a su vez genera una gran cantidad de residuos por lo que una adecuada gestión de los proyectos de construcción impacta positivamente en las condiciones medioambientales, económicas y sociales de un país.

El presente trabajo de investigación busca incentivar al lector en la implementación de técnicas de conservación y mantenimiento sostenibles, como una estrategia de gestión de proyectos de infraestructura vial integrando los ODS y principios del modelo de economía circular mediante la reutilización de material producto del reciclaje. El identificar todas las posibles oportunidades de gestionar los proyectos bajo este modelo, repercute positivamente en la eficiencia, productividad, innovación, diversificación del negocio, sostenibilidad ambiental, responsabilidad social, entre otros.

El informe está conformado por la siguiente estructura cuyo contenido principal se detalla a continuación:

Generalidad de la Investigación: En este capítulo se desarrolla una explicación sobre el contexto actual de la Ruta 27, sus condiciones medio ambientales y el avance del modelo de la economía circular. Se

presentan los antecedentes y planteamiento del problema por el cual se realiza la investigación, su justificación, el objetivo general, objetivos específicos y finaliza estableciendo los alcances y limitaciones presentes.

Marco teórico: En este capítulo se recopila información asociada con el uso, diseño y construcción técnicas de conservación y mantenimiento sostenibles aplicadas a pavimentos; conceptos de economía circular sobre el sector construcción y su papel en la sociedad; la evolución de la industria y los beneficios asociados. Adicionalmente se recopilaron conceptos importantes del modelo de economía circular y sus principales características.

Marco metodológico: En este apartado se explica qué tipo de investigación fue desarrollada, los sujetos y fuentes de información, las herramientas utilizadas para la obtención de información y para el análisis de los datos obtenidos.

Propuesta de solución: El capítulo se divide en dos partes en función de los objetivos específicos establecidos

Conclusiones y recomendaciones: En este último capítulo se incluyen las conclusiones del investigador con base en los resultados obtenidos y se desglosaron las recomendaciones que puedan servirle al lector para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 1. Generalidades de la Investigación

En este capítulo se muestran elementos generales del presente estudio, así como el planteamiento del problema y la justificación. Además, se describen los objetivos propuestos, los alcances de la investigación y las limitaciones encontradas.

1.1 Antecedentes

La carretera San José – Caldera o Ruta Nacional N° 27 es una ruta urbana y montañosa de 76 km. de extensión que comunica la capital del país con uno de los principales puertos del Pacífico:

Figura 1-1. Trazado general de la Ruta Nacional N°27.



Fuente: Informe de Medición de Indicadores 2022, Globalvia

Esta ruta considerada como el proyecto que inserta a Costa Rica en el grupo de países que realizan obras a través de concesión de obra pública. La construcción de la carretera inició el 09 de enero del 2008 cuando la Sociedad Concesionaria formalmente inició sus operaciones en la ruta. Para el año 2013, el Grupo Globalvia, líder mundial en la gestión de concesiones de infraestructura, que gestiona 26 proyectos en ocho países incluyendo autopistas y ferrocarriles, decide ampliar su participación en el proyecto y asume el control corporativo de la Sociedad Concesionaria a cargo de la carretera. Esto motiva en 2014 el cambio de imagen a Globalvia Ruta 27, nombre comercial y marca bajo la cual opera actualmente la Sociedad Concesionaria.

Visión:

La visión de Globalvia es convertirse en la compañía de referencia mundial por su eficiencia en el sector de la gestión de concesiones de infraestructura de transporte especialmente autopistas y ferrocarriles, gracias a una política de crecimiento selectivo y de desinversiones estratégicas para alcanzar el valor deseado de los accionistas.

Misión:

La Misión de Globalvia es la generación de valor mediante inversiones a largo plazo en concesiones de infraestructura.

En la actualidad, la Sociedad Concesionaria es uno de los actores de referencia en los países en los que opera gracias a su estrategia de negocio responsable y sostenible y al establecimiento de relaciones de

confianza duraderas con sus grupos de interés. Muestra de ello es el reconocimiento por parte del Global Real Estate Sustainability Benchmark (GRESB) como líder en la gestión de la sostenibilidad en el sector de infraestructuras de transporte para la clase “Road Companies” por tercer año consecutivo, certificación del Sistema Integrado de Gestión por parte de la entidad AENOR conforme a las normas ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, ISO 45001:2018 y UNE-EN 13816:2003.

La empresa cuenta con el reconocimiento concedido por la Comisión Nacional del programa Bandera Azul desde el año 2016 correspondiente a la categoría de Cambio Climático. Desde el año 2015 posee la marca País Esencial Costa Rica concedido por la Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica (PROCOMER). Según publicación del día 3 de noviembre de este año, el diario oficial larepublica.net publicó en la sección Especial Descarbonización lo siguiente: “Ruta 27 es la primera carretera del país certificada en sostenibilidad”. A continuación, se mencionan algunas de las políticas de economía circular y sostenibilidad que se promueven en Ruta 27 a sus usuarios:

- Para alumbrar la carretera se utiliza un sistema de iluminación led con tecnología de control horario que permite su encendido y apagado automático que aprovecha la luz natural el mayor tiempo posible.
- Las cámaras de seguridad instaladas a lo largo del camino y las instalaciones del peaje operan mediante paneles solares.
- La carretera dispone de un sistema de recolección de agua llovida que se utiliza luego en labores de mantenimiento y limpieza.
- Diariamente se realizan labores de gestión de residuos sólidos en la carretera, al material de plástico recolectado se le un segundo uso, pues se convierte en materia prima para la elaboración de postes para la señalización de la ruta y se estudia la posibilidad de emplearlo en la mezcla asfáltica para el mantenimiento de la calzada.
- En el proyecto se cuenta con un centro de reciclaje donde se les da tratamiento adecuado a los desechos recolectados. Para dimensionar este programa, es importante conocer que cada mes se recolectan 20 toneladas de desechos, principalmente partes de llantas y de vehículos, así como basura que tiran los usuarios.
- El proyecto cuenta con un programa de compostaje donde se convierten en abono todos los desechos orgánicos generados por los usuarios, el cual es utilizado posteriormente como en las zonas verdes del proyecto y se regala a los colaboradores para ser empleado en sus jardines y plantas.
- El rescate de animales es otro proyecto emblemático en la Ruta 27. Impulsado de la mano con el refugio de Santa Ana y la Asociación Animal Hope, incluye capacitación del personal sobre el adecuado manejo de cada especie, la revisión médica de los animales encontrados y un plan de adopción responsable de las especies domésticas.

a) Compromiso global para el desarrollo sostenible

El firme compromiso con el cumplimiento de los principios recogidos en el Pacto Mundial de las Naciones Unidas y de los Principios de Inversión Responsable, junto con el de la contribución a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) enmarcados en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible,

es clave para entender el esfuerzo llevado a cabo por la Compañía en los últimos años.

b) Pacto Mundial de las Naciones Unidas

Globalvia, como firmante del Pacto Mundial de las Naciones Unidas desde 2012, se compromete a hacer del Pacto Mundial y de sus diez principios parte de la estrategia, la cultura y las acciones cotidianas de la Compañía.

c) Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible

Globalvia define anualmente objetivos ESG y acciones basadas en los ODS, poniendo el foco en aquellos que están más relacionados con su actividad y que promueven los Principios de Inversión Responsable. El Comité de Sostenibilidad ha realizado un análisis de los 17 ODS con objeto de seleccionar los prioritarios dentro de la estrategia y marco de operación de Globalvia, estos son:

- Educación de calidad.
- Igualdad de género.
- Trabajo decente y crecimiento económico.
- Industria, innovación e infraestructura.
- Acción por el clima.

Adicionalmente, la concesionaria mantiene otras colaboraciones para contribuir al resto de los ODS.

Figura 1-2. Globalvia y los Objetivos de Desarrollo Sostenible



Fuente: Informe de Sostenibilidad 2021, Globalvia.

Tabla 1 – 1. Detalle de contribuciones de Globalvia a los ODS

<p>4 EDUCACIÓN DE CALIDAD</p>	
<p>Globalvia dispone de acuerdos con distintos centros educativos para ofrecer becas y contratos en prácticas a jóvenes estudiantes y pone a disposición de los empleados de las Sociedades ayudas o becas al estudio. También colabora con la Fundación Real Madrid contribuyendo a que los niños consigan alcanzar sus metas educativas, con la Fundación A LA PAR en su proyecto educativo CAMPVS orientado a ayudar en la formación superior a personas con discapacidad y con la Fundación Adelas quienes construyen escuelas entre otras actividades. Asimismo, la Compañía fomenta la educación vial mediante diferentes programas, talleres, formaciones y campañas.</p>	
<p>5 IGUALDAD DE GÉNERO</p>	
<p>Globalvia trabaja para que la representación de la mujer, en todos los niveles funcionales y jerárquicos, evolucione hacia una representación equitativa. Durante 2020 la sociedad concesionaria de la Autopista Central Gallega ha elaborado e implantado un Plan de Igualdad. Por su parte, Metro de Sevilla ha realizado la evaluación de su Primer Plan de Igualdad y ha procedido a la elaboración, negociación y aprobación de un segundo Plan de Igualdad para el periodo 2021-2024. Además, la Compañía se suma al Programa de <i>Mentoring</i> de mujeres promovido por la Cámara de Comercio de Estados Unidos y colabora en campañas de concienciación y sensibilización en materia de igualdad de género.</p>	
<p>8 TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO</p>	
<p>Globalvia en su compromiso por fomentar el trabajo decente ofrece becas y contratos en prácticas a jóvenes estudiantes, promueve la estabilidad en el empleo mediante acuerdos de beneficios sociales, y dispone de medidas adicionales a la evaluación obligatoria de riesgos laborales. Por otro lado, la Compañía colabora con la Fundación Adecco mediante su Programa de Voluntariado Corporativo en un proyecto basado en la orientación al empleo de personas con discapacidad intelectual. Además, Globalvia recurre a distintas Fundaciones (A LA PAR, PRODIS, Cáritas, UNICEF) para satisfacer ciertas necesidades cotidianas mediante la compra de productos que son elaborados en centros especiales ayudando a la empleabilidad de personas con diversas discapacidades o en condiciones de exclusión social. Además, en 2020 Metro de Sevilla lanzó una campaña de apoyo y reconocimiento al comercio local con el objetivo de dar a conocer las pequeñas empresas localizadas en el entorno del suburbano.</p>	
<p>9 INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURAS</p>	
<p>Globalvia contribuye al desarrollo y correcto mantenimiento de infraestructuras en diferentes países. Por ejemplo, durante 2020 la compañía ha implantado un sistema de auscultación y diagnóstico en las vías en Metro de Sevilla mediante el cual se utiliza tecnología láser para detectar averías en la línea. La Compañía dispone de un Plan Estratégico de Innovación 2019-2021 mediante el cual adapta su negocio a las nuevas tendencias globales.</p>	
<p>13 ACCIÓN POR EL CLIMA</p>	
<p>Globalvia en su compromiso de mitigación del cambio climático comenzó a elaborar en 2020 su Plan Estratégico de Sostenibilidad, el cual incluye la línea de actuación "Infraestructura para mitigar el cambio climático", e incorpora en su cultura empresarial diferentes estrategias, planes y políticas que mejoren su capacidad de gestión del cambio climático. Entre las acciones llevadas a cabo en 2020 destaca la implantación de puntos de recarga en activos estratégicos con el fin de potenciar la movilidad eléctrica, la incorporación de vehículos eléctricos a la flota de algunas sociedades y el compromiso a nivel de grupo de establecer objetivos de reducción de emisiones alineados con la iniciativa SBT. Asimismo, el 87,5% de las Sociedades del Grupo Globalvia cuentan con un Sistema de Gestión Ambiental (ISO 14001:2015) certificado por AENOR.</p>	

Fuente: Informe Sostenibilidad 2021, Globalvia

#COMPANIES4SDGs

Globalvia se unió en noviembre de 2017 a la campaña #COMPANIES4SDGs, que persigue facilitar a las empresas una campaña global para dar a conocer y concienciar a sus empleados y resto de grupos de interés en el contexto de los ODS. Esta campaña ha sido lanzada por la Red Española de Pacto Mundial de Naciones Unidas junto con Voluntariado y Estrategia y con el apoyo de IMPACT 2030.

Así, mediante el uso de la campaña #COMPANIES4SDGs, Globalvia informa a sus empleados sobre los ODS en todos los países donde está presente, así como de posibles acciones individuales y cotidianas con las que todos pueden colaborar de forma sencilla, pero con impacto.

Tabla 1 – 2. Iniciativas sociales relacionadas con los ODS

<p>4 EDUCACIÓN DE CALIDAD</p> 	<p>En 2020, durante la COVID-19, Globalvia puso en marcha distintas iniciativas para paliar las consecuencias del cierre temporal de las escuelas en los diferentes países. En Bío Bío (Chile), la Compañía entregó <i>tablets</i> y paquetes de conexión de datos a internet para promover el acceso a la educación de niños y niñas que viven en áreas rurales. La Sociedad Concesionaria de Transmontana (Portugal), por su lado, dio apoyo al proyecto de aprendizaje a distancia, promovido por los ayuntamientos locales, prestando material informático a alumnos de familias desfavorecidas locales con el fin de que pudieran asistir a las clases <i>online</i>.</p>
<p>5 IGUALDAD DE GÉNERO</p> 	<p>Tras el aumento de violencia de género durante la COVID-19, la Sociedad M50 Concession (Irlanda), ha apoyado a la entidad <i>Saoirse Womens Refuge for Domestic Abuse</i>, la cual presta atención y ayuda a mujeres afectadas por violencia doméstica y que se han visto obligadas a abandonar sus hogares.</p>
<p>8 TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO</p> 	<p>Durante la crisis económica provocada por la COVID-19, la concesión de Autopista del Itata (Chile), en colaboración con las municipalidades locales, ha dado apoyo a productores artesanos locales encargando la fabricación de 1.200 mascarillas, las cuales fueron distribuidas entre las comunidades más necesitadas y los hogares de ancianos de los municipios del área.</p>
<p>9 INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA</p> 	<p>En el contexto de la pandemia de la COVID-19, la concesionaria Metro de Sevilla adquirió en 2020 impresoras 3D para la fabricación de pantallas protectoras por parte de los empleados de metro.</p>

Fuente: Informe Sostenibilidad 2021, Globalvia

d) Principios de Inversión Responsable

La empresa Globalvia apoya los Principios de Inversión Responsable (PRI, por sus siglas en inglés) de las Naciones Unidas y ha introducido estos aspectos en sus procedimientos operacionales a través del Sistema Integrado de Gestión (SIG).

1.1.1 Características del Proyecto Ruta 27

La concesión de la Ruta Nacional N° 27 se compone de 76,6 km de vía troncal (sin incluir rampas y radiales) y 27,3 km que corresponden a vías marginales, de las cuales 10,2 km poseen superficie de ruedo con un Tratamiento Superficial Bituminoso de dos Capas (TSB2) y 17,1 km con superficie de ruedo con MAC.

El proyecto está constituido por tres secciones lo la largo de toda la ruta:

- 1) San José – Ciudad Colón:

Sección denominada Próspero Fernández, las obras en este tramo iniciaron en 2008, finalizando en mayo del 2009. Tiene una distancia de 14 kilómetros e implica el mejoramiento de la vía, en los cuatro carriles existentes (dos por cada sentido) y la ampliación a seis en el tramo comprendido entre los intercambios de Circunvalación y Multiplaza.

Figura 1 – 3. Sección típica de Tramo I.



Fuente: <https://globalviaruta27.com/>

Características u obras presentes del tramo I:

- ✓ Velocidad de circulación: 80 km/h.
- ✓ Rehabilitación de pavimentos a lo largo de la totalidad de la sección.
- ✓ Mejoramiento de los intercambios existentes.
- ✓ Mejoramiento de puentes y rehabilitación de estructuras.
- ✓ Construcción de aceras, bahías de autobuses, puentes peatonales e iluminación.

2) Ciudad Colón – Orotina:

Corresponde a la sección denominada José María Castro Madriz, de acuerdo con el Contrato de Concesión. Se trata de un tramo nuevo de 38 km. y pertenece al sector más extenso y complejo de terminar, el cual fue inaugurado en enero del 2010. Al tratarse de una obra nueva, las obras más importantes que se realizaron son el movimiento de tierra, instalación de sistemas de drenaje, construcción de muros y estructuras a desnivel, intercambios y pavimentos. Esta sección tiene problemas de estabilización en los taludes que comúnmente producen derrumbes que obligan al cierre temporal de la vía.

Algunas comunidades por donde pasa esta vía son San Rafael de Alajuela, La Guácima, Siquiaries, Turrúcares, Cebadilla, Concepción de Atenas, Pan de Azúcar, Balsa, Escobal, Dantas, Hacienda Vieja y Orotina.

Figura 1 – 3. Fotografía aérea parte del tramo II.



Fuente: <https://globalviaruta27.com/>

Características u obras presentes del tramo II:

- ✓ Velocidad de circulación: 80 Km/h.
- ✓ Construcción de intercambios y pasos a desnivel.
- ✓ Construcción de calles marginales.
- ✓ Sección Típica por construir: 2 carriles, 1 por sentido y con carril de ascenso en las zonas de gran pendiente
- ✓ Tramo nuevo para construir en su totalidad por la concesionaria. Los 5 puentes fueron contruidos por la Administración Pública.

3) Orotina – Caldera:

El inicio de las obras correspondientes a esta sección se dio en setiembre del año 2008 y su apertura se dio en el mes de mayo de 2009, abarcando el total de los 24 Km. del tramo existente que consta de dos carriles, uno por cada sentido.

Figura 1 – 4. Salida a rampa La Garita / Turrúcares.



Fuente: <https://globalviaruta27.com/>

Características u obras presentes del tramo III:

- ✓ Velocidad de circulación: 80 Km/h.
- ✓ Mejoras en intercambios existentes.
- ✓ Construcción de vías marginales.
- ✓ Refuerzo del puente sobre el Río Jesús María.
- ✓ Construcción de bahías para autobuses.
- ✓ Rehabilitación de Pavimento Flexible: dos carriles de 3,65m y espaldones de 1,80m.

1.1.2 Ampliación Ruta 27

En marco de este año, Globalvia Ruta 27 presentó al Consejo Nacional de Concesiones (CNC) el anteproyecto correspondiente a la ampliación de esa ruta, documento compuesto por entregables como topografía, diseño geométrico, diseño hidráulico, ortofotos, señalización y seguridad vial, paisajismo, facilidades peatonales, iluminación, servicios afectados, listado de expropiaciones, diseño de pavimentos, plan de manejo de tránsito, estructuras, geotecnia y presupuesto de 640 millones de dólares. El proyecto será financiado con recursos privados y para esto la concesionaria buscará su mejor opción en el mercado financiero con bancos de desarrollo internacionales. Además, como Globalvia es una operadora de concesiones, deberá contratar las obras de construcción.

En la actualidad el CNC se encuentra revisando y verificando aspectos técnicos del diseño del proyecto, con el objetivo de buscar mejoras en la propuesta del concesionario y se estima que las obras podrían iniciar a finales del primer trimestre del año 2022. La ampliación implica que la concesión se extendería por 15 años, a partir del 2033 cuando finaliza el actual contrato.

Sector I. Comprende entre el Gimnasio Nacional y el intercambio Siquiaraes. Las principales obras por desarrollar, si así lo justifica el estudio de tráfico e ingeniería, son:

- Construcción de un paso a desnivel en el kilómetro cero para descargar el tráfico de la ruta 27, directamente sobre la avenida 10 de San José.
- Ampliación entre el intercambio de la Ruta 39 y la plaza de peaje de Escazú, incluyendo el puente Tiribí.
- Construcción de nuevo intercambio en Santa Ana con la Ruta 147, mejoras funcionales en el intercambio de Guachipelín y de Ciudad Colón, así como la ampliación de carriles entre la salida a Ciudad Colón hasta el intercambio de Guácima, entre otras.

Figura 1 – 5. Sección típica del tramo I.

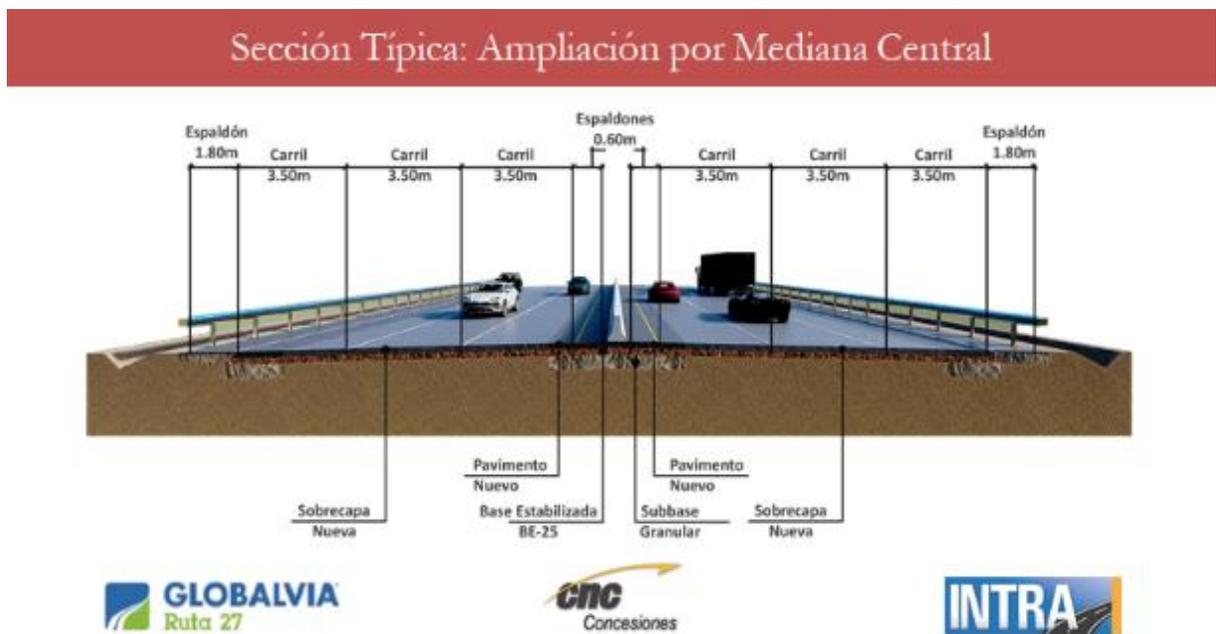


Fuente: Globalvia, 2021

Sector II. Incluye dos tramos entre Intercambio de Siquiaries y el de Atenas y otro entre Orotina y Caldera. Se realizará:

- Ampliación de vías a dos carriles por sentido con espaldones y separación física con barreras de concreto.
- Incluye construcción de dos nuevos puentes (Río Grande y Jesús María), así como ampliación de la estructura del intercambio Caldera y mejoramiento de medidas de seguridad entre Bolsón y Caldera, entre otras.

Figura 1 – 6. Sección típica del tramo II.



Fuente: Globalvia, 2021

Sector III. Ampliación a dos carriles por sentido entre el intercambio de Atenas y el intercambio de Orotina que tendrá:

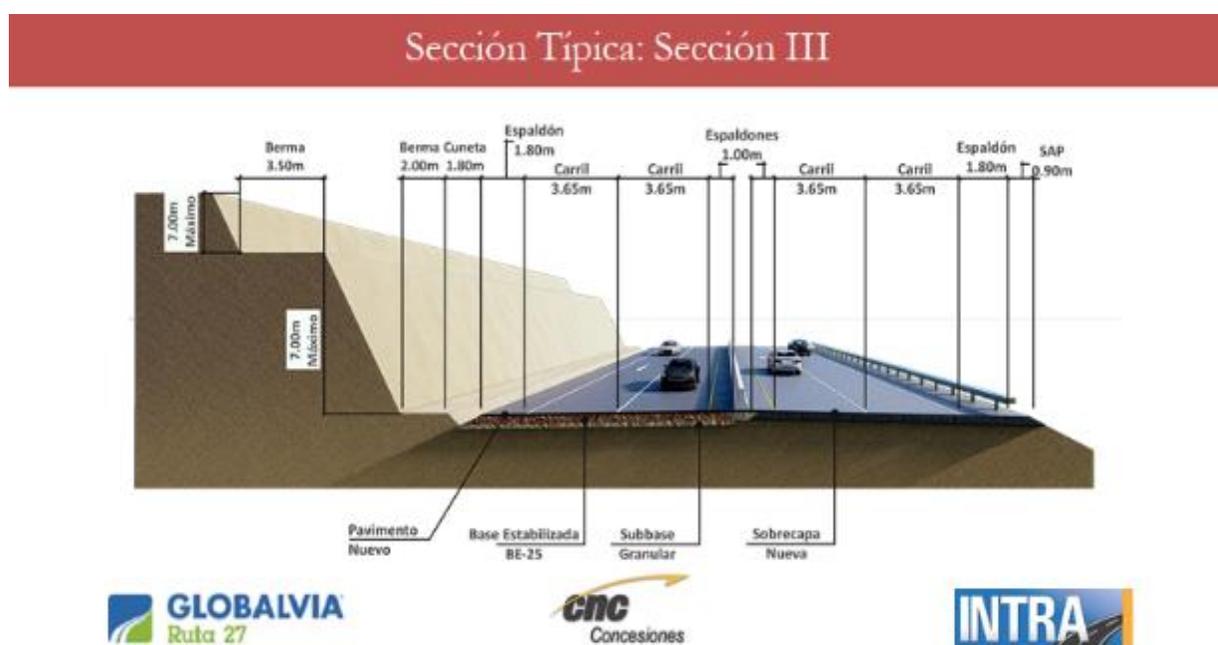
- Espaldones y separación física con barreras de concreto, soluciones especiales en taludes y

calzada.

- Construcción de un nuevo puente mayor sobre quebrada concepción y sobre Quebrada Salitral, entre otras.

En la carta de entendimiento para el proceso de negociación de los estudios que permitirán la ampliación de las Ruta Nacional 27, firmada por el ministro de Obras Públicas y Transportes, Rodolfo Méndez Mata, y el director general adjunto de Globalvia, Carlos González Álvarez, se indica que se han identificado inicialmente la radial de El Coyol como la de Atenas y que estarán sujetas a la debida valoración durante la negociación, que contemple la posibilidad de retirar dichas obras como parte de la concesión.

Figura 1 – 7. Sección típica del tramo III.



Fuente: Globalvia, 2021

1.2 Planteamiento del Problema

Las condiciones climáticas atípicas que se han dado en los últimos años producto del cambio climático han repercutido activamente en aspectos como la salud, el medio ambiente y la economía. Dada la preocupación de la mayoría de los países de los efectos que estos acontecimientos provocan, se ha venido generando una tendencia mundial hacia una economía circular con el objetivo de lograr mayor eficiencia en los procesos y un mejor aprovechamiento de los recursos de manera responsable con el medio ambiente.

El consumo desmedido del ser humano ha acelerado el deterioro del planeta. Diferentes organizaciones a nivel mundial han realizado múltiples investigaciones que permiten estimar la capacidad de regeneración del planeta y la calidad del medio ambiente. Según el estudio realizado por la organización “Global Footprint Network”, pioneros en el tema de huella ecológica, Costa Rica cuenta con un déficit, su demanda de recursos para el consumo por persona es de 2,5 gha (Hectárea global), superando así la capacidad regenerativa de sus ecosistemas, la cual se estima en 1,6 gha por persona.

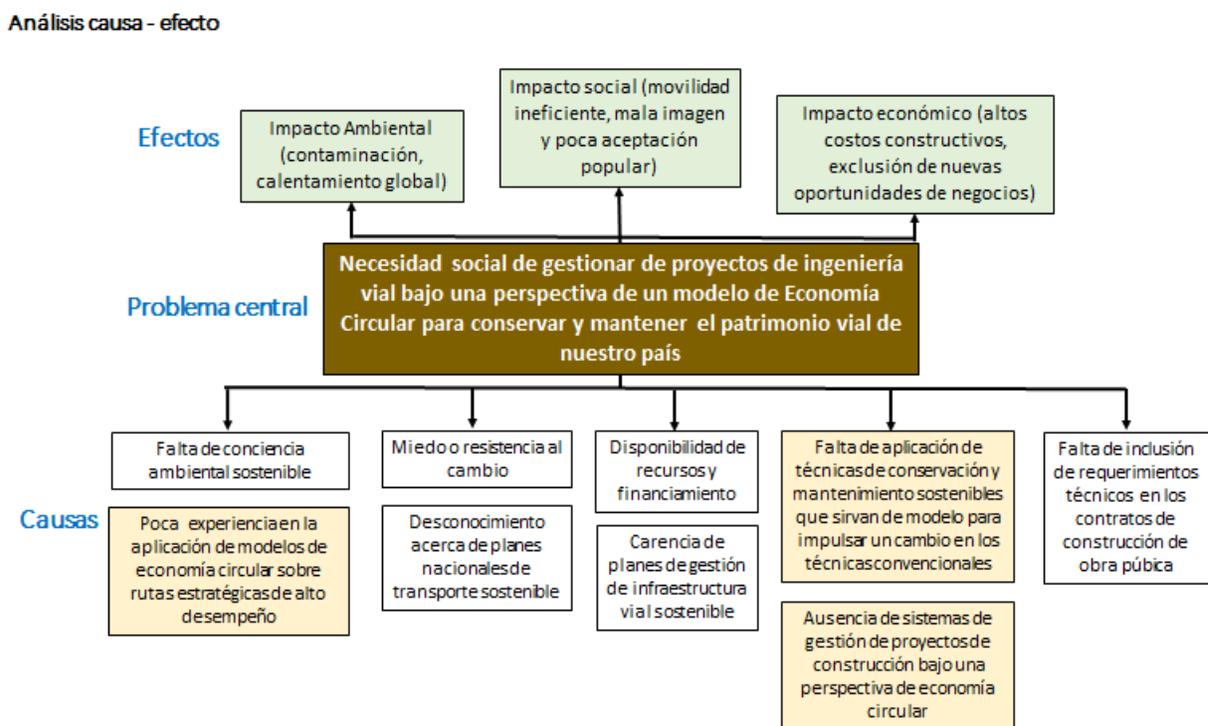
En Costa Rica, según datos tomados del Plan Nacional de Transportes 2011-2035 la Red Vial Nacional y Cantonal ronda los 40.000 km (sin contar viales urbanos, calles de travesía y cuadrantes urbanos), de los cuales, cerca de 10.000 km están pavimentados mientras los restantes 30.000 km se mantienen en lastre, (MOPT, 2011). Tomando estos datos como insumo y usando cálculos conservadores surgen las siguientes interrogantes: ¿Qué porcentaje de estos 18 millones de toneladas de Mezcla Asfáltica Caliente (MAC), responden al Modelo de Economía Circular?, ¿Estamos actualmente los ingenieros viales promoviendo la

aplicación de técnicas de mantenimiento y conservación sostenibles en nuestros proyectos?, ¿Son tan buenas las bondades de los materiales reciclados cómo de los materiales vírgenes que se utilizan para construcciones nuevas?.

La economía circular permite ahorrar energía, reducir costos para productores y consumidores, aliviar la presión antrópica frente a los recursos naturales, fomentar la innovación tecnológica, creatividad y competitividad y crear nuevos ejemplos y sectores en la economía. Desafortunadamente, a la luz de la investigación realizada, pensar que un 1% de la red pavimentada se adapta con el modelo económico descrito es ostentoso, no se encontraron registros de carreteras o licitaciones que se ajusten al modelo descrito. Afortunadamente, con profesionales que han hecho un valioso aporte teórico y práctico a través de guías y manuales de diseño que se encuentran disponibles en plataformas digitales de instituciones como LANAMME y Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), no obstante, a pesar de contar con las herramientas para impulsar el desarrollo de una ingeniería vial sostenible se debe impulsar con más fuerza la aplicación de técnicas sostenibles de conservación y mantenimiento de pavimentos.

En la figura a continuación, se representa el esquema de causa y efecto establecido entorno al problema identificado:

Figura 1 – 8. Análisis causa y efecto



Fuente: Propia, 2021

1.3 Justificación del estudio

A nivel mundial, el tema del cambio climático ha tomado fuerza en las agendas políticas de un gran número de países. Su impacto en los últimos años ha obligado a aquellos que lideran puestos de poder a implementar estrategias sostenibles. Dentro de los movimientos que han surgido, destacan acuerdos como el protocolo de Kioto (2005), los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015) y los acuerdos de París (2016), que nacen con el objetivo de reducir la generación de residuos, emisiones de gases de efecto invernadero y la huella ecológica, además de fomentar el uso de energías alternativas renovables.

La economía circular permite ahorrar energía, reducir costos para productores y consumidores, aliviar

la presión antrópica frente a los recursos naturales, fomentar la innovación tecnológica, creatividad y competitividad y crear nuevos ejemplos y sectores en la economía. Un giro hacia un modelo circular podría generar en los próximos cinco años, según el “World Economic Forum” (2017), un trillón de dólares solo en ahorros de materiales, generar más de cien mil nuevos empleos y evitar hasta cien millones de toneladas de residuos. Estas cifras justifican replantear la transición a un modelo circular y deberían atraer la atención del sector público y del sector privado por igual.

El objetivo de sustituir productos unidireccionales por productos «circulares por diseño» y generar redes de logística inversa y otros sistemas para respaldar la economía circular es un potente estímulo para las nuevas ideas. Entre las ventajas de una economía más innovadora se incluyen unas mayores tasas de desarrollo tecnológico, materiales, mano de obra y eficiencia energética mejoradas, y más oportunidades de beneficios para las empresas (MacArthur, 2015).

Los ingenieros que gestionan proyectos de infraestructura vial enfrentan un reto y, además tienen la responsabilidad social de desarrollar proyectos en una década de acción que exige acelerar las soluciones sostenibles dirigidas a los principales desafíos del mundo; desde la pobreza y la igualdad de género, hasta el cambio climático, la desigualdad y el cierre de la brecha financiera mediante la implementación de los ODS. Es fundamental desarrollar estrategias de desarrollo que garanticen y resguarden el capital natural a través de la innovación y la implementación de modelos circulares que optimicen los rendimientos de los recursos. A través de esta investigación, se pondrá en práctica la inclusión de productos reciclados como material para la construcción de pavimentos en una ruta de alto tránsito vehicular que conecta San José con el principal y más grande puerto marítimo costarricense en la costa del Océano Pacífico.

El pavimento asfáltico reciclado (RAP), extraído durante las operaciones de mantenimiento vial, conocido en nuestro país como perfilado o escarificado es una de las fuentes más importantes de economía circular y resiliencia que existen cuando es reutilizado ya sea en adición a materiales nuevos o por sí sólo, como capa de componente de pavimento (Loría, 2021).

Muchas empresas reconocidas a nivel mundial como Coca-Cola, Reault, H&M, Nike; están adoptando sistemas bajo los principios de economía circular. Coca-Cola anunció dentro de sus objetivos, para el año 2030 reciclar una botella por cada una que vendan, detallada en su iniciativa global “Un mundo sin residuos”. El objetivo de la compañía es invertir dólares y habilidades de marketing para ayudar a las personas a entender qué es reciclar, cómo reciclar y dónde reciclar. Creen en la economía circular, donde el plástico, el vidrio y el aluminio se reutilizan muchas veces en lugar de ser usados una vez y luego desechados (Alvarado, 2019).

Para en el año 2018 el Centre for Regenerative Design and Collaboration (CRDC) en alianza con Constructora Pedregal, desarrollaron una solución única para la crisis del plástico llamada Resing8, conocido comercialmente en Costa Rica como Eco-Arena la cual consiste en una extrusión de plástico, ceniza y cal hidratada, este material se produce con partículas de plástico regenerado a partir de material reciclado (Pedregal, 2021). Si se toma en cuenta que hoy en día cerca del 90% de los contaminantes del mar son desechos plásticos, es de suma relevancia ir sacando este material del estado de desecho y reutilizarlo como material de aporte a la mezcla asfáltica con la que construimos y preservamos nuestro patrimonio vial.

El impacto del sector construcción, sobre el cambio climático en el planeta es un factor determinante ante la cuarta revolución industrial, que busca enfrentar a través de la innovación, un modelo económico eficiente y sustentable. Con el desarrollo de la presente investigación se busca guiar y obtener conocimiento

que impulse la integración de elementos de la economía circular en la gestión de proyectos de ingeniería vial.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) estimó que el reciclaje puede contribuir notablemente en la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI), utilizando materiales secundarios, a través de la reducción directa del consumo de energía en el proceso de producción (materiales como el vidrio, papel y plástico), evitando la extracción, transporte y procesamiento de las materias primarias.

Al aplicar el concepto de economía circular en los proyectos se beneficia al planeta ante la crisis ambiental que se vive actualmente, salvaguardar los recursos y las materias primas es fundamental para continuar con la vida humana. Se necesita un cambio de paradigma en los modelos de negocios, que busque trascender a la creación de valor no solo económico, sino también social y ambiental.

1.4 Objetivos

A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos del proyecto.

1.4.1 Objetivo general

- Evaluar mediante la construcción de paños de prueba a escala real, la utilización de prácticas sostenibles para la conservación, mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos de la Carretera San José – Caldera, Ruta Nacional N°27.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades volumétricas y mecánicas (convencionales y dinámicas) de la mezcla asfáltica caliente modificada con Eco-Arena como filler de aportación mediante la construcción de cuatro paños de prueba a escala real en la vía troncal de la Ruta 27.
- Construir un paño de prueba aplicando la técnica de estabilización de RAP y material existente con emulsión asfáltica y comparar su funcionalidad versus un tratamiento superficial bituminoso de dos capas (TSB2) existente, como solución sostenible para la rehabilitación de calles marginales de la Ruta 27.

1.5 Alcance y Limitaciones

A continuación, se presentan los alcances y limitaciones del presente proyecto.

1.5.1 Alcance

Para determinar la viabilidad, funcionabilidad y relevancia de la aplicación de técnicas de conservación y mantenimiento sostenibles y su integración con el modelo de economía circular aplicada en el sector de ingeniería vial, se realizó una investigación tanto a nivel nacional como internacional. Se recopiló algunos casos de éxito relevantes para evidenciar los beneficios que se han logrado al incorporar los principios del modelo de Economía Circular. Mediante el uso de guías de diseño generadas por el LANAMME UCR, la caracterización de los materiales disponibles, realización de pruebas de control y aseguramiento de la calidad tanto de campo como en laboratorio, se busca crear confianza y respaldo

técnico por parte de otros profesionales en la aplicación de los proyectos que se realizarán en función de los objetivos específicos establecidos, de manera que, esta experiencia pueda ser aplicada en proyectos similares.

1.5.2 Limitaciones

Dentro de las limitaciones de este trabajo, los resultados se dirigen a replantear la gestión de proyectos utilizando los principios de la economía circular. No existe mucha información sobre la aplicación del modelo en conjunto con la gestión de proyectos de construcción. La mayor parte de esta propuesta para adoptar principios de la economía circular toma como base los avances de los países miembros de la Comisión Europea.

La falta de presupuesto para el desarrollo del proyecto de investigación no permitió la inclusión de ensayos de módulo dinámico o resiliente.

Hubiese sido deseable la construcción de más paños de prueba de MAC con Eco-Arena en las secciones I y II del proyecto dado que estos puntos presentan condiciones de tránsito y clima muy diferentes a las del sector donde se construyeron los paños de prueba de esta investigación.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el ordenamiento lógico de conceptos e información recopilados de fuentes artículos científicos, publicaciones, trabajos de posgrado, guías de diseño, entre otros, que permitieron conocer los alcances realizados por otros investigadores sobre los temas abordados en este proyecto

2.1 Pavimentos

2.1.1 Definición, concepto y componentes

El pavimento corresponde a una estructura estratificada por medio de la cual se movilizan los actuales medios de transporte de un lugar a otro sobre su capa superior, llamada superficie de ruedo. Está constituida por varias capas horizontales dependiendo de la estructura por construir, conformadas a su vez por materiales adecuados y debidamente compactados. Los pavimentos tienen la función principal de transmitir los esfuerzos generados por el tránsito y llevarlos al suelo de fundación a través de las diferentes capas que los componen, sin que exista alguna falla en los materiales o la estructura en sí.

2.1.2 Funciones de un pavimento

A continuación se enumeran algunos de los requisitos que deben cumplir los pavimentos aparte de la transmisión de carga a las capas inferiores:

- Resistencia ante factores ambientales
- Resistencia al desgaste ante el paso del tránsito
- Brindar comodidad a los usuarios que transiten sobre el pavimento, presentando regularidad longitudinal y transversal.
- Dar seguridad a los usuarios a través de una textura superficial adaptada a las velocidades de circulación.
- Drenar eficientemente el agua con sistemas adecuados para tal fin.
- Debe reflejar la luz o tener componentes o señales reflectoras para seguridad de los usuarios.
- Garantizar durabilidad.
- Poseer una superficie uniforme que minimice los efectos del ruido del contacto entre el neumático y el pavimento.
- Deber ser económico, pero sin afectar las demás funciones.

2.2 Tipos de Pavimentos

En general, se tienen tres tipos de pavimentos de uso frecuente y su selección depende de las características propias de cada proyecto, presupuesto y disponibilidad de recursos.

2.2.1 Pavimentos Flexibles

Están constituidos por varias capas, que permiten una distribución de esfuerzos, inducidos por el tránsito, hasta el terreno natural sin que estas sufran deformaciones. Estructuralmente sus capas se colocan en orden descendente, de acuerdo con su capacidad de carga, las cuales son:

- Carpeta asfáltica: Es el elemento visible de los pavimentos flexibles, las cargas debido al

tránsito generan grandes deformaciones en ella.

- Base: Está ubicada bajo la carpeta de rodamiento, se encarga de absorber la mayor parte de los esfuerzos, debido a las solicitaciones del tránsito, es por ello por lo que para solicitaciones bajas o medias se usan bases granulares tradicionales, mientras que para tránsito pesado, se utilizan bases tratadas con algún cementante.
- Subbase: Se encuentra entre la base y la subrasante, encargada de brindar un apoyo uniforme y permanente.
- Subrasante: Debe ser constituido por suelos compactables, tal que se obtenga al menos un 95% de compactación, ya que debe de brindar estabilidad a las otras capas y absorber los esfuerzos que le lleguen.

2.2.2 Pavimentos semirrígidos

En términos amplios, un pavimento semirrígido o compuesto es aquel en el que se combinan tipos de pavimentos diferentes, es decir, pavimentos “flexibles” y pavimentos “rígidos”, normalmente la capa rígida está por debajo y la capa flexible por encima. Es usual que un pavimento compuesto comprenda una capa de base de concreto o tratada con cemento Portland junto con una superficie de rodadura de concreto asfáltico

2.2.3 Pavimentos Rígidos

Son aquellos en los que la losa de concreto de cemento Portland (C.C.P.) es el principal componente estructural, que alivia las tensiones en las capas subyacentes por medio de su elevada resistencia a la flexión, cuando se generan tensiones y deformaciones de tracción de bajo la losa producen su fisuración por fatiga, después de un cierto número de repeticiones de carga. La capa inmediatamente inferior a las losas de C.C.P. denominada subbase, por esta razón, puede ser constituida por materiales cuya capacidad de soporte sea inferior a la requerida por los materiales de la capa base de los pavimentos flexibles.

Estos pavimentos están compuestos por agregados gruesos, finos, arenas, polvo de piedra y cemento asfáltico. Su temperatura de fabricación, colocación y fabricación depende de la viscosidad del asfalto utilizado. Posee bajo contenido de vacíos (4% generalmente). Estas mezclas pueden ser utilizadas, por su composición, en: capa de rodadura o base asfáltica.

2.3 Deterioro de pavimentos

Según el Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica (MAV-2016) elaborado por el MOPT, los deterioros que se presentan en una estructura de pavimento disminuyen el confort percibido por el usuario y la vida útil de la estructura del pavimento, estos surgen por las condiciones ambientales y de tránsito durante un periodo de servicio, o por, deficiencia en la calidad de los materiales y/o defectos constructivos que pueden afectar negativamente su desempeño y en consecuencia generar deterioros prematuros.

La evaluación visual de un pavimento brinda información sobre la condición de la estructura y puede ayudar a indicar las posibles causas de los deterioros mostrados. La realización periódica de evaluaciones visuales de un pavimento es una herramienta fundamental en el proceso de evaluación del desempeño y

pronóstico de vida útil de un pavimento.

Existen múltiples catálogos de daños que presentan metodologías para establecer un diagnóstico sobre la patología de los pavimentos; algunos aplican un sistema de calificación cuantitativa que permite establecer índices de deterioro del pavimento. Al establecer un ordenamiento y definición de los tipos de daños, así como la identificación de su causa y origen, permite orientar las labores de corrección a través de actividades de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción, según sea el caso.

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés (American Society for Testing and Materials o ASTM International), es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios. Esta sociedad presenta mediante la norma ASTM D6433 el procedimiento estandarizado para determinar el Índice de Condición del Pavimento (en inglés Pavement Condition Index) o PCI de carreteras y estacionamientos. El cálculo de este indicador constituye la metodología más compleja para la evaluación y calificación de carreteras dentro de los modelos de gestión vial disponibles en la actualidad. El PCI es un índice numérico entre 0 y 100 como se muestra en la imagen a continuación:

Tabla 2 – 1. Estado del pavimento en función del indicador PCI.

Rango PCI %	Color	Estado
0-10	Grigio	Falla
11-25	Naranja	Muy Malo
26-40	Rojo	Malo
41-55	Rosa	Regular
56-70	Amarillo	Bueno
71-85	Verde	Muy Bueno
86-100	Verde Oscuro	Excelente

Fuente: Propia, 2021.

2.3.1 Deficiencias en pavimentos flexibles

Tabla 2 – 2. Deterioros en el pavimento flexible

Deterioros en el pavimento flexible	
<p>Grietas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuero de lagarto/Grietas por fatiga • Grieta longitudinal y transversal • Agrietamiento por reflejo de juntas • Grietas en bloque • Grietas de borde • Grietas en arco <p>Textura superficial</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exudación • Pulimiento de agregados • Desprendimiento de agregados • Desgaste superficial 	<p>Deformaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Roderas/Ahuellamiento • Abultamientos y Hundimientos • Corrugación • Depresión • Corrimiento / Desplazamiento • Hinchamiento <p>Misceláneos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Escalonamiento entre la calzada y el espaldón • Baches • Huecos • Cruce de línea férrea

Fuente: Manual de auscultación de pavimentos MOPT, 2016

Tabla 2 – 3. Deterioros en el pavimento rígido

Deterioros en el pavimento rígido	
<p>Grietas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agrietamiento lineal (longitudinal, transversal y diagonal) • Grietas de esquina • Grietas por contracción • Grietas en malla o resquebrajadura • Losa dividida <p>Deterioro superficial</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pulimiento de agregados • Desprendimiento de Agregados 	<p>Juntas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Daño en el sello de junta • Fracturas de esquina • Fracturas de junta <p>Misceláneos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Voladura (Blow up) • Escalonamiento entre calzada y juntas • Escalonamiento entre calzada y espaldón • Bombeo • Punzonamiento (Punchout) • Baches • Cruce de línea férrea

Fuente: Manual de auscultación de pavimentos MOPT, 2016

Para efecto de establecer el procedimiento a seguir para la medir los deterioros en pavimentos, se adjunta en el anexo 2 de este documento el Catálogo de Deterioros establecido en el MAV-2016.

2.4 Indicadores para pavimentos asfálticos para Ruta 27

A continuación, se exponen los indicadores y rangos de aceptación para medir el estado del pavimento asfáltico que se establecen el Contrato de Obra con Servicio Público para la Carretera San José - Caldera. El Concesionario asume la responsabilidad de mantener el pavimento dentro de los valores establecidos, tanto durante todo el período de explotación de la concesión como al término de ella.

2.4.1 Índice de Rugosidad Superficial (IRI)

Con respecto a la irregularidad superficial, se hace presente que el pavimento en servicio deberá mantener un valor del IRI menor o igual a 3.5 m/km. Se deberán efectuar las acciones de conservación antes que la media móvil de 5 tramos de 200m supere el IRI de 3.5 m/km. Para estos efectos el IRI se medirá en tramos de 500 m. El Concesionario deberá efectuar las acciones de conservación necesarias para evitar que el deterioro supere este valor.

2.4.2 Ahuellamiento

Son hundimientos que se presentan en la superficie de rodadura a lo largo de las zonas utilizadas por las llantas de los vehículos, debido a la canalización del tránsito, sobrecargas de los vehículos, deficiencias en la estructura o inestabilidad de la subrasante. Máximo permitido: 15 mm y no más de 50 m/Km.

2.4.3 Agrietamiento (%)

Se permite el 15% de superficie afectada máximo, por kilómetro. Se deberán controlar las grietas de alta severidad que causan daños estructurales en los pavimentos y se efectuarán acciones correctivas mayores, consistentes en el reemplazo de los pavimentos en el área afectada.

Grietas tipo Piel de Cocodrilo de alta severidad: Se aceptará como máximo un 10% de superficie afectada con grietas por kilómetro. Grietas transversales y longitudinales de alta severidad máximas: 10% de superficie afectada máximo por kilómetro.

2.4.4 Desprendimientos de áridos (%)

No se permiten zonas con desprendimiento de áridos.

2.4.5 Baches abiertos

No se permiten baches abierto en toda la ruta.

2.4.6 Resistencia al Deslizamiento

Un Coeficiente de fricción mínimo de 0.55 en pendientes mayores del 6% y en intersecciones, y de 0.45 en tramos rectos con pendientes menores del 6%. La evaluación de la Resistencia al Deslizamiento se realizará dividiendo la vía en Sectores de 5 (cinco) Km a los que se les realizarán mediciones de Resistencia al Deslizamiento en tangente y en curva, utilizando el péndulo del T.R.R.L., siguiendo la norma A.S.T.M. E303-69.

2.4.7 Deformaciones superficiales de Pavimentos Asfálticos

No se permite en ninguna zona del pavimento asfáltico, la existencia de corrugaciones (serie de ondulaciones constituidas por crestas y depresiones perpendiculares a la dirección del tránsito), ni de hinchamientos (abultamiento o levantamiento localizado en la superficie del pavimento), ni de hundimientos (depresión o descenso de la superficie del pavimento). Igualmente, no se aceptará ningún tipo de exudación del asfalto.

2.4.8 Espaldones

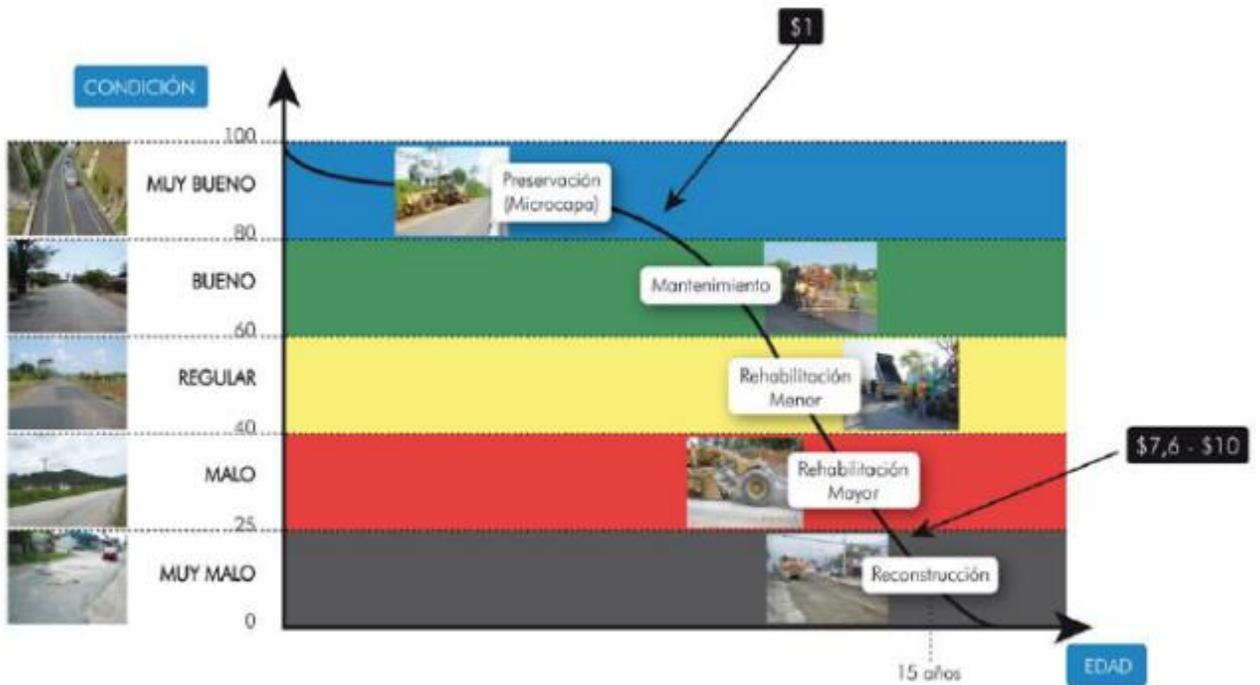
No se permitirán baches abiertos ni desniveles o escalonamientos superiores a 1 cm entre el espaldón y carril. Entre estos últimos se considera la junta entre la superficie de rodamiento y el espaldón.

2.5 Determinación de tipo de mantenimiento en función del PCI

Cuando se habla de gestión de infraestructura vial, y en específico de gestión de pavimentos, los conceptos utilizados pueden resultar técnicos y específicos. A pesar de esto, existen varios principios fáciles de comprender, que engloban la filosofía de la adecuada atención de redes pavimentadas. Los tres principios más importantes de la gestión de pavimentos son: atender las redes viales pavimentadas en el momento adecuado (dentro de su vida útil), con la técnica adecuada y en la sección adecuada. Estos principios engloban la gestión proactiva o lo que es lo mismo, el mantenimiento preventivo.

Para el caso de Costa Rica, utilizando costos de licitaciones en marcha, se realizó una estimación de la multiplicación de los costos por diferir las inversiones en mantenimiento. Esta estimación mostrada en la siguiente Figura 2-1, indica que los costos de atención del pavimento se pueden multiplicar entre 7 y 10 veces. Es decir, por cada dólar dejado de invertir en mantenimiento preventivo cuando el pavimento se encuentra en buen y regular estado, se deben invertir entre 7 y 10 dólares cuando se encuentra altamente dañado y necesita reconstrucción.

Figura 2-1. Curva de Deterioro de un Pavimento en función de su condición y tipo de mantenimiento propuesto



Fuente: Informe LM-PI-166-2016, LANAMME

Este análisis conceptual es la base para la toma de decisiones de los encargados de gestionar una red vial pavimentada y es lo que se ha indicado mediante los informes de la evaluación bienal de la red vial pavimentada que realiza el Lanamme UCR. Esta evaluación constituye un insumo de alta calidad, del cual disponen pocos países en el mundo, que indica la condición de cada sección de la red vial nacional pavimentada.

Esa es la información base para tomar la decisión de qué tipo de técnica aplicar, cuánto es la inversión

requerida y en qué plazo se puede recuperar la totalidad de la red vial nacional pavimentada. A través de análisis de proyecciones a largo plazo (20 años) sobre el nivel de inversión, el presupuesto disponible y las técnicas aplicables, se pueden elaborar planes de inversión que constituyan la hoja de ruta sobre la estrategia de atención de la red vial. Estos planes se han generado a nivel académico con éxito desde Lanamme UCR, comprobando la disponibilidad de insumos suficientes en el país para realizarlos (Rodríguez, 2016).

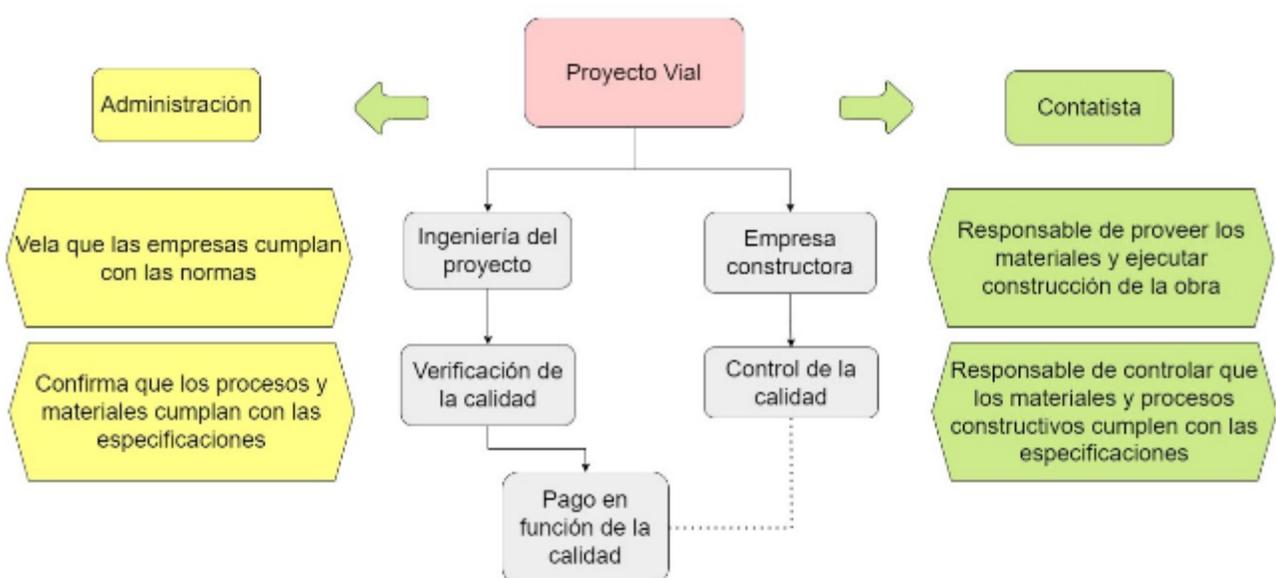
2.6 Control y aseguramiento de la calidad

Los proyectos de obras viales requieren el uso de diversos materiales en la construcción de los pavimentos y obras complementarias, por ello es fundamental evaluar y determinar la calidad de los materiales que son incorporados a la obra; así como establecer el nivel de calidad de los procesos constructivos utilizados por el constructor (contratista). Con el propósito de cumplir esta finalidad, se ejecutan ensayos a los materiales en laboratorios de control de calidad y procedimientos de inspección de los procesos constructivos. Generalmente, durante la construcción de la obra se desarrollan una serie de actividades de control de calidad por parte del constructor y como corroboración de este proceso constructivo, el dueño de la obra (en la mayoría de los casos el Estado) lleva a cabo un proceso de verificación de la calidad. Este modelo de control de calidad se ilustra y se explica con más detalle en las siguientes secciones.

2.6.1 Control de la Calidad

El control de la calidad es una labor realizada por el contratista, con el propósito de supervisar, evaluar y ajustar sus procesos de producción, para asegurar que el producto final va a cumplir con el nivel especificado de calidad con respecto a un parámetro o requerimiento establecido en el contrato del proyecto o en la normativa nacional o internacional, mediante ensayos de laboratorio y supervisión de los procesos empleados, necesarios para controlar y corregir la producción o proceso constructivo. El control de calidad incluye muestreo, ensayos, inspección y acción correctiva en caso de ser necesario.

Figura 2–2. Esquema del modelo de control de la calidad aplicado en un proyecto vial en Costa Rica



Fuente: Informe Propia

2.6.2 Verificación de Calidad

La verificación de la calidad la ejerce el dueño de la obra, que, en la mayor parte de los casos en el Estado, una dependencia gubernamental o una concesionaria. Esto consiste en ejecutar aquellos ensayos de laboratorio y procedimientos de inspección de los procesos productivos y constructivos necesarios para determinar si el producto recibido cumple con las especificaciones de calidad definidas contractualmente. Habitualmente se establece una fracción de los ensayos efectuados por el control de la calidad. Con los resultados de la verificación de la calidad se decide si la actividad debe ser aceptada, rechazada o pagada a un precio aplicando un factor de reducción.

2.6.3 Laboratorio de ensayo

Los ensayos necesarios para el desarrollo de las actividades de control y la verificación de la calidad establecidas contractualmente den ser realizadas por laboratorios que demuestren su competencia técnica mediante los mecanismos que se consideren adecuados, ya sea implementando un sistema de gestión de calidad bajo la normativa y con ensayos debidamente acreditados por el Ente Costarricense de Acreditación (ECA).

Las prácticas que se acostumbran en esta materia requieren que los laboratorios aseguren, demuestren y mantengan la capacidad y competencia técnica para ejecutar todas las actividades de control y verificación de calidad, durante las diversas etapas que comprende la construcción de una obra vial, conforme con las especificaciones contractuales. Dichos laboratorios constituyen el instrumento principal para el control y verificación de la calidad de las obras de infraestructura vial, ya que los resultados de calidad emitidos son la base para la aceptación y el pago de las obras que se realizan en los proyectos.

2.6.4 Pago en función de la calidad

Un modelo de pago en función de la calidad tiene como finalidad evaluar, analizar y determinar mediante técnicas de análisis estadístico, la calidad final y el grado de cumplimiento de los materiales evaluados con respecto a los parámetros definidos contractualmente. Lo anterior, para posteriormente definir si los materiales, obras o procesos, según sea el caso, deben ser aceptados, rechazados o pagados a un precio reducido según sea el nivel de calidad con relación a las especificaciones del proyecto.

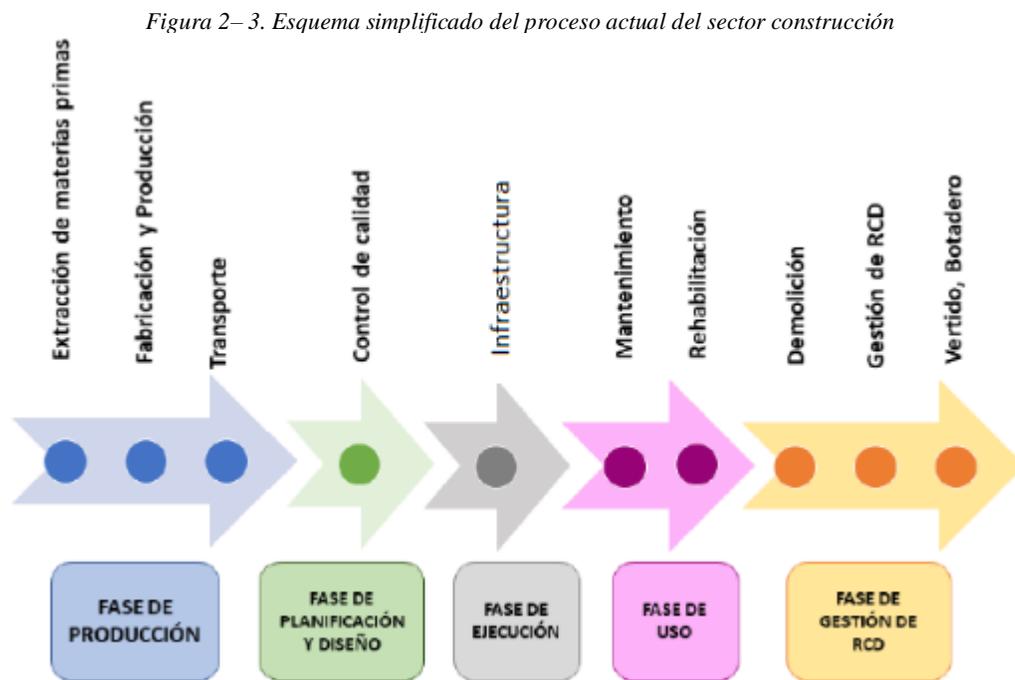
2.7 Proyectos de Construcción bajo una perspectiva de Economía Circular

Se debe considerar que el sector construcción es uno de los sectores más contaminantes y su transición hacia una economía circular significará una reducción importante de recursos e impacto ambiental, además, de una oportunidad para generar ventaja competitiva. No debe dejarse de lado el inicio y final del ciclo de vida en toda la cadena de valor, es decir, integrar a este contexto, tanto la construcción como la edificación en sí. El modelo de economía circular en el sector construcción va más allá de una gestión de residuos, incluye todo el ciclo de vida del proceso constructivo, que se puede dividir en fases críticas como lo son producción, diseño, ejecución, uso y desmantelamiento de la estructura (Alvarado, 2019).

2.7.1 Integración de Economía Circular e Ingeniería Vial

El modelo de economía circular en la ingeniería vial va más allá de la gestión de residuos, ya que incluye todo el ciclo de vida del proceso constructivo, el cual se divide en fases de producción, diseño, ejecución, uso y desmantelamiento de la estructura.

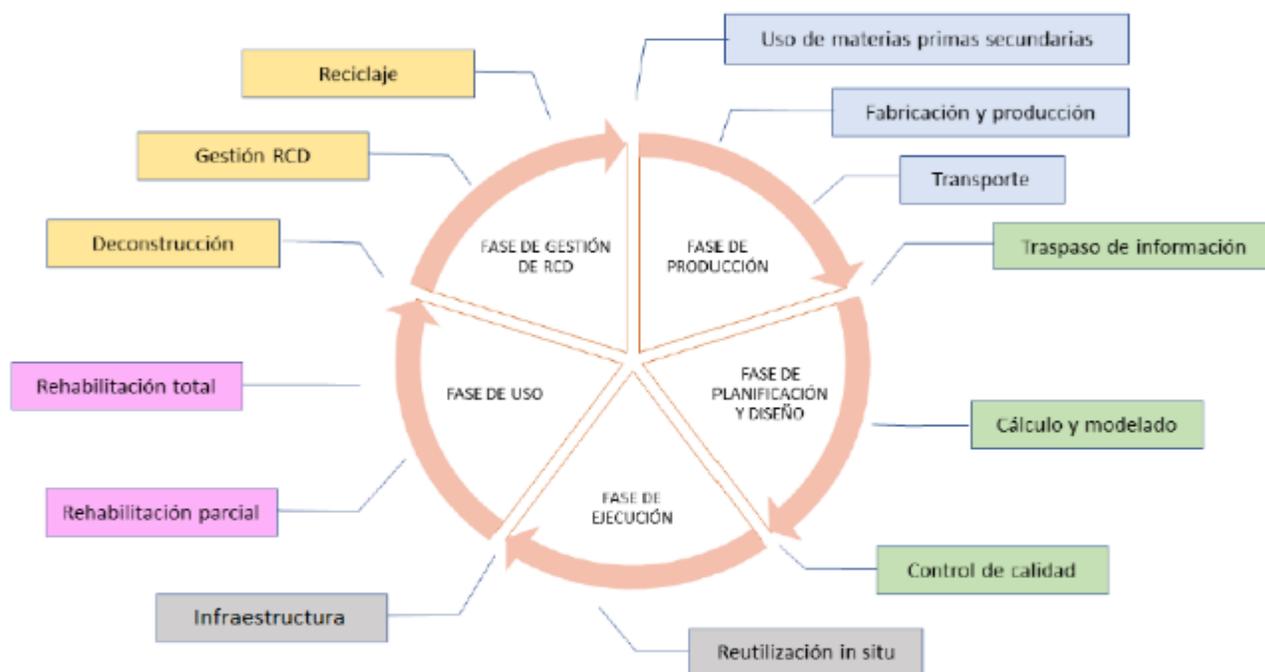
En la figura a continuación, se presenta un esquema lineal de las fases de un proceso constructivo más frecuentemente usado en el sector construcción:



Fuente: Alvarado 2019. Modificado por Acuña.

Poco a poco en la actualidad el sector construcción va emigrando a un modelo más sostenible, a través de la adaptación de nuevos procesos. La fase de producción, la de planificación y diseño, deben coordinar en forma integral todo lo que sucederá en la fase de ejecución, mantenimiento y operación. Para la Fundación Conama es fundamental el traspaso de conocimiento y el trabajo conjunto de los profesionales que actúan en estas tres fases, así como la supervisión y regulación de las distintas administraciones implicadas en la siguiente figura, se puede apreciar la propuesta desarrollada en Europa sobre un modelo circular para el sector construcción.

Figura 2– 4. Esquema simplificado del proceso futuro del sector construcción, basado en la economía circular.



Fuente: Alvarado 2019. Modificado por Acuña.

2.7.2 Beneficios medioambientales

La Fundación Ellen MacArthur generó una lista de los beneficios medioambientales que se pueden alcanzar con el desarrollo de proyectos bajo un modelo circular (MacArthur, 2015):

- Menores emisiones de dióxido de carbono. El estudio realizado por la fundación en Europa concluye que, desarrollando un modelo económico circular, para el 2030 se podría reducir un 48% las emisiones de dióxido de carbono en movilidad, sistemas de alimentación y el entorno construido.
- Consumo de materias primas. Bajo un modelo circular, podría reducirse el consumo de materiales para autos, materiales constructivos, suelo inmobiliario, fertilizantes sintéticos, pesticidas, uso de agua agrícola, combustibles, electricidad no renovable, entre otros, según la Fundación, se podría reducir el 32% para el 2030.
- Productividad y salud del suelo. A nivel mundial, el costo del deterioro del suelo se estima 40.000 millones de USD anuales, cifra que deja de lado el aumento en el uso de fertilizantes, pérdida de la biodiversidad. Un modelo sistemático a través del uso de residuos orgánicos, y la intervención controlada del suelo, ayudará a una regeneración más temprana.
- Reducción de las externalidades negativas. Podrían darse múltiples oportunidades para minimizar los impactos negativos al ambiente a través del modelo. Reversión del efecto del cambio climático, vertido de sustancias tóxicas, contaminación del agua, aire, suelo.

2.8 Técnicas de mantenimiento y conservación sostenibles para pavimentos

El propósito principal de este apartado es proporcionar una descripción general de las soluciones actuales de pavimentos sostenibles que contribuyen a reducir el impacto ambiental durante las etapas de construcción, en el uso y al final de la vida útil del ciclo de vida de los pavimentos. Además, se busca generar información sobre la evaluación de la sostenibilidad, las prácticas de éxito y su implementación, así como identificar los principales obstáculos a la aplicación más amplias de innovaciones sostenibles. La

reciclabilidad futura es un factor principal para garantizar la implementación de técnicas nuevas e innovadoras (PIARC, 2019).

El ciclo de vida típico de una estructura de pavimento se puede dividir en las fases de producción del material, diseño, construcción, fase de uso y fin de vida útil en adelante EOL que significa “end of life”. En los siguientes subcapítulos se presentan algunas de las técnicas utilizadas en cada una de las etapas para generar una mejor sostenibilidad. Se incluyen, además, recomendaciones para mejorar las soluciones de pavimentación ecológica y los materiales de pavimento sostenibles.

Tabla 2– 4. Fases del ciclo de vida del pavimento

Fase del ciclo de vida	Descripción
Diseño del pavimento	Determinación de los requisitos estructurales y funcionales del pavimento y de la composición estructural, la geometría y la selección de materiales adecuados.
Materiales	Consideración de materiales individuales utilizados en proyectos de pavimentación.
Construcción	Todos los procesos y actividades necesarios para la construcción de la nueva estructura de pavimento.
Fase de uso	Operación regular de la estructura del pavimento, incluidas las interacciones con el tráfico y el medio ambiente.
Mantenimiento / conservación	Actividades que se realizan a lo largo de la vida del pavimento que garantizan su servicio.
Fin de vida (EOL)	Retirada y/o eliminación final, reciclaje y reutilización del pavimento según alcanza el final de su vida útil.

Fuente: Asociación Mundial de la Carretera, AIPCR 2019

2.8.1 Fundamentos para fase de diseño

Las estructuras de pavimentos funcionan como una estructura de ingeniería que distribuye las cargas vehiculares y a su vez debe satisfacer los requisitos funcionales. Para lograr un adecuado comportamiento estructural, se requieren espesores suficientes y materiales de calidad capaces de soportar la variedad de cargas que se aplicarán al pavimento a lo largo de su vida útil.

Cuando se diseña una estructura de pavimento nueva, el diseñador debe considerar el periodo de tiempo durante el cual espera que el pavimento sea capaz de soportar la carga de tráfico acumulada que se producirá durante ese periodo de diseño. La vida del pavimento se expresa en el nivel de tráfico de diseño (ejes equivalentes) en lugar del periodo durante el cual ese tráfico puede darse. Generalmente, los diseños de los pavimentos se realizan de forma que haya una alta probabilidad de que el pavimento construido dure más y que no sea necesaria una rehabilitación importante o sustitución.

2.8.2 Consideraciones para diseñar un pavimento sostenible

La confianza del diseñador del pavimento en los materiales propuestos y las prestaciones del diseño es en gran medida el resultado de experiencias pasadas, tanto de manera personal como de forma empírica, obtenida por procedimientos empíricos y como mecanicista-empírico de diseño.

Se considera que una falta de experiencia u historial del comportamiento puede representar una barrera importante para la adopción generalizada de nuevos materiales para pavimentos sostenibles. Por ejemplo, el hormigón con geo-polímeros, mezclas bituminosas con alto contenidos de plásticos blandos reciclados y para los conceptos de estructura de pavimentos, las estructuras de pavimentos permeables.

Con respecto al uso de materiales sostenibles y estructuras de diseño, las cuatro áreas principales a considerar para el diseñador son:

- Especificaciones de los materiales: Para materiales bituminosos, las especificaciones básicas basadas en las prestaciones son límites establecidos en el módulo resiliente o dinámico del material, la resistencia al ahuellamiento y el comportamiento ante fatiga. La adopción de tecnologías de pavimentos sostenible es más sencilla en un entorno de especificaciones basado en prestaciones que dentro del conjunto de especificaciones prescriptivas tradicionales.
- Propiedades de diseño: El uso de materiales de pavimento sostenible en un marco de diseño empírico no es imposible, pero sí requiere que sean generalmente equivalentes en propiedades de diseño que los materiales tradicionales. Si la composición del material de pavimento sostenible específico se desvía significativamente de los materiales tradicionales, se debe considerar un programa de investigación tanto en laboratorio como en el campo.
- Consecuencias no relacionadas con las prestaciones: El diseñador de pavimentos debe ser consciente de cualquier limitación u oportunidad que pueda afectar a la selección de la estructura del pavimento y el uso de posibles materiales.
- Riesgos y recompensas debidas a las prestaciones: Un factor clave que afecta la forma en que los proyectos específicos son receptivos a los materiales innovadores son los riesgos, ya sean percibidos o reales, que el uso de nuevos materiales podría traer al proyecto.

2.8.3 Materiales

Los materiales del pavimento deben ser evaluados desde una perspectiva del ciclo de vida para determinar su contribución en la sostenibilidad de todo el sistema de pavimento. Las estrategias consideradas para preservar los materiales naturales y para reducir la energía consumida y las emisiones generadas en la producción mixta pueden clasificarse en dos enfoques principales que son estrategias de bajo riesgo (comúnmente aceptadas) y estrategias emergentes.

Se considera que las estrategias de bajo riesgo implican una modificación mínima de las propiedades estándar de los materiales y generalmente se ajustan a las especificaciones de los materiales existentes (PIARC, 2019). A continuación, se presentan algunas estrategias de bajo riesgo, según resultados revisión de literatura y encuestas aplicadas por la PIARC aplicadas a especialistas de pavimentos en 20 diferentes países del mundo.

Tabla 2– 5. Fases del ciclo de producción del pavimento

Impacto en la sostenibilidad	Estrategia / Mejores Prácticas	Objetivo
Producción de áridos	Aumentar el uso de reciclados, sub-productos o materiales de desecho.	Reducción del uso de materiales vírgenes.
Materiales de la mezcla bituminosa	Aumentar el uso de pavimento asfáltico recuperado (RAP) y tejas de asfalto recuperado (RAS). Mayores niveles de polimerización y de adición de caucho. Uso de mezclas bituminosas de baja temperatura (WMA).	Reducción o reemplazo de ligante virgen. Mejora de la seguridad mediante el aumento de la reflectividad de la superficie y reducción del ruido. Desarrollo de ligantes adecuados para la pavimentación, que mejoren el soporte estructural y prolongen la vida de las mezclas bituminosas. Reducción de la energía consumida y de las emisiones generadas en la producción de la mezcla.
Materiales del hormigón	Uso de los graduaciones mejoradas de de los áridos. Incrementar el uso de caliza Portland y cemento con adiciones. Reducción del uso del agua en la producción de hormigón. Incremento en el uso de hormigón recuperado y áridos reciclados. Avances de la durabilidad del hormigón.	Reducciones en los niveles de energía y emisiones durante la producción del ligante primario: el cemento. Ahorrar agua como recurso.

Fuente: Asociación Mundial de la Carretera, AIPCR 2019

2.8.4 Construcción

La fase de construcción abarca todas las actividades y procesos asociados con la construcción de nuevos sistemas de pavimentación, así como las actividades de mantenimiento y rehabilitación. Es fase está asociada con el uso de equipos de construcción, la ejecución de diversos procesos constructivos y la formación de la zona de trabajo. En consecuencia, deben incluirse en las consideraciones de sostenibilidad todas las emisiones asociadas con el consumo de combustible y las diferentes actividades en la zona de trabajo, así como el retraso del tráfico debido a los procesos de construcción.

2.8.4.1 Fase preparatoria

El trabajo preliminar para organizar el proceso de construcción debe iniciarse temprano, de tal manera que exista el mayor potencial para reducir estratégicamente los impactos de la construcción. Se deben considerar los siguientes aspectos, después de decidir el alcance del proyecto y otros detalles:

- a) Localización: Cuando el proyecto se lleva a cabo en una zona en la que podría dar lugar a graves perturbaciones del tráfico o dificultades para el abastecimiento de materiales en el sitio, deberán realizarse esfuerzos para mitigar estos impactos negativos: por ejemplo, trabajando con el tiempo de descanso o en jornada nocturna se podría reducir los tiempos de traslado.
- b) Optimización de los movimientos de suministro al sitio: Combinar las actividades en dos o más sitios en un perímetro cercano permite que se puede ayudar a limitar el recorrido en vacío de los camiones de suministro. La agrupación estratégica de proyectos y actividades de construcción tiende a ayudar en acelerar la entrega del proyecto, ahorrar recursos financieros.

2.8.4.2 Técnicas de construcción para reducir los impactos ambientales

Las técnicas especiales de construcción de carreteras pueden reducir significativamente los impactos ambientales. La PIARC a través del informe “Reducción de la huella de carbono de los pavimentos durante el ciclo de vida”, recomienda las siguientes técnicas:

- Para mezclas asfálticas, el uso de rodillos de compactación inteligente (IC) permite una compactación uniforme con el número de pasadas necesarias para una instalación adecuada, lo que resulta en una mejor calidad de construcción lograda con impactos mínimos.

- Para los recubrimientos de hormigón, la técnica de colocación de dos capas ofrece una construcción acelerada y una reducción en el uso de materiales vírgenes, ya que los materiales reciclados son incorporados en la capa inferior.
- El uso *in situ* de plantas de procesamiento por lotes, ofrece la ventaja de una reducción sustancial en las distancias de transporte de materiales.

2.8.5 Mantenimiento

El ciclo de mantenimiento de una carretera, desde su construcción hasta su rehabilitación o reconstrucción, requiere una cuidadosa evaluación de su sostenibilidad. La alta calidad del nuevo pavimento logrado mediante el uso de materiales de construcción de alta calidad y una construcción sin defectos puede extender el periodo de mantenimiento hasta que se necesite la primera actividad, por lo que la durabilidad esperada es un factor decisivo que influye tanto en la ingeniería como en el desempeño ambiental de la técnica de mantenimiento.

Seguidamente, se muestran algunas de las mejores prácticas, así como los desafíos y riesgos asociados:

Tabla 2–6. Mejores prácticas e incertidumbres / desafíos / riesgos e el mantenimiento de carreteras

Criterios	Mejores prácticas	Incertidumbres / retos / riesgos
Coste total del mantenimiento	<p>Selección de un pavimento con bajos requerimientos de mantenimiento.</p> <p>Mejora del diseño de la mezcla para maximizar las prestaciones.</p> <p>El control de calidad (en adelante QC) del proceso de construcción .</p>	<p>Operaciones de mantenimiento inesperadas debido a accidentes, clima extremo o deterioro prematuro.</p> <p>Los requisitos especiales (por ejemplo, pavimentos de bajo ruido) podrían tener un coste de mantenimiento más alto.</p>
Tipo de técnica de mantenimiento.	<p>Planificación de actividades.</p> <p>Para la rehabilitación, se debe considerar el reciclado in situ.</p> <p>El mantenimiento preventivo podría ser una opción, por ejemplo, el sellado preventivo por penetración de la superficie.</p> <p>Evaluación precisa de datos ambientales.</p>	<p>La durabilidad de las tecnologías disponibles difiere.</p> <p>Disponibilidad de tecnología y productos de construcción.</p> <p>No todos los tipos son técnicamente factibles.</p> <p>Disponibilidad de datos.</p>
Aspectos del reciclado	<p>Uso de materiales que permitan su reciclaje.</p> <p>Selección de un proceso de molienda que garantice el máximo porcentaje de reutilización. Para garantizar la máxima calidad de reciclaje, las capas se deben fresar una por una.</p>	<p>Componentes que impiden el reciclado por ejemplo, los aditivos desconocidos.</p> <p>Restricciones de tiempo.</p> <p>No es posible el reciclado de alta calidad, por ejemplo, el RAP no se utiliza en la misma capa que el fresado.</p>

Fuente: Asociación Mundial de la Carretera, AIPCR 2019

Cabe señalar que la durabilidad de las nuevas tecnologías, que parecen ofrecer ventajas para el medio ambiente y la conservación de los recursos, a menudo no está demostrada. Se pueden añadir algunos problemas, como las dificultades del reciclado, pero bajo los aspectos de sostenibilidad, las condiciones de contorno de una obra de construcción pueden influir en la selección de una técnica de mantenimiento. Por

ejemplo, se deben considerar las distancias de transporte hasta la planta de mezcla de cualquier RAP. Otros criterios de sostenibilidad también pueden verse influenciados por la elección de la técnica como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2– 7. Influencia tendencial de diferentes técnicas de mantenimiento en importantes criterios de sostenibilidad

Técnica de mantenimiento	Uso de energía	Intensidad de transporte	Uso de nuevos materiales	Durabilidad
Tratamiento superficial	↓	↓	→	↓
Lechada / microaglomerado en frío	→	→	→	→
Capa ultrafina de mezcla bituminosa (en caliente)	↗	↗	→	↗
Reemplazo de mezcla bituminosa (en caliente)	↑	↑	↗ to ↑ (% RAP usado)	↑
Reperfilado / Remezclado / Termoregeneración	↑	↓	↘	→

↑ tendencia alta ↗ tendencia creciente → tendencia media
 ↓ tendencia baja ↘ tendencia decreciente

Fuente: Asociación Mundial de la Carretera, AIPCR 2019

2.8.6 Fin de la vida útil

Las técnicas de pensamiento de ciclo de vida son más adecuadas para economías lineales que tienen una vida útil definida (incluidas las fases de extracción de materias primas, fabricación de materiales, construcción, conservación y eliminación de materiales). Los pavimentos son sistemas reparables con una vida útil definida, por lo que no tienen un punto final bien claro. Las decisiones sobre cuándo rehabilitar o reconstruir una sección de pavimento es a menudo una decisión económica. No obstante, el fin de la vida útil (EOL) del pavimento) se define como la “disposición final y la posterior reutilización, procesamiento o reciclaje de cualquier parte del sistema de pavimento que haya alcanzado el final de su vida útil” según la PIARCR (2019).

Cuando un pavimento llega al final de su vida útil, existen varias opciones de reciclaje, tanto para pavimentos de hormigón como de asfalto, con el fin de evitar su eliminación en un vertedero. Para evaluar los indicadores de sostenibilidad de cada opción, se debe considerar el ciclo de vida completo. Los costos económicos y ambientales para las diversas estrategias difieren según el tipo de técnica de reciclaje, las distancias de transporte, la calidad y la aplicación del material de pavimento reciclado.

2.8.6.1 Estrategias de fin de vida útil (EOL) para pavimentos mezcla bituminosa

Las estrategias de reciclado para los pavimentos de mezcla bituminosa están bien desarrolladas y se practican en todo el mundo. El reciclaje de los pavimentos de mezcla bituminosa se puede llevar a cabo en el lugar utilizando una técnica de reciclado o fuera del sitio en una planta central. Cada estrategia tiene ventajas y desventajas, pero, sin embargo, la elección de un método u otro de reciclado debe basarse principalmente por los tipos de deterioros presentes en el pavimento existente:

- a) Reciclaje en la planta o central (RCP): Es un procedimiento en el cual el material RAP se combina con áridos vírgenes, ligante virgen y agentes de reciclado en la planta de mezcla bituminosa para producir una nueva mezcla asfáltica.
- b) Reciclaje en planta central en frío (CCPR): Combina RAP con asfalto emulsionado, agente de reciclaje y se agregan nuevos áridos sin el tratamiento térmico. Aunque no es una práctica común,

se han realizado mejoras significativas a las especificaciones, la ingeniería, los equipos de construcción, y los métodos de ensayo, mejorando la fiabilidad de las prestaciones de mezclas de reciclado en frío en superficie, base o capas de subbase.

- c) Reciclaje *in situ*: Es un método que se lleva a cabo en el sitio con el material RAP obtenido del pavimento existente deteriorado. La principal ventaja de las técnicas de reciclaje *in situ* es la reducción o incluso la eliminación del transporte de material. Similar a lo comentado del RCP, hay dos técnicas para ablandar el ligante; usar calor, llamado reciclado *in situ* en caliente (HIR) o usar agentes de reciclaje llamado reciclaje *in situ* en frío (CIR). HIR consiste en calentar el pavimento de asfalto deteriorado hasta que se ablande lo suficiente como para ser escarificado o mezclado con un nuevo material adicional o un agente de reciclaje, mientras que el CIR consiste en la pulverización del pavimento existente, reduciendo el tamaño del RAP, la adición del agente de reciclaje y la colocación y compactación de la mezcla reciclada. Ambas técnicas utilizan un tren de equipamiento especializado.

2.9 Paños o tramos de prueba a escala real

Se conoce como la sección del proyecto que se construye para obtener el patrón de colocación y compactación a utilizar en la obra a fin de cumplir con los requisitos contractuales. El contratista debe presentar a la administración el procedimiento de construcción para el tramo de prueba, incluyendo colocación, acabado, y compactación de la mezcla, así como procedimientos para controlar la regularidad superficial de la mezcla.

Según el CR-2020 en el primer día de producción, se debe producir suficiente mezcla asfáltica para construir un tramo de prueba de 100 metros, de un carril de ancho, a espesor de capa deseado. El lugar de construcción del tramo de prueba deberá ser aprobado por el ingeniero de proyecto. El tramo de prueba deberá ser construido con mezcla de la producción de ese día, colocado y compactado de acuerdo con los procedimientos que se va a trabajar en la obra. La producción de mezcla deberá ser cesada hasta que el tramo de prueba sea evaluado y aprobado por el contratante.

- a) Mezcla asfáltica caliente: Se debe tomar y evaluar al menos tres muestras de mezcla asfáltica en caliente del tramo de prueba. La evaluación de dichas muestras se hará de acuerdo con la Subsección 401.17 del CR-2020. La mezcla será aceptable si todos los resultados están dentro de los límites de especificación para: contenido de asfalto, granulometría, VMA, VFA, y el factor de pago calculado para el contenido de asfalto, granulometría, VMA y VFA es mayor a 0,90.
- b) Compactación: Se deberán de tomar mediciones de densidad con densímetro nuclearla cada pasada del compactador para determinar el patrón de compactación necesario para lograr el nivel deseado de compactación. Las mediciones de compactación se deben de tomar en al menos cinco puntos dentro del tramo de prueba y núcleos de MAC deberán ser extraídos de acuerdo con la Subsección 401.17. del CR-2020. La densidad es aceptable si los resultados del ensayo cumplen los límites de especificación o el factor de pago calculado es mayor a 0,90.

El proceso de control mencionado anteriormente deberá ser repetido hasta que se obtengan resultados satisfactorios en el tramo de prueba. Si un tramo de prueba es aceptado, el material de dicho tramo se mantendrá como parte del pavimento. Los ensayos realizados al tramo de prueba no deben ser incluidos dentro de la evaluación del factor de pago de acuerdo con la Subsección 107.05. Hasta que un tramo de prueba es aceptado por el contratante, se puede iniciar el proceso de producción.

2.10 Ventajas y bondades de técnicas de conservación y mantenimiento sostenibles

2.10.1 Ventajas del RAP

El pavimento asfáltico reciclado (RAP), extraído durante las operaciones de mantenimiento vial, conocido en Costa Rica como perfilado o escarificado, es una de las fuentes más importantes de economía circular y resiliencia que existen cuando es reutilizado.

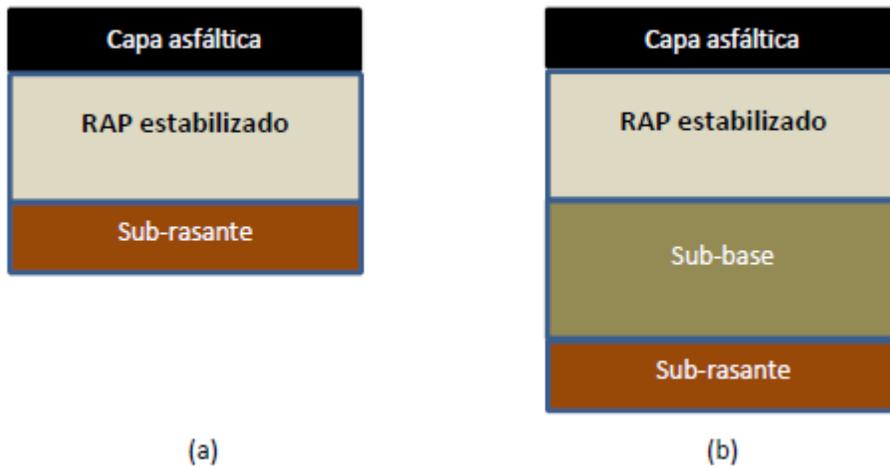
La disertación doctoral intitulada “Evaluación de métodos nuevos y existentes para determinar las propiedades del pavimento asfáltico reciclado para el diseño de mezcla” elaborada por el Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, MSc, PhD en el año 2011, indica el extraordinario valor que tiene el RAP como material para ser utilizado en adición a materiales nuevos o por sí solo, como capa componente de un pavimento. Dentro las principales ventajas que tiene se pueden enumerar las siguientes:

- Aporte de material pétreo: El agregado mineral que compone el RAP es absolutamente reutilizable. Cabe destacar, que dada la mejora de las especificaciones técnicas a finales de los años 90 y principios del año 2000, el agregado del RAP cumple con todas las propiedades de consenso de Superpave (caras fracturadas, partículas planas y elongadas, equivalente de arena y vacíos en el agregado fino), así como las de la fuente de origen como resistencia a la abrasión, solubilidades, entre otras. Este agregado pétreo recuperado puede usarse en la elaboración de nuevas mezclas asfálticas o se puede estabilizar mediante distintas técnicas (emulsión, cal, aditivos líquidos, etc)
- Disminución en la producción de agregado pétreo: Debido a la reducción de la explotación de fuentes de agregado, sea de río o tajo, lo cual le da un valor extraordinario desde el punto de vista económico y ambiental al RAP;
- Aporte de asfalto: Si bien es cierto, aún el mundo de la ciencia de pavimentos debate hasta donde el asfalto del RAP aporta en una nueva mezcla, no hay duda de que, en materiales en caliente, el asfalto antiguo se funde en cierto porcentaje con el nuevo. Esto, reduce la explotación de fuentes de asfalto, lo cual aporta en la economía, reduce el consumo de diversas formas de energía y reduce la emisión de gases a la atmósfera.
- Disminución en el consumo de energía: Como es un material que ya fue producido, no se requiere del proceso inicial de trituración, producción de asfalto, mezclado de estos componentes, entre otros procesos. Esto, disminuye el consumo de energía en el producto final.
- Diminución en la generación de gases efecto invernadero (GEI): Nuevamente, como es un material que ya fue producido, se disminuye la producción de GEI que llegan a la atmósfera y que provocan una serie de efectos detrimentos.
- Disminución del calor por efecto de la producción.
- Reducción del costo cuando se utiliza para generar otros materiales.
- Estabilización in situ. Presenta un tremendo ahorro al eliminar el costo del transporte.

Las aplicaciones del RAP son múltiples, pero es altamente posible su uso como material de base, que, en conjunto con una capa asfáltica delgada, puede generar un paquete estructural de alta durabilidad y

desempeño estructural. Por lo tanto, podrían generarse pavimentos con la siguiente configuración:

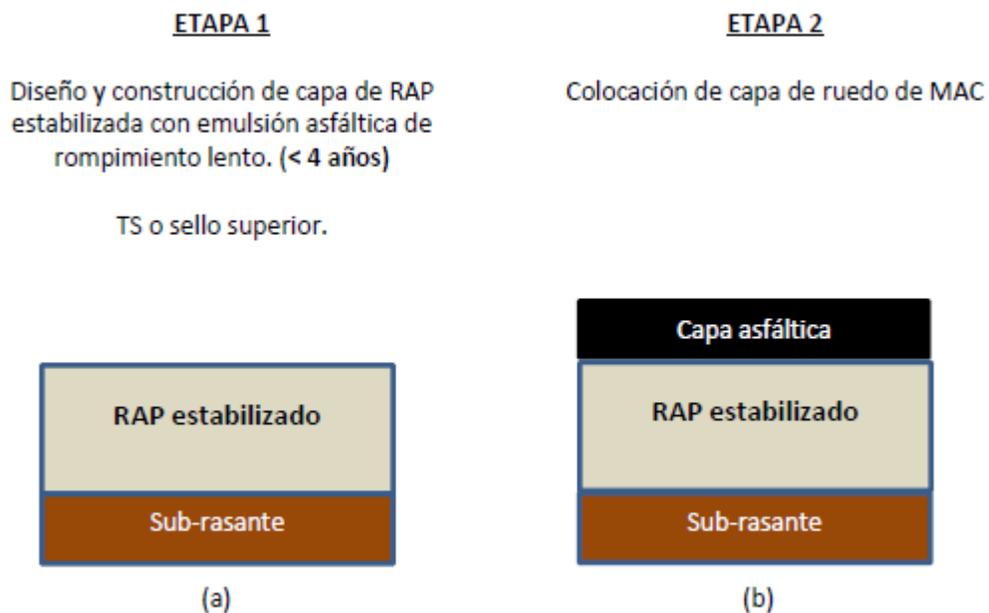
Figura 2–5. Alternativas de aplicación de rap como capa de base en un pavimento flexible.



Fuente: TAMSD-003-2021, Loría 2021.

La alternativa que se indica en la Figura 2 - 11a, e incluso la mostrada en 2 - 11b, podrían construirse en etapas, generando una capa de RAP estabilizado con emulsión, dejarla así por un tiempo unos tres o cuatro años máximo, y posteriormente, colocar la capa de rueda asfáltica. En el ínterin, se podría colocar, en caso de que el ingeniero de proyecto lo considere conveniente, un tratamiento superficial. Esto, desde el punto de desempeño del material es factible, si hay un diseño de material adecuado y un proceso constructivo bien controlado y apegado a las mejores prácticas. Se debe acorar que el TS no debe ser un condicionante para aplicar este proceso en etapas, también se podría colocar otro tipo de sello, como una arena-emulsión. Así las cosas, el proceso propuesto sería el siguiente:

Figura 2–6. Construcción en etapas.



Fuente: TAMSD-003-2021, Loría 2021.

CAPÍTULO 3 MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se explica el alcance de la investigación mediante la descripción detallada de la metodología, que contiene el tipo de investigación, las fuentes, técnicas a utilizar para la recolección, procesamiento y análisis de datos, que permitirán cumplir con los objetivos planteados en este proyecto.

Una investigación es un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno o problema (Hernández et al, 2014, p. 34). Siguiendo estos los lineamientos de orden conceptual y científico se muestra a continuación las características del estudio.

3.1 Tipo de Investigación

A continuación, se establece el tipo de estudio que se va a desarrollar para dar una orientación sobre la finalidad de esta investigación y la metodología que se va a utilizar para obtener y procesar los datos. Se establecerá el enfoque, el diseño, el tipo de datos que se van a recoger y cómo se hará. Para efectos del trabajo, se considera del tipo cuantitativa pues en según la teoría este tipo de investigación consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el propósito de establecer su estructura o comportamiento.

El enfoque cuantitativo es secuencial y probatorio. Cada etapa precede estrictamente a la siguiente imposibilitando saltar o eludir pasos. El orden es riguroso, y forma parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables; se traza un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones utilizando métodos estadísticos y se extrae una serie de conclusiones.

3.2 Diseño de la investigación

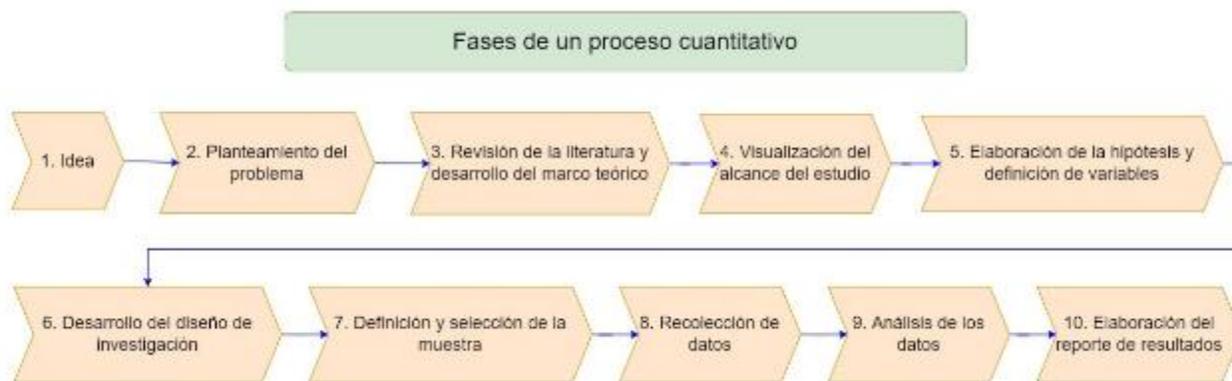
El diseño de investigación es usado para estructurar la investigación, para mostrar cómo todas las partes principales del proyecto de investigación funcionan. Esto en conjunto con el objetivo de responder a las preguntas centrales de la investigación.

Como primer paso para la generación de esta investigación se definió la problemática y su justificación, como punto de partida. Posteriormente, a través de un esquema de causa y efecto se construyeron los objetivos, tanto el general como los específicos, para establecer el propósito y los entregables del trabajo.

Se delimitó el alcance de la investigación y las restricciones o particularidades propias del proyecto. Una vez establecida la estructura de los objetivos, se procedió a realizar una investigación bibliográfica considerando fuentes como libros, guías, manuales, artículos científicos, consultas a profesionales con el objetivo de profundizar y conocer más acerca de técnicas, procedimientos, ventajas y experiencias de la conservación de pavimentos mediante técnicas sostenibles.

En la siguiente etapa se desarrolló el marco teórico a través de la recopilación de la información de libros e investigaciones de bases de datos confiables, además, en el marco metodológico, se definió el tipo de investigación realizada, los sujetos y fuentes de información utilizada, la forma en que se realizó el análisis de los datos obtenidos y el desarrollo de las etapas de la investigación en función del siguiente esquema:

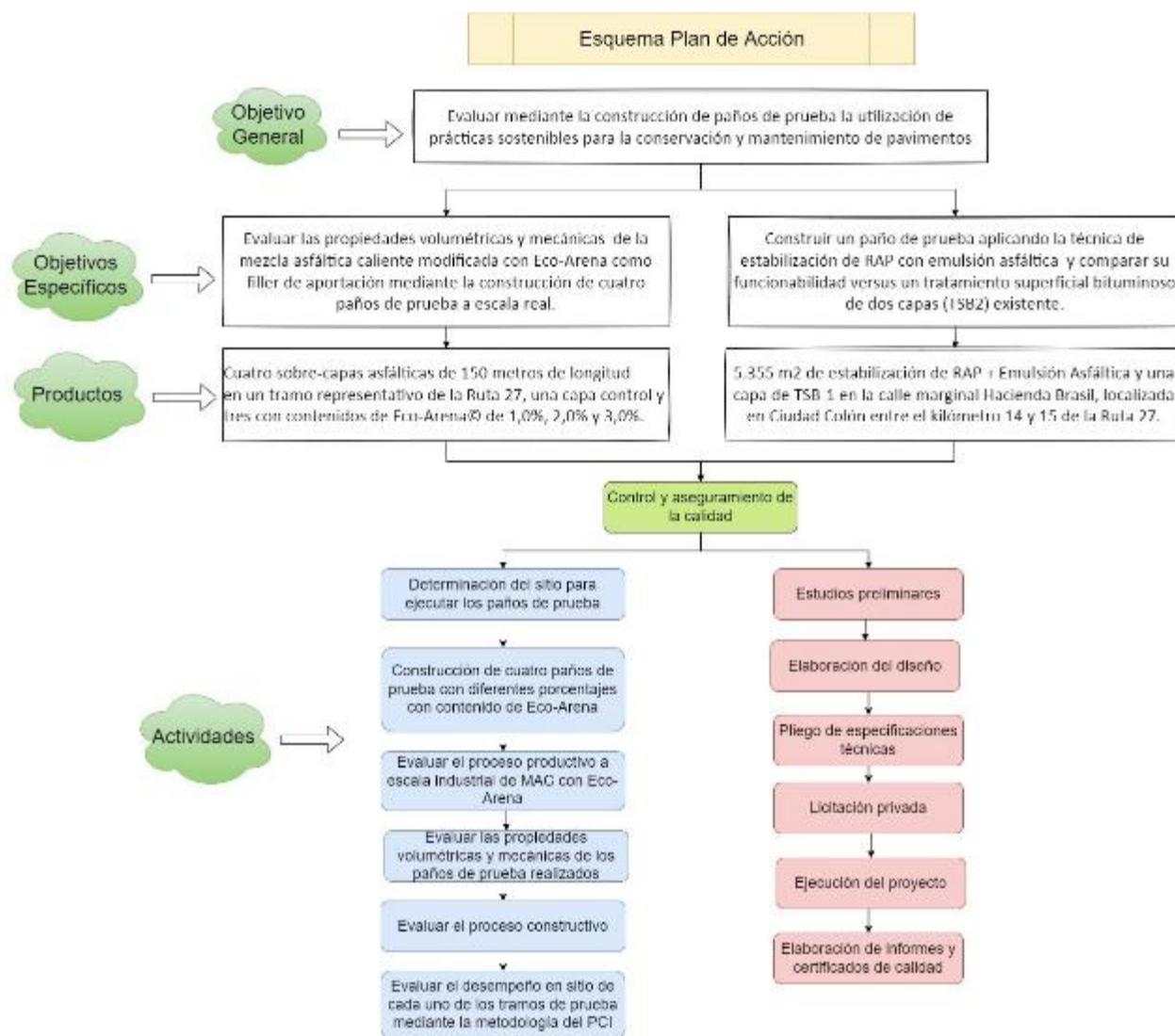
Figura 3–1. Fases de un proceso cuantitativo.



Fuente: Propia

Seguido de lo anterior, se elaboró un plan de acción en función de los objetivos específicos y productos esperados, con el cual se construyó el esquema del marco metodológico que se muestra a continuación, que se utilizó como guía para el desarrollo de este capítulo y las actividades a seguir para obtener el producto esperado.

Figura 3–2. Esquema de marco metodológico



Fuente: Elaboración propia, 2022

3.3 Fuentes y sujetos de información

En los siguientes apartados se explican los sujetos y fuentes de información que se utilizaron para el desarrollo del proyecto.

3.3.1 Sujetos de información

Los sujetos de información corresponden a los elementos, personas u objetos de estudio de quienes se obtendrán los datos. Deben ser identificados previamente para así definir el instrumento que mejor se ajuste para obtener la información requerida. Los sujetos de estudio son las personas que participaron brindando información relevante a través de los diferentes acercamientos y entrevistas no estructuradas.

Para establecer los sujetos de información se realizó un análisis de los actores a nivel nacional para conocer experiencias y recomendaciones sobre las técnicas de conservación y mantenimiento sostenibles que se aplicarán en esta investigación. Para fines prácticos de este proyecto, los sujetos de información serán:

- a) Gerentes, directores y asesores técnicos de compañías relacionadas al sector construcción, cuya experiencia albergue el desarrollo o propuestas de proyectos, que impulsen el desarrollo de soluciones más eficientes y amigables con el medio ambiente.
- b) Investigadores o académicos involucrados en estudios y proyectos que promueven la integración de modelos de economías circulares en la construcción y preservación de pavimentos.

3.3.2 Fuentes de información

Las fuentes de información son diversos tipos de documentos que contienen información para satisfacer una demanda de información o conocimiento. Estas fuentes pueden ser datos escritos, orales o datos multimedia y se clasifican en primarias, secundarias y terciarias, se describen a continuación:

- Fuentes primarias: Proporcionan datos de primera mano que se utilizan durante todo el proceso de la investigación. En el presente trabajo se utilizarán las siguientes fuentes primarias:
 - Propuesta para la construcción de tramos de prueba a escala real con Mezcla Asfáltica Modificada con Eco-Arena. Donde se extraerá los alcances del contrato, procedimientos, evaluación y seguimiento para el desarrollo del primer objetivo específico.
 - La guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (Lanamme UCR), en este documento se proponen procedimientos y especificaciones técnicas de diseño en laboratorio para materiales granulares estabilizados con emulsiones asfálticas. La aplicación de esta guía es el procedimiento por seguir para la construcción del segundo objetivo específico de esta investigación.
 - Contrato de Concesión de Obra Pública con Servicios Públicos para el Proyecto Carretera San José – Caldera, este documento contractual establece las bases de la prestación de servicios de diseño, planificación, financiamiento, construcción, rehabilitación, ampliación, reparación,

mantenimiento y conservación de la carretera San José – Caldera, Ruta Nacional N°27.

- Los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos en la agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Cada objetivo tiene metas específicas que deben de alcanzarse en los próximos 9 años.
- Investigaciones realizadas por la Fundación Ellen Mc Arthur, esto por ser los pioneros en definir e investigar formalmente sobre los conceptos de economía circular.
- Fuentes secundarias: Se refiere a compilaciones, resúmenes y listados de referencias publicadas sobre un tema de interés. Dentro de las fuentes secundarias a utilizar en la investigación:
 - Bases de datos inscritas en la biblioteca digital del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), publicaciones relacionadas con reciclaje de pavimentos, gestión de proyectos de construcción bajo un modelo de economía circular.
 - Informe de Soluciones para una Pavimentación Ecológica y Materiales Sostenibles elaborado por la Asociación Mundial de la Carretera (AIPCR) definido en el Plan Estratégico 2016-2019, este documento resume las técnicas de pavimento sostenible que se pueden incorporar a todos los pavimentos desde la etapa de diseño hasta el final de la vida útil.
- Fuentes terciarias: son documentos que reúnen nombres y títulos de revistas y otras publicaciones periódicas. Para este estudio se utilizarán:
 - Páginas WEB.
 - Memorias y presentaciones de congresos o clases sincrónicas, charlas y experiencias adquiridas.

3.3.3 Descripción de la investigación

Este proyecto corresponde a una investigación del tipo cuantitativa y los alcances son el resultado de la revisión de la literatura y de la perspectiva del estudio. Para este caso en específico dadas las características de la investigación y que la esencia del estudio sea exploratoria, contendrá elementos descriptivos por lo tanto se establecen dos tipos de alcances a describir a continuación:

- Exploratorios: Se emplean cuando el objetivo consiste en examinar un tema poco estudiado o novedoso.
 - Se investiga un problema estudiado, pero poco aplicado a escala real de manera que los gestores viales tengan la posibilidad de usarlos como referencia.
 - Con el desarrollo de este proyecto se ayudará identificar conceptos promisorios mediante la realización de ensayos de laboratorio certificados.
 - A través de la aplicación de técnicas de sostenibles para la conservación de pavimentos, se prepara el terreno para nuevos estudios que busquen optimizar procesos y sacar mayor ventaja aún de los materiales desechados.

- **Descriptivos:** Se busca especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice.
 - Considera al fenómeno estudiado y sus componentes a través de mediciones, caracterizaciones e indicadores de manera que se puedan cuantificar para posteriormente realizar comparaciones entre métodos sostenibles y convencionales.
 - Se medirán conceptos tanto en laboratorio como in situ y se tomarán muestras de materiales para posteriormente hacer una descripción de ellos y determinar a través de ensayos certificados las propiedades volumétricas y dinámicas del pavimento.

3.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Para el proceso que se llevará a cabo para lograr la ejecución de los dos productos esperados para cada objetivo específico, es que se establece el plan de recolección de datos. Es importante mencionar que todos los procedimientos para la recolección, almacenamiento, transporte y manipulación de las muestras en sitio, obedece a estrictos controles establecidos y normados que deben seguir los técnicos de laboratorio encargados de dicha actividad. Para garantizar ello se dispondrá de supervisión en todo momento, así como la contratación de laboratorios debidamente acreditados.

3.4.1 Plan de recolección de datos para primer objetivo específico

Objetivo específico: Evaluar las propiedades volumétricas y mecánicas (convencionales y dinámicas) de la mezcla asfáltica caliente modificada con Eco-Arena (RESIN8[®]) como filler de aportación mediante la construcción de cuatro paños de prueba a escala real en la vía troncal de la Ruta 27.

En 2018, el Centro para el Desarrollo Regenerativo y Colaboración (CRDC por sus siglas en inglés; <https://crdc.global/>) en asociación con PEDREGAL[®], una empresa de materiales de construcción y constructora de Costa Rica desarrolló una solución patentada y única para la crisis de los desechos plásticos llamada RESIN8[®] (R8[®]), una mezcla extruida de un 80% de plástico reciclado (de varios orígenes) y un 20% de materiales minerales (principalmente un 10% de cal y un 10% de ceniza de madera). La cal se utiliza principalmente como relleno antiséptico para eliminar cualquier contaminación que pueda contener el plástico. R8[®] se ha utilizado con éxito como sustituto de la arena en bloques de mampostería y, más recientemente, en mezcla asfáltica en caliente (MAC). La aplicación de R8[®] como aditivo para MAC ha tenido varias fases experimentales de investigación que fueron cuidadosamente diseñadas y analizadas según la información suministrada por la empresa Quebradores Pedregal S.A responsable del desarrollo de la propuesta para la concesionaria, a saber:

- Fase I: Primer diseño de MAC, mezcla producida en planta, control de calidad convencional y experimento de ensayo a escala real acelerada (tipo APT), en la Universidad de Costa Rica.
- Fase II: Investigación de laboratorio ampliada, escalas micro y macro; ensayos tradicionales de diseño de MAC y de desempeño a escala de laboratorio.
- Fase III: Pistas de prueba a escala real en el Campo Ferial de Grupo PEDREGAL[®], ensayos de desempeño, control de calidad convencional y evaluación de facilidad para reproducir el diseño de mezcla, evaluación de operaciones de acarreo, colocación y compactación de la MAC.

- Fase IV: Pistas de prueba a escala real en un tramo de la Ruta 27 (Concesión operada por Globalvía), ensayos de desempeño, control de calidad convencional y evaluación de facilidad para reproducir el diseño de mezcla, evaluación de operaciones de acarreo, colocación y compactación de la MAC.

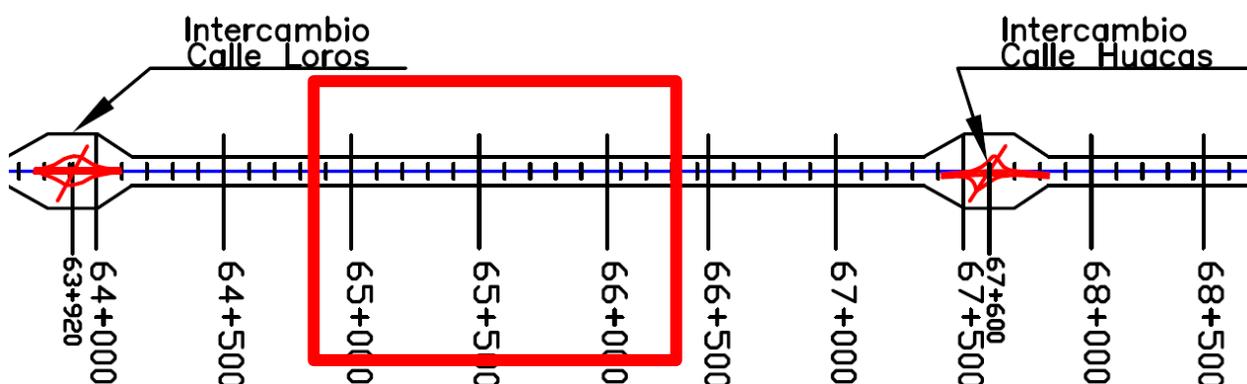
3.4.1.1 Descripción del experimento

A través de una alianza entre Constructora Pedregal y Globalvía establecida mediante un contrato de servicios firmado en septiembre 2021 por las partes, se desarrolló en la ruta 27 un plan piloto donde se realizó la colocación de mezcla asfáltica con contenido de plástico en una de las carreteras de mayor importancia de la Red Vial Nacional. En diciembre del 2021, se produjeron y colocaron cuatro tramos de mezcla asfáltica en caliente de 150 m de longitud entre los kilómetros 65+000 y 66+000 en un sector de alta carga de tráfico, en donde se sitúa una zona industrial y centros de logística de contenedores. Adicionalmente, las condiciones climatológicas del sector presentan una temperatura considerablemente alta ya que se ubica a tan solo 10 km del puerto Caldera.

El plan piloto de colocación y producción de mezcla asfáltica con R8[®] en la Ruta Nacional N°27, comprendió 472 toneladas distribuidas en cuatro tramos de 150 metros de longitud con dosificaciones entre 1%, 2% y 3% de R8[®], en total se utilizaron 1700 kg de este material reciclado, lo cual es el equivalente a 57,200 botellas de plástico que fueron recolectadas a lo largo de la vía a través de las móviles de patrullaje y posteriormente incorporadas a la mezcla asfáltica con la cual se le dio mantenimiento a la carretera en uno de sus tramos. Los diseños de mezcla fueron debidamente seleccionados y se dosificaron mediante un sistema automatizado que garantiza la continuidad de la mezcla a lo largo de todo el proceso productivo. El R8[®] se dosifica como un agregado adicional con lo cual se garantiza su completa integración a la mezcla sin causar problemas de segregación. El diseño de la mezcla asfáltica utilizado en este proyecto es para vías de alto tránsito pesado que busca garantizar la mayor durabilidad de la carretera, el R8[®] es un agregado que tiene características muy similares a los agregados comunes utilizados en la construcción y su reacción ante el calor de la mezcla asfáltica le permite integrarse a la misma, reteniendo el así el calor y logrando una buena temperatura de colocación en sitio. Al combinarse este material con el asfalto, se busca mejorar su desempeño mecánico y durabilidad

El área de estudio se muestra a continuación (micro localización):

Figura 3– 3. Área de estudio, km 65-66, Ruta 27



Fuente: Globalvía 2021

En noviembre del 2021, se generó una visita al sitio de obra y mediante la técnica de la evaluación visual se determinó que las capas inferiores del pavimento no presentan deterioros importantes. No obstante, la capa superior sí presentaba daños como los siguientes:

- Agrietamientos de diverso origen como fatiga o reflejo de grietas
- Agrietamiento tipo cuero de lagarto
- Deformación permanente en grado de severidad media
- Desprendimiento de agregados en algunas zonas localizadas
- Daño por humedad en algunos puntos que presagian la aparición de baches en el corto plazo.

A continuación, se muestran algunas fotografías para ilustrar los deterioros indicados:

Figura 3-4. Deterioros localizados, km 76, Ruta 27



Fuente: Propuesta Pedregal 2021

En tres de los tramos se usó Eco-Arena© como filler de aportación para evaluar el desempeño de estas capas modificadas respecto de una capa control. Para tal efecto, se produjeron mezclas asfálticas con las siguientes características:

Tabla 3–1. Tratamientos experimentales

Tratamiento Experimental (Tipo de MAC)	Porcentaje de Eco-Arena® (%)
Control	0,0
Tramo A	1,0
Tramo B	2,0
Tramo C	3,0

Las mezclas tendrán un tamaño máximo de 19 mm y se colocarán en un espesor de 6,0 cm.

Fuente: Propuesta Pedregal 2021

3.4.1.2 Objetivos del experimento

Los principales objetivos de la colocación de los tramos con Eco-Arena en Ruta 27 se presentan a continuación:

- a) Colocar cuatro sobre capas asfálticas en el kilómetro 76 de la Ruta 27, una capa control y tres con contenidos de Eco-Arena© de 1,0%, 2,0% y 3,0%.
- b) Evaluar el proceso productivo a escala industrial de mezclas asfálticas que contengan Eco-Arena.
- c) Evaluar las propiedades volumétricas y mecánicas (convencionales y dinámicas) de las mezclas asfálticas producidas.
- d) Evaluar el proceso constructivo de las mezclas asfálticas producidas.
- e) Evaluar el desempeño en sitio de cada uno de los tramos de prueba mediante ensayos in situ y la metodología del PCI (índice de Condición de Pavimento).

3.4.1.3 Plan Experimental para los Tratamientos de MAC producida en Planta

A continuación, se describe el plan de trabajo por desarrollar compuesto por tres actividades generales:

Actividad 1: Plan Experimental

El plan experimental fue dividido en tres componentes principales que son: 1. Evaluación de MAC de planta y su proceso productivo, 2. Evaluación del proceso constructivo y, 3. Seguimiento de desempeño in situ en los tramos a escala real construidos. El diseño experimental incluye la realización de ensayos convencionales, así como ensayos mecanicistas para las capas de MAC producidas. Igualmente, se realizarán ensayos de resistencia retenida al daño por humedad mediante la tensión diametral retenida (AASHTO T 283).

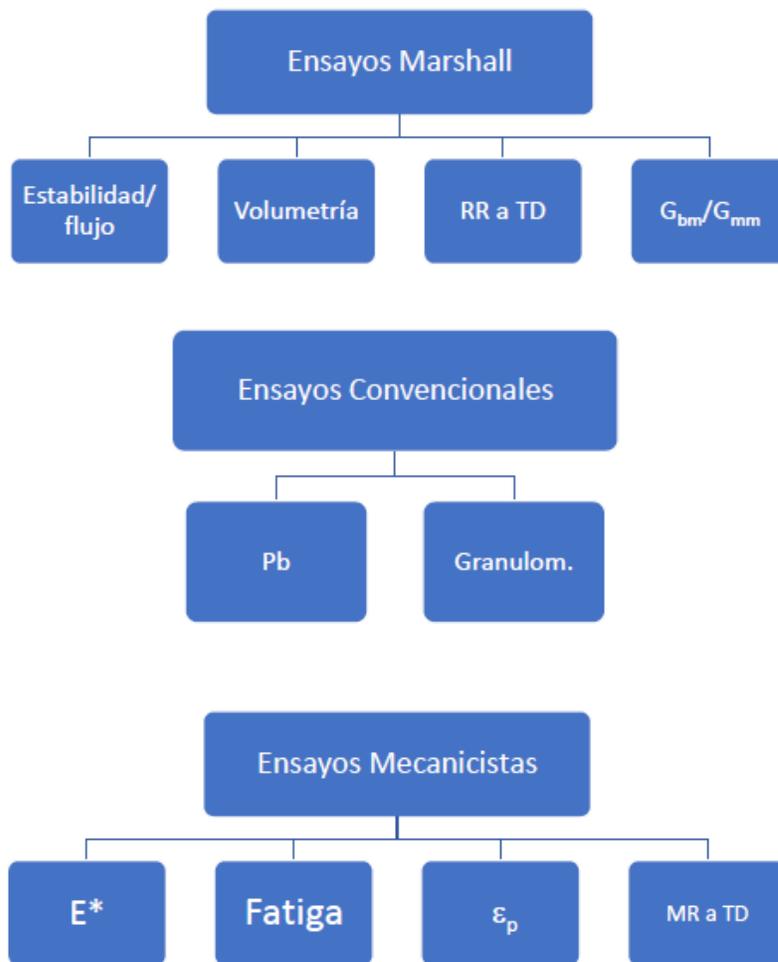
Plan Experimental para los Tratamientos de MAC producida en Planta

Los ensayos sugeridos para la MAC en los cuatro tratamientos son:

1. Ensayos Marshall o convencionales
 - 1.1. Estabilidad/flujo Marshall (AASHTO T 245)
 - 1.2. Gravedad específica bruta y absorción del agregado grueso (AASHTO T 85)
 - 1.3. Gravedad específica bruta y absorción del agregado fino (AASHTO T 84)
 - 1.4. Gravedad específica bruta Marshall (AASHTO T 166)
 - 1.5. Contenido de vacíos (AASHTO T 269)
 - 1.6. Resistencia retenida a la tracción indirecta (AASHTO T 283)
2. Ensayos Básicos de Control de Calidad
 - 2.1. Contenido de asfalto (AASHTO T 161 / T 310)
 - 2.2. Granulometría de la extracción (AASHTO T 27/11 (ASTM 127/136))
3. Ensayos de Desempeño (mecanicistas-dinámicos):
 - 3.1. Módulo dinámico (AASHTO T 342).
 - 3.2. Módulo de resiliencia a la tracción indirecta (AASHTO TP 31-96).
 - 3.3. Daño por humedad inducido a tracción indirecta-TSR- (AASHTO T 283)
 - 3.4. Viga de fatiga en cuatro puntos (AASHTO T 321)
 - 3.5. Deformación permanente en la rueda de Hamburgo (AASHTO T 324)

El diseño de mezcla asfáltica fue realizado por CACISA, mediante informe de ensayo INF. LCP-002A-2019 del 22 de octubre del 2019. La mezcla asfáltica fue provista por Pavicen. Los siguientes diagramas ilustran los ensayos por realizar en este proceso.

Figura 3– 5. Esquema experimental para el proceso de producción de los tratamientos de MAC



Fuente: Propuesta Pedregal 2021

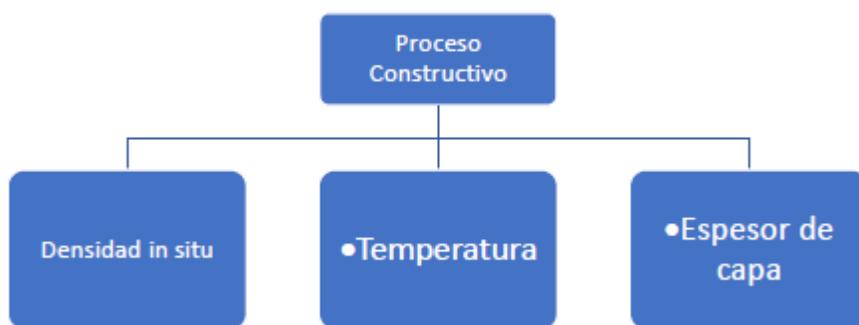
Plan Experimental para el Proceso de Construcción

Los ensayos sugeridos para el proceso de construcción son los siguientes:

1. Determinación de la densidad in situ de la mezcla asfáltica compactada utilizando el densímetro nuclear (ASTM D 2950) y mediante la extracción de núcleos (AASHTO T 166)
2. Temperatura de la mezcla asfáltica
3. Espesor de capa asfáltica compactada

En la Figura 3-7 a continuación se ilustra el esquema experimental propuesto para el proceso constructivo.

Figura 3–6. Esquema experimental para el proceso constructivo

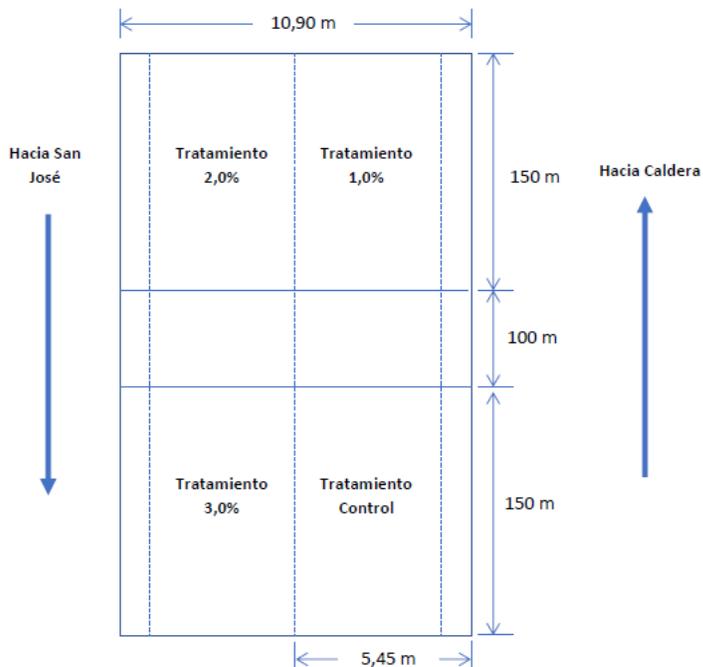


Fuente: Propuesta Pedregal 2021

Construcción de paños de prueba

Se construyó un tramos de prueba por noche, por lo tanto, la construcción total tardó 4 días. Los tramos experimentales se construyeron de la manera que se representa a continuación en la siguiente figura:

Figura 3–7. Distribución de tramos experimentales in situ



Fuente: Propuesta Pedregal 2021

Proceso constructivo de paños de prueba

- Cierre de zona de trabajo y aseguramiento de la seguridad vial.

- Inicio de paso regulado de tráfico.
- Ubicación de la maquinaria en la zona de trabajo.
- Escarificación de una capa de 6,0 cm. Se recomienda escarificar 6 cm para evitar problemas de delaminación.
- Colocación de una capa de 6,0 cm de cada tratamiento en un ancho de 5,45 m de ancho que incluye el carril completo incluyendo el espaldón.
- Compactación de la capa
- Apertura del tramo al tránsito

Plan experimental para los tramos de prueba a escala real construidos

Los ensayos por realizar para los tramos experimentales de previo y posteriormente a su construcción se indican a continuación:

Tabla 3– 2. Ensayos recomendados para tramos experimentales a escala real

Ensayo	Antes de la construcción	Después de la construcción
Fricción superficial	X	X
IRI	X	X
FWD (Deflectometría de impacto)	X	X

Fuente: Propuesta Pedregal 2021

Actividad 2: Análisis de resultados

Una vez que los ensayos concluyeron se realizó el análisis, para cada una de las etapas experimentales explicadas en la Actividad 1. El análisis consistió en la recolección y resumen de los datos en tablas y figuras, análisis de la calidad de los datos y comparación de significancia estadística para encontrar las tendencias y comportamiento principal de los tratamientos con Eco-Arena y el control.

Actividad 3: Informe final

Un informe comprensivo de todo el experimento se realizó para documentar los objetivos del experimento, datos recolectados, metodología de análisis, supuestos más importantes, resultados y recomendaciones a futuro.

En cuanto a los entregables establecidos para alcanzar el objetivo específico establecido en este estudio piloto, consiste en un informe comprensivo de acuerdo con las actividades establecidas. Toda documentación necesaria para el análisis y la información general del proyecto fue incluida en este informe. Este informe estará destinado a proveer resultados iniciales y demostrar las fortalezas de la Eco – Arena como un material para la construcción de pavimentos. Este fue el primer paso para el futuro desarrollo en un marco de referencia de Eco-materiales que comprenda:

- Propiedades mecánicas.
- Datos de entrada para el análisis y diseño de pavimentos.
- Especificaciones de materiales.
- Estrategias de relaciones públicas
- Datos para los medios de comunicación para diseminar las nuevas acerca de esta tecnología

innovadora.

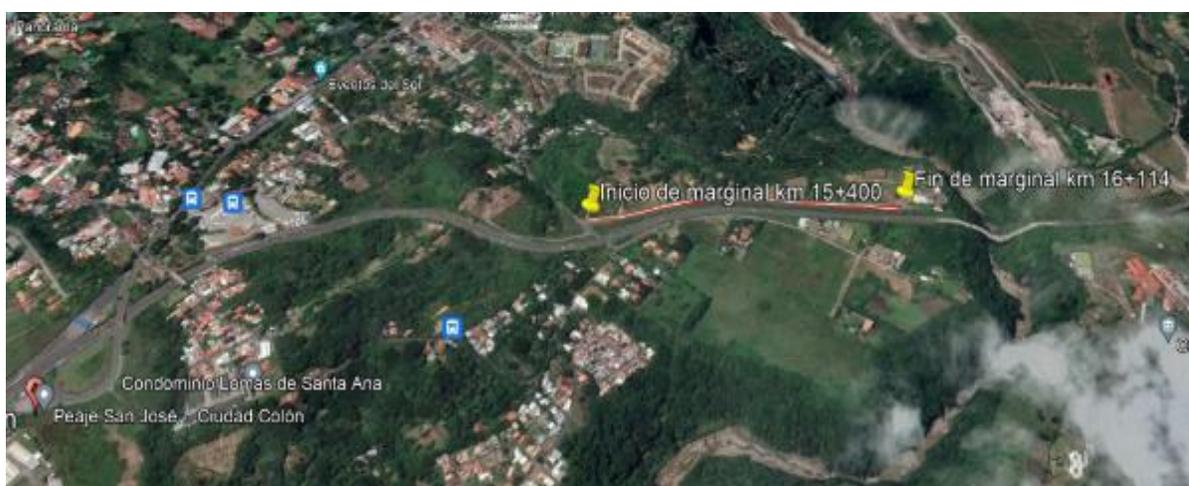
3.4.2 Plan de recolección de datos para segundo objetivo específico

Objetivo específico: Construir un paño de prueba aplicando la técnica de estabilización de RAP con emulsión asfáltica y comparar su funcionabilidad versus un tratamiento superficial bituminoso de dos capas (TSB2) existente, como solución sostenible para la rehabilitación de calles marginales de la Ruta 27.

3.4.2.1 Descripción del experimento

Se rehabilitó la totalidad de la superficie de ruedo existente de la calle marginal denominada Hacienda Brasil mediante la técnica de estabilización de RAP y material existente con emulsión asfáltica de rompimiento lento. La marginal posee una longitud aproximada de 714 m y un ancho promedio de 7,5 m y está ubicada entre los kilómetros 15+400 y 16+114 de la Ruta 27. Es un área de bajo tránsito vehicular, en donde se sitúa una pequeña zona industrial y residencias. El área de estudio se muestra a continuación (micro localización):

Figura 3–8. Localización marginal Hacienda Brasil, Ruta 27



Fuente: Google Earth

Luego de una visita al sitio de obra, mediante la técnica de la evaluación visual, se determinó que las capas inferiores del pavimento no presentan deterioros importantes. La capa superior si presenta daños como los siguientes:

- Desprendimiento de áridos.
- Formación de baches
- Falta de bombeos y mala conformación
- Daño por humedad en algunos puntos que presagian la aparición de baches en el corto plazo.

A continuación, se muestran algunas fotografías para ilustrar los deterioros indicados:

Figura 3–9. Deterioros localizados en marginal Hda. Brasil, Ruta 27



Fuente: Propia

Según las dimensiones tomadas en sitio, la marginal posee un área aproximada de 5 355 m², área que fue intervenida con la construcción de un sello asfáltico contra erosión a fabricar in situ. Para comparar el desempeño de esta nueva capa respecto de una capa existente se aplicará en la prueba de deflectometría de impacto (FWD) para obtener las deformaciones de la estructura ante cargas controladas. Se tomarán muestras representativas de los materiales disponibles para, con base en su caracterización, determinar un diseño con el porcentaje de emulsión requerido para obtener una adecuada estabilización.

3.4.2.2 Objetivos del experimento

Los principales objetivos de esta técnica de rehabilitación son:

- Generar un diseño de estabilización del material existente combinado con RAP y emulsión asfáltica de rompimiento lento en función de las características de los materiales disponibles en el proyecto.
- Realizar un tramo de prueba donde se establezca una capa de 15 cm de espesor compuesta por 10 cm de RAP y 5 cm del material existente. Finalmente, se construye un tratamiento superficial simple sobre la superficie resultante.
- Evaluar el proceso constructivo de la estabilización propuesta mediante la realización de ensayos de calidad tanto in situ como en laboratorio mediante un laboratorio de calidad certificado

3.4.2.3 Plan Experimental para la rehabilitación de la Marginal Hda. Brasil

A continuación, se describe el plan de trabajo por desarrollar compuesto por tres actividades generales:

Actividad 1: Plan Estudios Preliminares

La realización de los siguientes ensayos sobre las muestras de cada capa individual (subbase, base, RAP, RAP combinado), fuente de material nuevo o la combinación de RAP (material recuperado de mezcla asfáltica) y parte de la base granular, según se requiera:

- Análisis granulométrico para determinar la graduación (ASTM C 136)
- Límites de Atterberg para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D 4318)
- Relación densidad-humedad (AASHTO T 180)

A continuación, se muestra una estimación de la cantidad de material que se requiere para cada ensayo:

Tabla 3–3. Cantidades de material según cada ensayo requerido

Ensayo	Masa de muestra requerida (kg)
Relación densidad-humedad (AASHTO T 180) y límites de Atterberg (AASHTO T 90 y T 89)	20
Granulometría y contenido de humedad	40

Fuente: Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto, Lanamme UCR 2020

La muestra del material RAP fue tomada del apilamiento que dispone la Concesionaria en el intercambio de Escobal localizado en el km 42 de la Ruta 27 y la muestra de base granular existente, será obtenida mediante la realización de dos calicatas de exploración en la marginal de Hacienda Brasil. Siguiendo la Guía de Diseño para Materiales Estabilizados con Asfalto, cuando el material que se pretende estabilizar es 100% RAP, previo al diseño de mezcla es necesario verificar si el asfalto se encuentra activo o no, para lo cual se realizará el ensayo de resistencia a la tensión indirecta (tomando como norma base la AASHTO T 283), en especímenes de RAP de 100 mm de diámetro (al menos 3), compactados a 70 °C mediante el método Marshall a 75 golpes por cara. Los especímenes se deben acondicionar en agua a 25 °C durante 24 horas antes de la falla.

Si el promedio de los valores obtenidos es mayor a 100 kPa, el asfalto dentro del RAP se considerará como activo, cuando se determina que el asfalto dentro del RAP es activo esto produce un efecto negativo en el proceso de estabilización ya que el exceso de asfalto en la mezcla homogenizada produce exudación y mayor susceptibilidad a la deformación permanente. Para inactivar el asfalto en el RAP será necesario incorporar o sustituir una proporción del material con agregado triturado (tamaño máximo menor a 6,7 mm o a 20 mm según sea necesario) y cumplir con las especificaciones granulométricas de la Tabla 3-4. Verificar nuevamente si el asfalto se encuentra aún activo con el material combinado. Esta condición del asfalto activo dentro del RAP, es contrarrestada al combinar el mismo con el material de base granular existente en la superficie del pavimento.

Plan Experimental para estabilización de materiales con asfalto

A continuación, se resume el procedimiento para el control y aseguramiento de la calidad establecido

en la guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto.

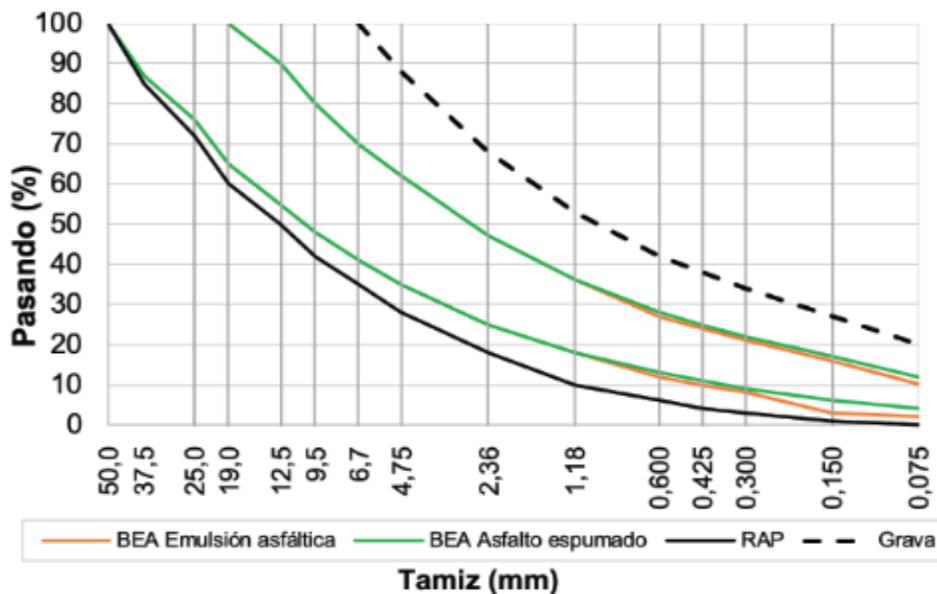
Para determinar si la estabilización con asfalto será efectiva, se deben realizar dos ensayos fundamentales al material granular o perfilado: granulometría e índice de plasticidad (IP). Las graduaciones recomendadas para este tipo de estabilización se muestran en la Tabla 3 - 4 y Figura 3 - 11.

Tabla 3-4. Graduaciones de materiales para estabilización con asfalto

Tamiz		Porcentaje pasando cada tamiz (%)					
		Para asfalto espumado		Para emulsión asfáltica		Materiales típicos	
Nº	mm	Límite grueso	Límite fino	Límite grueso	Límite fino	Grava	RAP
2"	50,0	100	100	100	100	100	100
1 1/2"	37,5	87	100	87	100	100	85
1"	25,0	76	100	76	100	100	72
3/4"	19,0	65	100	65	100	100	60
1/2"	12,5	55	90	55	90	100	50
3/8"	9,5	48	80	48	80	100	42
1/4"	6,7	41	70	41	70	100	35
Nº 4	4,75	35	62	35	62	88	28
Nº 8	2,36	25	47	25	47	68	18
Nº 16	1,18	18	36	18	36	53	10
Nº 30	0,600	13	28	12	27	42	6
Nº 40	0,425	11	25	10	24	38	4
Nº 50	0,300	9	22	8	21	34	3
Nº 100	0,150	6	17	3	16	27	1
Nº 200	0,075	4	12	2	10	20	0

Fuente: Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto, Lanamme UCR 2020

Figura 3-9. Esquema experimental para el proceso constructivo



Fuente: Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto, Lanamme UCR 2020

Para la estabilización con asfalto se recomienda un IP menor a 10. No obstante, cuando el material posee un IP superior a 10, pero menor a 15, es posible pretratarlo con cal hidratada para reducir el IP, antes de la estabilización con asfalto. En el Tabla 3 - 5 se indican otros requisitos importantes para el material a estabilizar.

Tabla 3 – 5. Requisitos de calidad en el agregado sin estabilizar

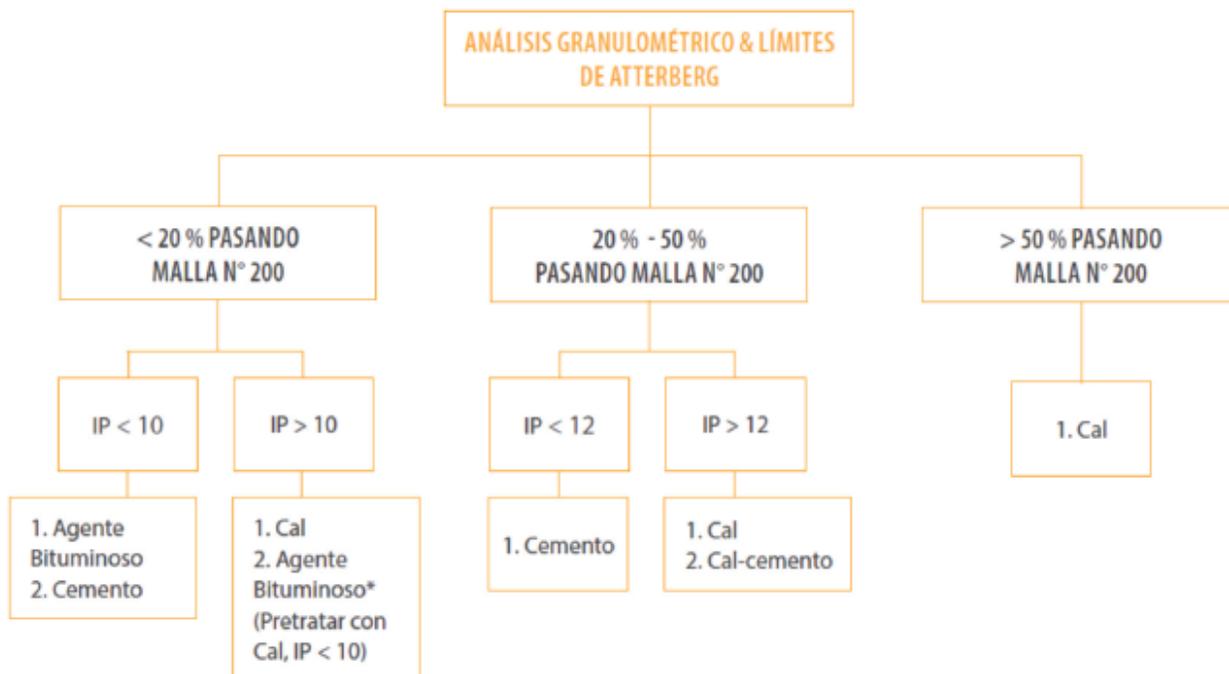
Ensayo	Norma	Unidades	Especificación
Índice de plasticidad	ASTM D 4318	%	10 máx.
CBR al 95 %	AASHTO T 193	%	20 mín.
Índice de durabilidad	ASTM D 3744	%	35 mín.
Abrasión de los Ángeles	ASTM C 535	%	50 máx.
Caras fracturadas	ASTM D 5821	%	50 mín.
Equivalente de arena	ASTM D 2419	%	30 mín.
Partículas friables	ASTM C142	%	No presencia
Presencia materia orgánica	ASTM C140	-----	No presencia

Fuente: Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto, Lanamme UCR 2020

Actividad 2: Diseño

De previo al inicio del proceso de diseño en el laboratorio y con los resultados de la caracterización del material, se debe tomar en cuenta si éste es apto para ser estabilizado con asfalto y con esto lograr un adecuado desempeño. En la Figura 3-12 se ilustran los criterios a utilizar y cómo debe comprobarse que la estabilización con asfalto es la adecuada.

Figura 3– 10. Selección del tipo de estabilización



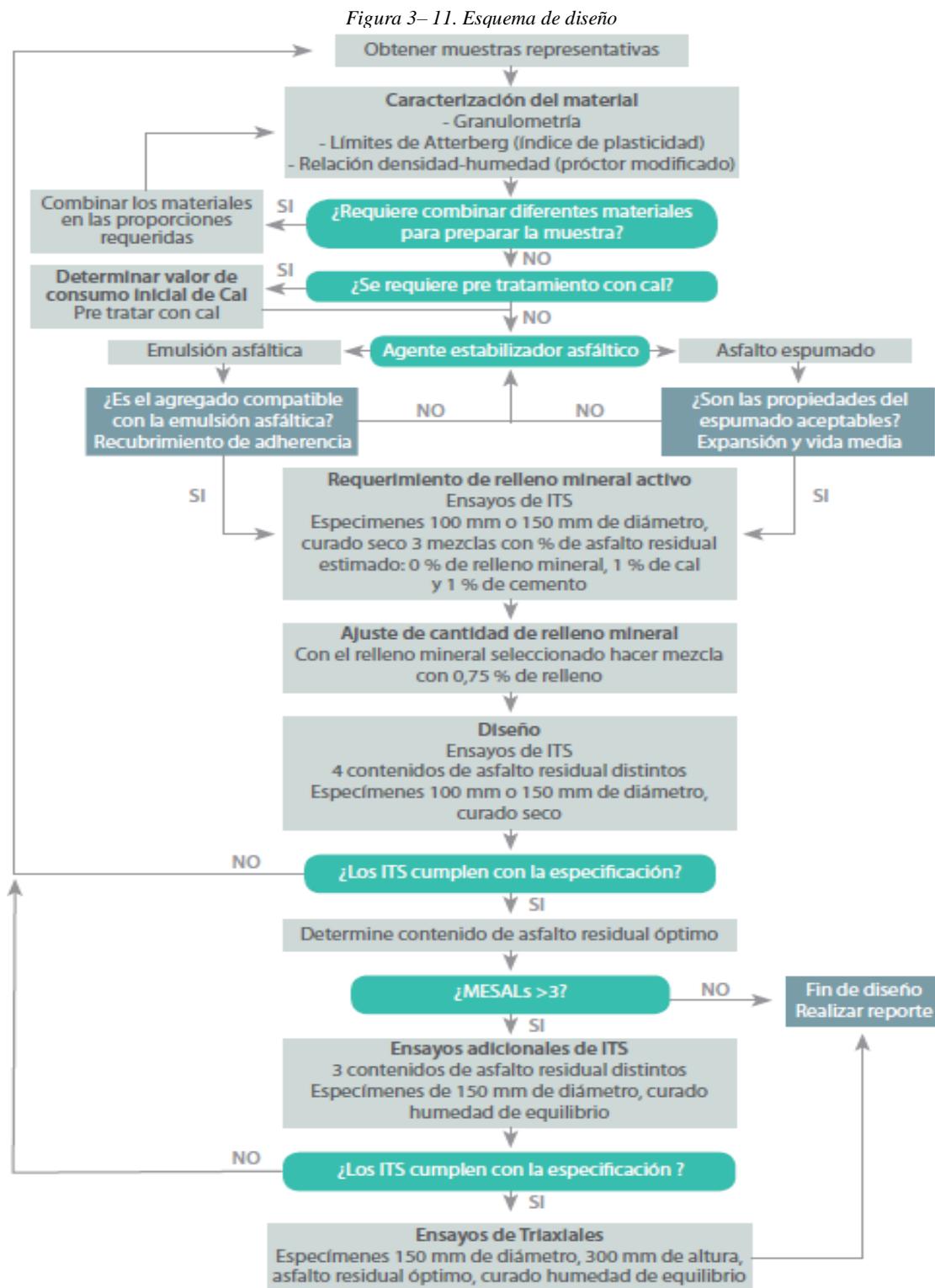
Fuente: Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto, Lanamme UCR 2020

Como se puede ver en la figura anterior, la estabilización con asfalto es posible principalmente en materiales gruesos, si el índice de plasticidad (IP) es menor a 10. En aquellos casos que sea mayor a 10, es necesario pre-tratar el material con cal para disminuir el IP.

El procedimiento de diseño involucra una serie de pasos y ensayos que dependen de la importancia del camino y el volumen del tránsito de diseño. Como parte de los objetivos principales del diseño se tienen:

- Determinar si el tipo de ruta y el material existente es competente para ser estabilizado con emulsión asfáltica o asfalto espumado.
- Determinar la necesidad de adicionar relleno mineral activo en conjunto con el asfalto.
- Determinar las cantidades necesarias de asfalto residual y relleno mineral activo para una estabilización efectiva.
- Estudiar las propiedades mecánicas del material estabilizado, como un insumo para clasificar el material y el diseño de la estructura del pavimento.

En la figura 3 – 11 se presenta un esquema del diseño del material estabilizado con asfalto.



Fuente: Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto, Lanamme UCR 2020

A partir de los ensayos de laboratorio se determinó en cada fase del diseño la clasificación del material, antes y después de la estabilización con asfalto, de acuerdo con la calidad y resistencia del material, así como las cargas de tránsito esperadas. De acuerdo con la metodología de diseño Wirtgen del año 2012, se

establecen 2 clases de materiales estabilizados con asfalto:

Clase 1: Este material tiene alta resistencia al corte y es típicamente utilizado como capa de base para un tráfico de diseño mayor de 3 millones de ESALS. Para esta clase de material sin tratar, la fuente es típicamente roca triturada bien graduada, pavimento asfáltico reciclado (RAP) o una mezcla de ambos.

Clase 2: Este material tiene resistencia moderada al corte, y es típicamente utilizado como capa de base para un tráfico de diseño menor a 3 millones de ESALS. Para esta clase de material la fuente de material sin tratar es generalmente grava natural graduada, o una mezcla de varios materiales, entre ellos RAP.

Para efecto de este diseño, se busca alcanzar una Clase 2. En la Tabla 3-6 a continuación se resumen los requerimientos de clasificación para los materiales estabilizados con asfalto según la guía de diseño.

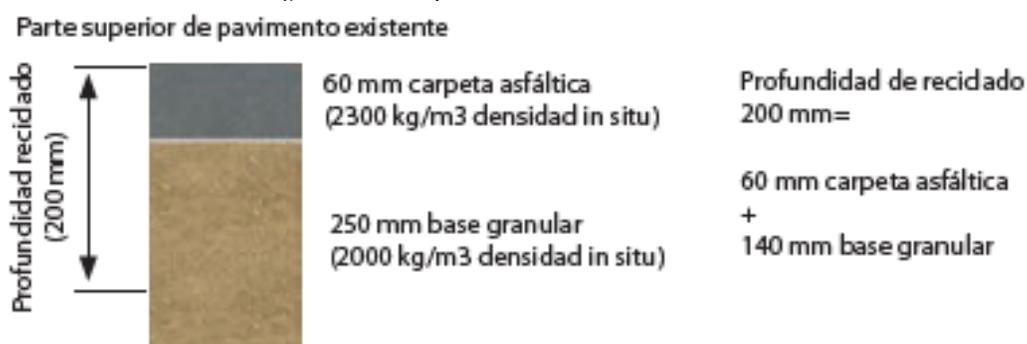
Tabla 3-6. Clasificación de materiales estabilizados con asfalto

Ensayo	Unid.	Clase 1	Clase 2	No apto
		>3 MESALS	< 3 MESALS	
		Roca triturada bien graduada, RAP y/o mezclas de ambos	Gravas naturales graduadas, mezclas de varios materiales, RAP	Gravas pobres, suelos y materiales plásticos
Material estabilizado				
Resistencia a la tensión indirecta (ITS) (secas), especímenes 100 mm y 150 mm de diámetro	kPa	> 225	225 - 125	< 125
Resistencia a la tensión indirecta (ITS) (húmedas), especímenes de 100 mm y 150 mm de diámetro	kPa	> 100	100 - 50	< 50
Resistencia retenida tensión indirecta (TSR)	%	Mínimo 60		<60
Resistencia a tensión indirecta (ITS) (humedad de equilibrio), especímenes de 150 mm diámetro	KPa	> 175	175-95	< 95
Cohesión	kPa	> 250	> 50	< 50
Ángulo de fricción interna	°	> 40	> 25	< 25
Cohesión retenida	%	> 75	> 50	< 50
Material sin estabilizar				
Índice de Soporte California (CBR)	%	> 80	> 20	< 20
Índice de plasticidad (IP)		< 10	< 15	> 15

Fuente: Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto, Lanamme UCR 2020

En el caso que deban combinarse los materiales en el laboratorio, mezclar los materiales muestreados de diferentes capas del pavimento (reciclado) o de diferentes fuentes para obtener una muestra combinada representativa del material a estabilizar, se debe considerar la densidad *in situ* de muestras de campo de las diferentes capas al mezclar los materiales, como se muestra a continuación:

Figura 3– 12. Proporciones de mezclado de materiales



Fuente: Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto, Lanamme UCR 2020

Para obtener una mezcla representativa, los dos materiales del ejemplo anterior se deben combinar en la proporción del espesor de las capas a estabilizar y la densidad *in situ* como sigue. El espesor por estabilizar estará en función del espesor en conjunto de las capas recuperadas y de la maquinaria a utilizar, donde se logre alcanzar las condiciones óptimas de densidad en todo ese espesor.

Tabla 3– 7. Cálculo de cantidad de material según proporción de pavimento

Material	Peso por metro cuadrado (kg)	Proporción	Para 50 kg de muestra
Mezcla asfáltica 60 mm, 2300 kg/m ³	0,06 x 2300 = 138	138/418 = 0,33	0,33 x 50000 = 16500
Grava 140 mm, 2000 kg/m ³	0,14 x 2000 = 280	280/418 = 0,67	0,67 x 50000 = 33500
Total	418	1,00	50000

Fuente: Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto, Lanamme UCR 2020

Actividad 3: Pliego de especificaciones técnicas

El objetivo de esta actividad es desarrollar un pliego de especificaciones técnicas que sirva para llevar a cabo un concurso en iguales términos para todos los proveedores que participen del proceso. Mediante este documento se garantiza el cumplimiento de los requerimientos para una adecuada realización de los trabajos.

En general, el documento contiene aspectos de consideración como lo espesores de RAP y estabilización, dosificación de emulsión asfáltica de rompimiento lento expresada en litros por metros cuadrado, porcentajes de compactación, frecuencia de ensayos, garantías de cumplimiento y posibles multas por incumplimientos por parte del contratista.

Actividad 4: Licitación privada

Esta actividad consiste en la invitación de al menos tres posibles oferentes a participar de la licitación de este proyecto en iguales condiciones. En este proceso se aportará el pliego de especificaciones técnicas a los oferentes y se les concederá un periodo de tiempo prudente que les permita realizar su mejor oferta. Una vez recibidas las ofertas, se procede a su revisión la elaboración de una Tabla comparativa donde se tabulan los precios unitarios ofertadas y las principales observaciones detectadas durante la revisión.

La decisión de la adjudicación del oferente recae mayormente en el precio oferta, no obstante, no necesariamente la oferta más económica corresponde a la ganadora, se debe llevar a cabo una revisión de cada actividad propuesta y el procedimiento establecido de manera que se evite adjudicar a una empresa que oferte con un precio ruinoso que le impida concluir la obra.

Actividad 5: Ejecución del proyecto

Para la ejecución del proyecto se establecen los siguientes pasos a seguir:

- a) Limpieza de la superficie de ruedo ya sea de forma manual o mecánica, se debe remover cualquier material orgánico presente en como zacate o terreno natural que no forme parte de la estructura de pavimento.
- b) Acarreo y colocación de una capa de 10 cm de RAP sobre la superficie existente.
- c) Con la ayuda de una maquina recuperadora de caminos se deberá generar una pasada a una profundidad de 15 cm de manera que en el proceso de homogenización sean incorporados en la mezcla 5 cm del material existe. Es conveniente aplicar un poco de humedad al material antes de llevar a cabo el riego de emulsión asfáltica. Algunas máquinas recuperadoras tienen la opción de incorporar la dosificación de emulsión establecida en el diseño durante el proceso, no obstante, este proceso puede llevarse a cabo con un distribuidor de emulsión asfáltica capaz de mantener una dosificación constante.
- d) Una vez aplicada la emulsión de lleva a cabo la homogenización de la mezcla estabilizada y se procede a conformar la superficie otorgando las características de bombeo y peralte requeridos.
- e) Compactación: durante este proceso que busca densificar la mezcla de material estabilizado con emulsión de manera que se eliminen los vacíos y se genere una matriz uniforme y densa entre los materiales granulares y la emulsión asfáltica. La cantidad de pasadas requerida de este equipo será determinada a través de la realización del paño de prueba. La densidad que se logre en la compactación es de vital importancia para el desempeño final del material. Para este proyecto se especifica la densidad mínima como un porcentaje de la densidad del Proctor Modificado, entre 98% y 102% para bases estabilizadas con asfalto
- f) Posteriormente, una vez conformada la nueva superficie de ruedo se colocará un tratamiento bituminoso simple de una capa para sellar y proteger el material estabilizado

El diseño con las dosificaciones que se emplearán será aportado por la concesionaria al contratista para la ejecución del proyecto. Por lo tanto, la contratación será por la prestación de los servicios de construcción y autocontrol de la calidad.

Actividad 6: Informe final

Un informe comprensivo de todo el experimento se realizará para documentar los objetivos del experimento, datos recolectados, metodología de análisis, supuestos más importantes, resultados y recomendaciones a futuro.

En cuanto a los entregables establecidos para alcanzar el objetivo específico establecido en este estudio piloto, consistirá en un informe comprensivo de acuerdo con las actividades establecidas. Toda documentación necesaria para el análisis y la información general del proyecto será incluida y estará destinada a proveer resultados iniciales y demostrar las fortalezas de la aplicación del método de rehabilitación sostenible para la construcción de pavimentos. Este será el primer paso para el futuro desarrollo en un marco de referencia en la ruta:

- Diseño.
- Propiedades mecánicas.
- Cumplimiento de especificaciones de materiales.
- Datos para los medios de comunicación para diseminar las nuevas acerca de esta tecnología innovadora.

3.5 Procesamiento y Análisis de Datos

En la presente sección se realiza una descripción del proceso que se llevó a cabo para lograr cada uno de los objetivos específicos.

Se realizó una revisión, calificación, selección y organización de la información encontrada. Una vez definida la información más relevante, se explica de manera concreta las posibles aplicaciones y beneficios de incorporar técnicas sostenibles en el sector de la construcción. Una vez que los ensayos hayan sido terminados se realiza el análisis, para cada una de las etapas experimentales explicadas. El análisis consistió en la recolección y resumen de los datos en tablas y gráficos, análisis de la calidad de los datos y comparación de significancia estadística para encontrar las tendencias y comportamiento principal de los tratamientos con Eco-Arena y el control. Esta misma metodología aplica para la aplicación del método de estabilización de RAP y material existente con emulsión asfáltica.

Mediante la construcción de tablas se resumen y comparan los datos obtenidos durante el proceso de valoración y auscultación de ambos proyectos, de manera que se genere una fácil comprensión al lector. Estas tablas comparativas sirven para determinar el cumplimiento de los objetivos establecidos.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se desarrollan los resultados obtenidos para alcanzar los objetivos específicos propuestos en el Capítulo I.

A continuación, se planteará el estado de cada una de las subactividades establecidas en la primera versión del cronograma de trabajo propuesto en diciembre 2021:

4. Resultados y análisis durante el desarrollo de los objetivos específicos establecidos

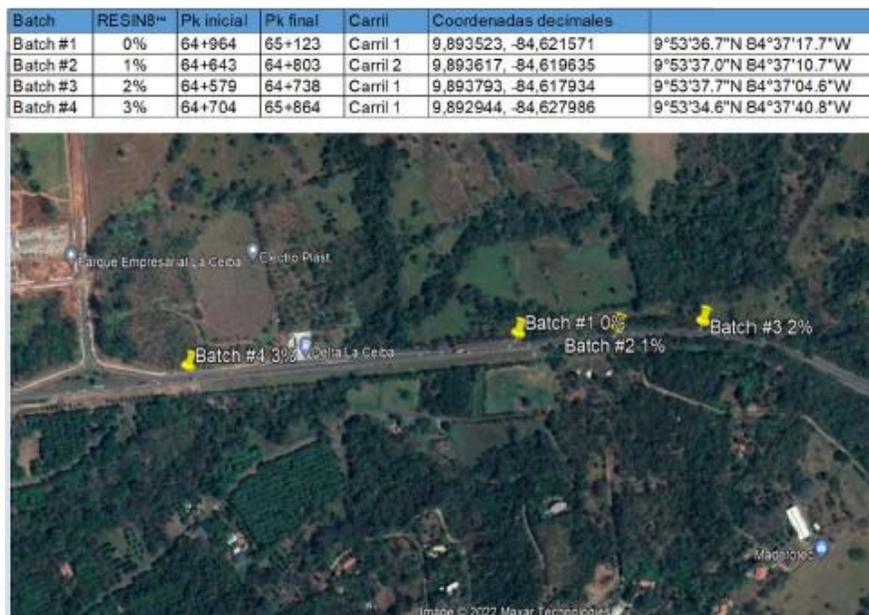
4.1 Desarrollo de información para objetivo específico 1

Actividades realizadas para evaluar las propiedades volumétricas y mecánicas (convencionales y dinámicas) de la mezcla asfáltica caliente modificada con Eco-Arena como filler de aportación mediante la construcción de cuatro paños de prueba a escala real en la vía troncal de la Ruta 27.

4.1.1 Determinación del sitio para ejecutar los cuatro paños de prueba

A continuación, la figura 4-1 muestra la ubicación en planta de los sitios donde se construyeron los cuatro paños de prueba a escala real:

Figura 4– 1. Ubicación de paños de prueba



Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8© en Ruta 27, Informe MT-010-2022

4.1.2 Construcción de cuatro paños de prueba con diferentes contenidos de Eco-Arena

El proceso constructivo de los cuatro paños de prueba se resume en cuatro grandes pasos que se describen a continuación:

Paso 1: Producción de MAC en planta de producción de Pedregal siguiendo el diseño establecido.

Paso 2: Recuperación de carpeta asfáltica existente a una profundidad de 6 cm y alistado de la superficie (cortes verticales en juntas transversales, barrido y riego de liga).

Paso 3: Colocación, distribución y compactación mecanizada de MAC.

Paso 4: Seguimiento del desempeño de los paños de prueba mediante auscultaciones y ensayos de laboratorio acreditado.

A continuación, se muestran algunas imágenes del proceso constructivo de para la ejecución de los cuatro paños de prueba:

Figura 4– 2. Imágenes del proceso constructivo de los paños de prueba



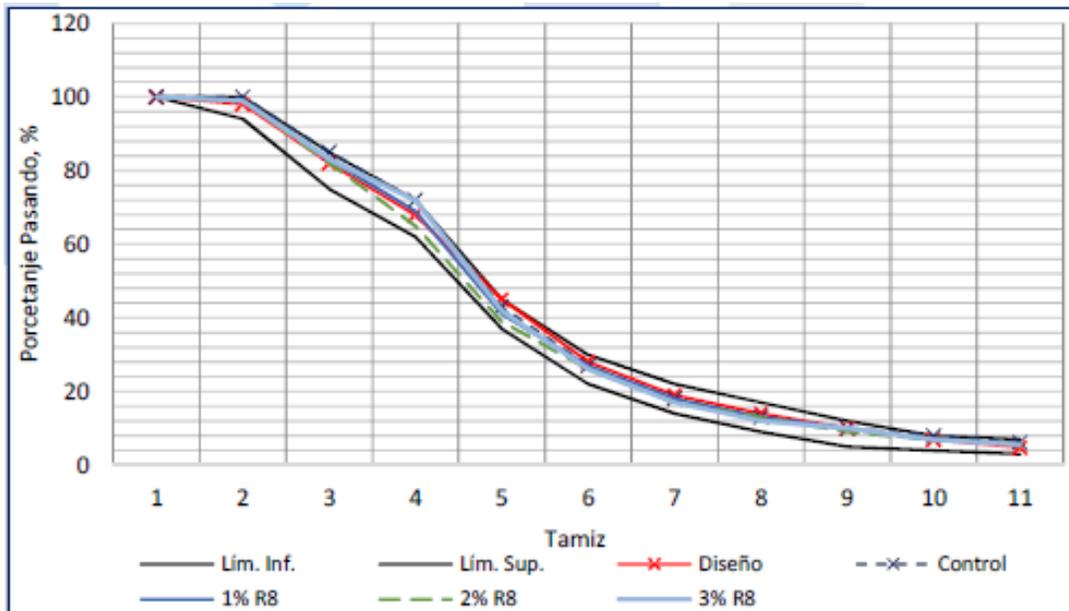
Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8© en Ruta 27, Informe MT-010-2022

4.1.3 Resultados experimentales de la construcción de tramos de prueba en Ruta 27

En la siguiente figura y tabla, se muestran los resultados de control de la calidad (Marshall y volumetría)

de los tramos de prueba colocados en la Ruta 27. Para ambos casos se cumplen los parámetros establecidos en el diseño original y las especificaciones del CR-2020.

Figura 4-3. Granulometría de los tratamientos experimentales



Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8© en Ruta 27, Informe MT-010-2022

De la figura anterior, se comprueba que los valores obtenidos para los paños de prueba con diferentes porcentajes de contenido de Eco-Arena todos se localizaron dentro de las curvas establecidas como límite superior e inferior.

En la tabla a continuación, se muestran los resultados de diseño y control de parámetros Marshall y volumetría para los tratamientos experimentales

Tabla 4– 1. Resultados de diseño y control de la calidad de parámetros

Diseño de mezcla					Resultados de ensayo (Dic, 2021)			
Granulometría (AASHTO T 30)*	Especificaciones				Control	1% R8	2% R8	3% R8
		Lím. Inf.	Diseño	Lím. Sup.				
25.4 mm	-	100	100	100	100	100	100	100
19 mm	-	94	98	100	100	99	99	99
12.7 mm	-	75	82	85	85	83	82	83
9.5 mm	-	62	68	72	72	69	65	72
No. 4	-	37	45	45	43	41	39	42
No. 8	-	22	28	30	27	27	26	26
No. 16	-	14	19	22	18	18	17	17
No. 30	-	9	14	17	13	13	13	12
No. 50	-	5	10	12	10	10	9	10
No. 100	-	4	7	8	8	7	7	7
No. 200	-	3,0	4,8	7,0	6,1	5,8	5,8	5,6
Contenido de asfalto (AASHTO T 164)								
PTA (%)	-	5,60	6,16	6,72	6,06	5,97	6,27	6,62
PTM (%)	-	5,30	5,80	6,30	5,71	5,63	5,90	6,21
Marshall parameters (HMA)								
Estabilidad (ASTM D 6927)*, kg	>800	-	1207	-	1508	1611	1592	1773
Flujo (ASTM D 6927)*, cm/100	20 - 35	33,0	35	37,0	30,5	32,7	30,6	30,0
Gravedad específica máxima teórica, Gmm (AASHTO T 209)	-	2,464	2,444	2,423	2,443	2,435	2,444	2,440
Gravedad específica bruta, Gmb (AASHTO T 166)*	-	2,336	2,345	2,357	2,326	2,315	2,334	2,320
Vacios (AASHTO T 269)	3,0 - 5,0	-	4,0	-	4,8	4,9	4,5	4,9
Propiedades de los Agregados Pétreos								
Gravedad específica bruta de agregado grueso (AASHTO T 85)	-		2,639		2,641	2,641	2,641	2,641
Gravedad específica bruta de agregado fino (AASHTO T 84)	-		2,616		2,608	2,608	2,608	2,608
Gsb promedio	-		2,628		2,628	2,628	2,628	2,628
Propiedades Volumétricas (MAC)								
V.M.A. (%)	>14	15,8	15,9	16,0	16,5	16,8	16,4	17,6
	< 0.3E8 ESALS: 70-80	-	-	-	-	-	-	-
V.F.A. (%)	< 3E8 ESALS: 65-78	67,3	75	83	68,6	65,6	72,5	69,3
	> 3E8 ESALS: 65-78	-	-	-	-	-	-	-
Relación Polvo/asfalto efectivo (DP), %	0,6 - 1,3	1,03	0,92	0,84	1,21	1,17	1,09	1,02

Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8® en Ruta 27, Informe MT-010-2022

En cuanto a la resistencia retenida al daño inducido por humedad (AASHTO T283), también hay cumplimiento del valor mínimo de especificación que es de 80%. Llama la atención que el tratamiento con 3% de Resin8® obtuvo un resultado levemente mayor al de los otros dos.

A continuación, en la siguiente tabla se muestran los resultados de ensayo de Resistencia Retenida al Daño por Humedad mediante el Ensayo de Tracción Indirecta para los paños de prueba realizados:

Tabla 4– 2. Resultados del ensayo de Tracción Indirecta para los paños de prueba

Daño por humedad (AASHTO T 283)	Especificaciones				Resultados de ensayo (Dic, 2021)			
		Lím. Inf.	Diseño	Lím. Sup.	Control	1% R8	2% R8	3% R8
Contenido de vacíos, especímenes secos (AASHTO T 269)	-	6,0	7,0	8,0	6,8	6,9	7,3	6,9
Contenido de vacíos, especímenes acondicionados (AASHTO T 269)	-	6,0	7,0	8,0	7,0	7,0	7,3	6,9
Esfuerzo de tracción indirecta, seco, kPa	-	-	1590	-	1340,0	1638,0	1539,0	1471,0
Esfuerzo de tracción indirecta, húmedo, kPa	-	-	1306	-	1146,0	1328,0	1232,0	1213,0
Resistencia retenida a la tracción indirecta	>80	-	82	-	86	81	80	82

Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8® en Ruta 27, Informe MT-010-2022

Los resultados de compactación in situ se muestran en la siguiente tabla. Cabe resaltar que todos los paños de prueba cumplieron con el requisito mínimo de 91,0%.

Tabla 4– 3. Resultados de porcentajes de compactación in situ mediante la extracción de núcleos para los paños de prueba

Compactación en sitio (AASHTO T 269)	Especificaciones				Resultados de ensayo (Dic, 2021)			
		Lím. Inf.	Diseño	Lím. Sup.	Control	1% R8	2% R8	3% R8
Densidad nuclear (12-16 measurements/track)	>91,0	91,0	-	-	95,0	95,0	94,4	94,0
Núcleos de sitio	>91,0	91,0	-	-	91,8	93,0	92,3	93,4

Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8® en Ruta 27, Informe MT-010-2022

4.1.4 Resultados de ensayos de desempeño

Un componente fundamental de esta investigación fue la realización de ensayos de desempeño para cada uno de los paños de prueba. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- Fatiga en la viga de 4 puntos a flexo-tracción a 400 μ S y 600 μ S (ASSHTO T 312).
- Deformación permanente y daño por humedad en la Rueda de Hamburgo a 50°C (ASSHTO T 324)
- Módulo dinámico (E*) de la mezcla asfáltica a 6 frecuencias y 4 temperaturas (ASSHTO T 342)

Los resultados obtenidos de estos ensayos se muestran a continuación:

1. Resultados de fatiga en la viga de 4 puntos (4PBB)

En Costa Rica, según las regulaciones establecidas en el CR-2020 en cuanto a los requisitos de desempeño que debe cumplir la mezcla asfáltica para la aceptación del diseño de mezcla se establecen los siguientes requisitos mínimos de ciclos de carga que debe resistir un espécimen a flexotracción para las siguientes deformaciones unitarias 400 μ S y 600 μ S :

Tabla 4–4. Requisitos de desempeño para mezclas asfálticas

Parámetro	Requisito mezclas			Método de ensayo
	Tipo AB	Tipo C	Tipo D	
Estabilidad (N)	≥ 8000	≥ 8000	≥ 8000	ASTM D6927-15 (INTE C11:2020)
Flujo (mm)	2,5 ± 1	2,5 ± 1	2,5 ± 1	ASTM D6927-15 (INTE C11:2020)
Resistencia al daño inducido por la humedad a la tensión diametral ⁽¹⁾	≥ 75 %	≥ 85 %	≥ 85 %	AASHTO T283-02
Resistencia a la tensión diametral indirecta en mezclas asfálticas compactadas de especímenes sin acondicionar ⁽¹⁾	≥ 700	≥ 700	≥ 700	AASHTO T283-02 (INTE C5:2019)
Susceptibilidad a la deformación permanente en el equipo APA ⁽²⁾⁽³⁾	-	≤ 3,5	≤ 3,5	AASHTO T340
Deformación permanente y resistencia al daño por humedad en el equipo Rueda de Hamburgo ⁽³⁾		≤ 6,0 mm	≤ 6,0 mm	AASHTO T324
		sin punto de inflexión antes de los 20000 ciclos		
Fatiga a flexotracción para las siguientes deformaciones unitarias (ciclos de carga) ⁽⁴⁾	400 (µm)	≥ 450000	≥ 300000	AASHTO T321
	600 (µm)	≥ 50000	≥ 25000	

Notas:

(1) La mezcla asfáltica debe estar elaborada a escala de laboratorio con los agregados correspondientes

(2) La deformación deberá obtenerse como promedio de 1 ensayo (6 especímenes). Se requiere que el ensayo sea realizado con mezcla acondicionada (2 horas ± 5 minutos a temperatura de compactación), y compactar inmediatamente después de este acondicionamiento. El acondicionamiento no se aplica para mezclas asfálticas producidas en la planta.

(3) La deformación permanente se debe evaluar con al menos uno de los dos métodos establecidos para APA y RH.

(4) Los especímenes de ensayo son vigas de mezcla asfáltica con todas las caras cortadas densificadas de modo que su contenido de vacíos sea de (7,0 ± 1,0) %. Los especímenes de ensayo cortados deben ser envejecidos, de previo al ensayo, en un horno a 85 °C por 5 días. La cantidad de repeticiones de carga deberá obtenerse del promedio de al menos 4 vigas. El criterio de falla es la pérdida de rigidez, es decir, un 50 % de la rigidez inicial.

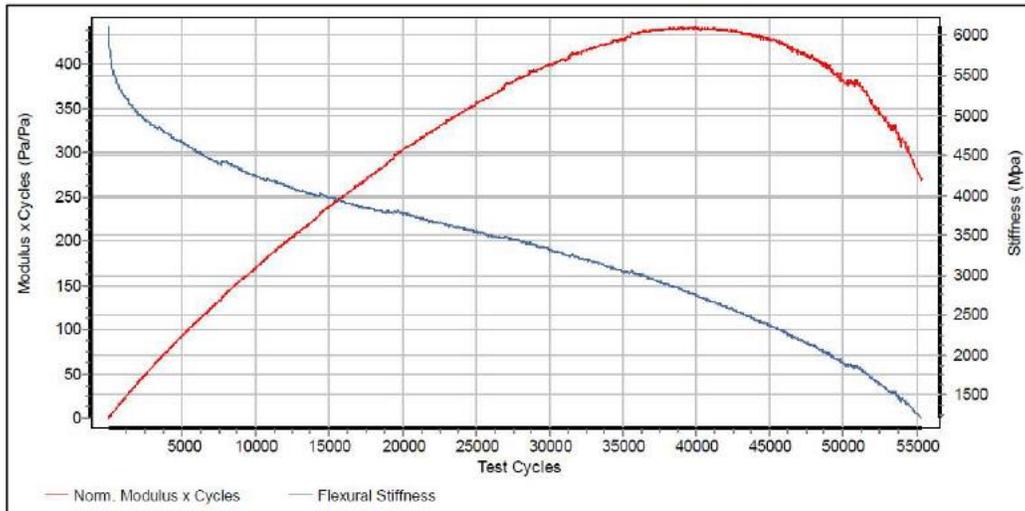
Fuente: Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, CR-2020

En el cuadro 4-5, se muestra que los especímenes de prueba en todos los tratamientos experimentales cumplieron con las especificaciones de Costa Rica establecidas en el CR-2020 para los niveles de deformación estudiados de 400 µS y 600 µS. Los resultados obtenidos fueron positivos y satisfactorios para mezclas tipo C (capas asfálticas intermedias de alto desempeño) y D (capas asfálticas de rodadura de alto desempeño).

Se determinó una reducción en la vida de fatiga para todos los tratamientos en ambos niveles de deformación conforme se incrementó el porcentaje de R8[®] en la mezcla, este comportamiento obedece a que el R8[®] endureció la mezcla. En el cuadro y las figuras 4-5 se representa de manera gráfica lo anterior para una mejor comprensión interpretación de la información y comportamiento de los resultados obtenidos.

A manera de ejemplo, se muestra una salida típica del ensayo de fatiga para uno de los especímenes de ensayo analizados:

Figura 4– 4. Ejemplo de salida del ensayo de fatiga en la viga de 4-puntos



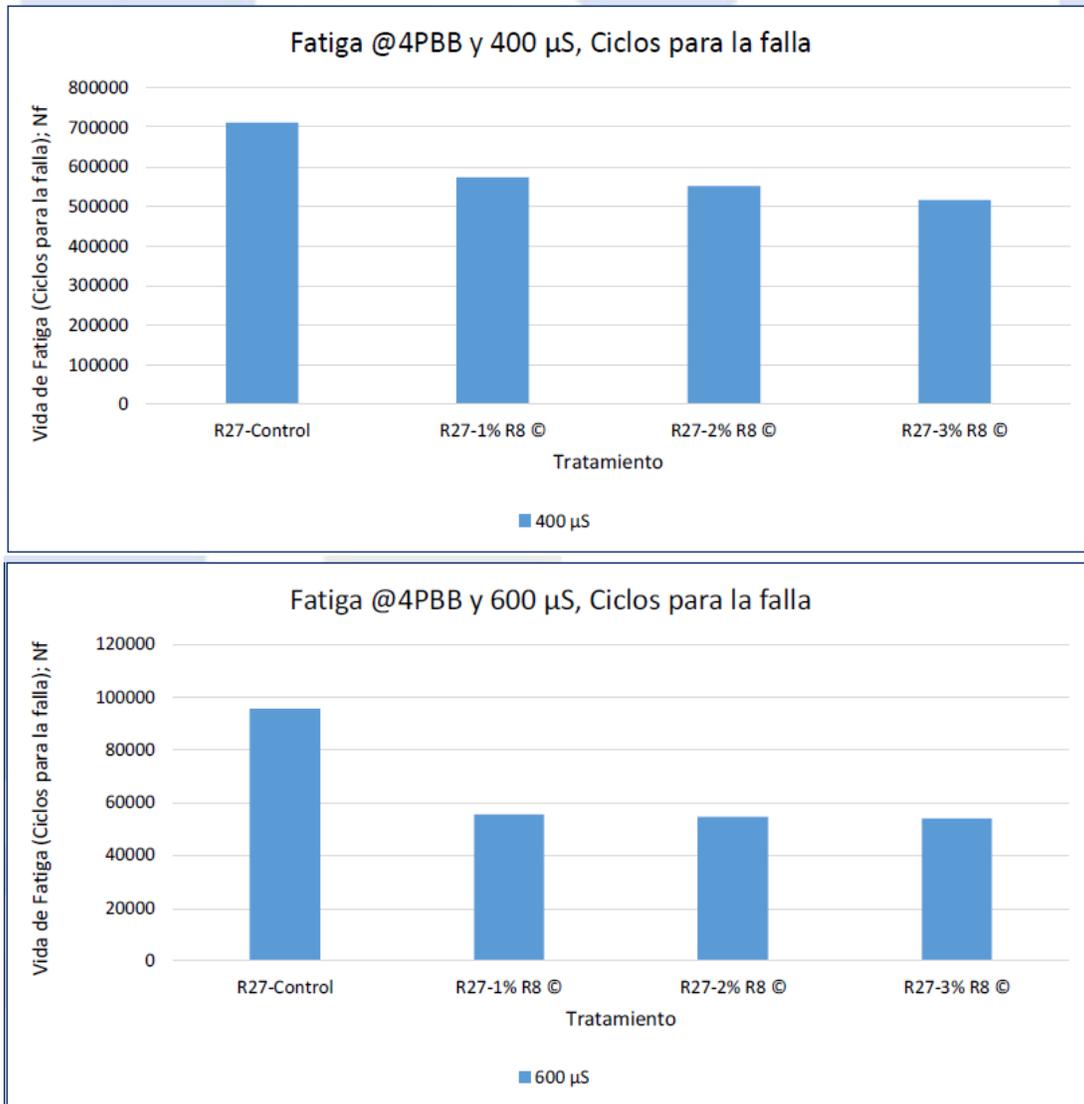
Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8® en Ruta 27, Informe MT-010-2022

Cuadro 4– 5. Fatiga @400µS y @600µS, 21.1°C

Tratamiento	400 µS	Variación (%)	600 µS	Variación (%)
R27-Control	711885		95655	
R27-1% R8 ©	573290	19,5	55610	41,9
R27-2% R8 ©	551530	22,5	54743	42,8
R27-3% R8 ©	516383	27,5	54090	43,5

Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8® en Ruta 27, Informe MT-010-2022

Figura 4– 5. Vida de fatiga en la viga de 4-puntos para los diversos tratamientos de R8[®]MAC.



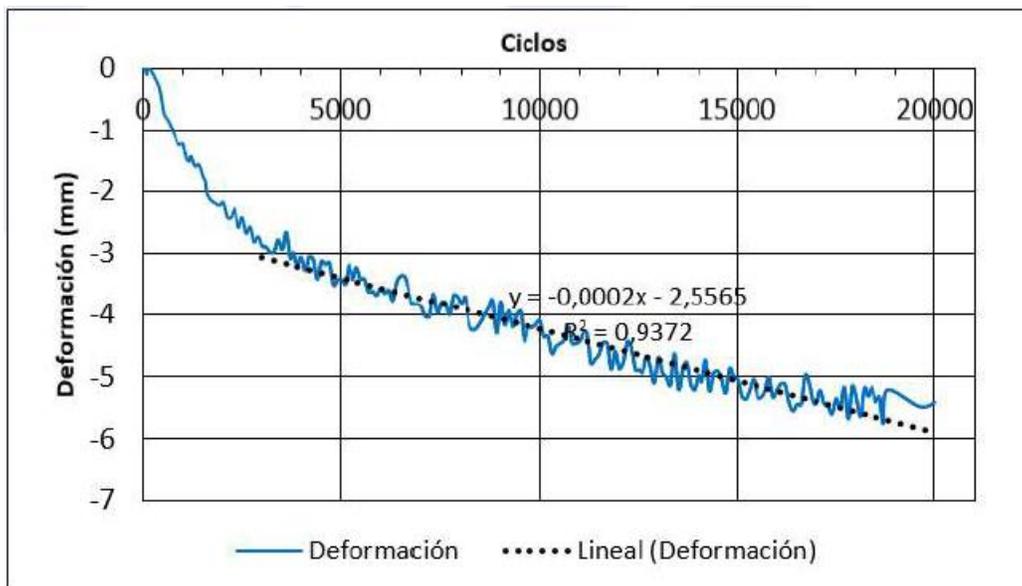
Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8[®] en Ruta 27, Informe MT-010-2022

2. Propiedades a deformación permanente y daño por humedad

La deformación permanente y el punto de desnudamiento determinados por medio de la Rueda de Hamburgo (HWT) también fueron contundentes. La resistencia al daño por humedad de todos los tratamientos experimentales fue excelente, ya que las pruebas de HWT no mostraron ningún punto de desnudamiento antes de las 20 000 pasadas de carga. La deformación permanente se redujo para todos los tratamientos R8[®]-MAC dado que se mostró una disminución de hasta 9,0% para una incorporación de R8[®] de hasta 3,0%. De nuevo, el R8[®] se comportó como un refuerzo de la mezcla asfáltica.

A continuación, se muestra un análisis de deformación permanente y daño por humedad para uno de los ensayos realizados:

Figura 4–6. Ejemplo de análisis de deformación permanente y punto de desnudamiento en la Rueda de Hamburgo (HWT)



Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8® en Ruta 27, Informe MT-010-2022

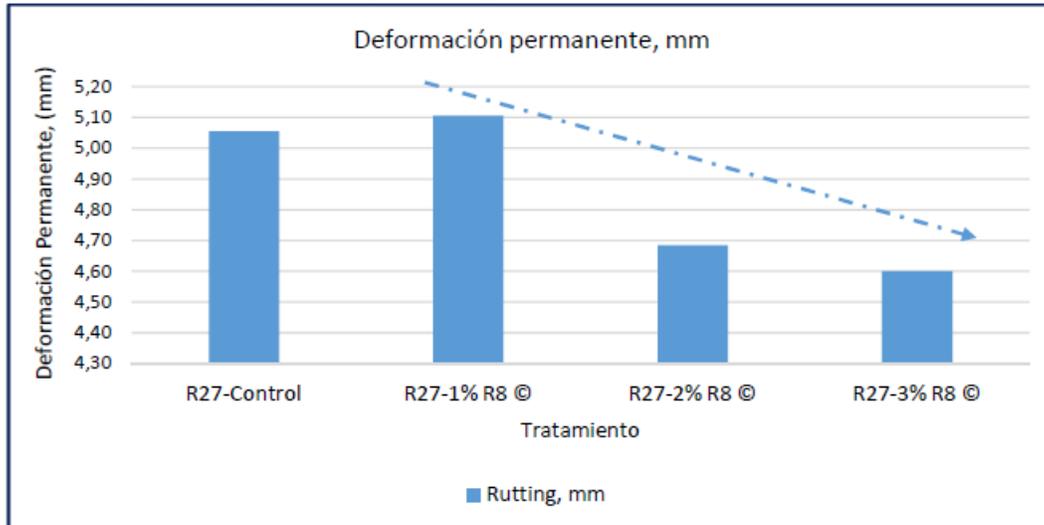
Tabla 4–6. Deformación permanente, mm

Tratamiento	Deformación permanente, mm	Variación (%)
R27-Control	5,06	
R27-1% R8 ©	5,11	1,0
R27-2% R8 ©	4,69	7,3
R27-3% R8 ©	4,60	9,0

Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8® en Ruta 27, Informe MT-010-2022

Del cuadro anterior se puede concluir que, si se toma 5 mm como punto de aceptación, se evidencia que la adición de R8® aumenta la capacidad por deformación a niveles menos, es decir, a mayor R8® menor deformación, por lo tanto, la integración de R8® en el diseño de mezcla asfáltica produce mayor rigidez.

Figura 4– 7. Deformación permanente para los diversos tratamientos de Resin8[®]-MAC



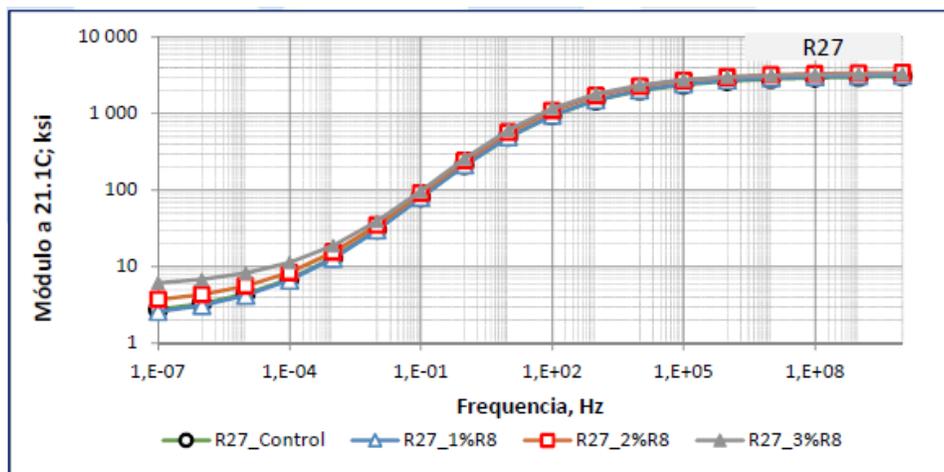
Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8[®] en Ruta 27, Informe MT-010-2022

3. Módulo dinámico (E*)

El módulo de rigidez viscoelástico lineal de la mezcla medido a través del módulo dinámico (E*) mostró resultados muy alentadores. Existe una tendencia a que los tratamientos con R8[®]-MAC presenten un incremento mediano de la rigidez, similar a lo que ocurre cuando se utilizan ligantes modificados con polímeros (PMB). Los tratamientos para el caso de la Ruta 27 mostraron un incremento entre 15,0% y 23,3% para los contenidos de R8[®] evaluados. Para el 1,0% de R8[®] casi no hay diferencia con el tratamiento control. Las curvas maestras de módulo dinámico se muestran a continuación.

De comprobarse una constancia en este comportamiento de un incremento de la rigidez como el que se ve reflejado en los paños de prueba a escala real, se podría utilizar diseños de mezcla con contenidos de entre 2% y 3% de R8[®] en puntos donde se requiera de mezclas asfálticas rígidas resistentes a deformación permanente producto del frenado abrupto de los usuarios como por ejemplo en las aproximaciones a los peajes. A su vez, abre la ventana a considerar el R8[®] como un posible sustituto de ligantes modificados.

Figura 4– 8. Curvas maestras de módulo dinámico de los tratamientos experimentales



Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8© en Ruta 27, Informe MT-010-2022

El siguiente cuadro resume los módulos dinámicos y sus componentes elástica y viscosa para todos los tratamientos experimentales.

Tabla 4– 7. Valores de módulo dinámico, elástico y viscoso para todos los paños de prueba

Freq (Hz)	R27-Control, ksi			R27-1%, ksi			R27-2%, ksi			R27-3%, ksi		
	E*	E'	E''	E*	E'	E''	E*	E'	E''	E*	E'	E''
1.00E+10	3047.57	3818.20	626.10	3159.88	4166.32	677.65	3408.91	3962.63	727.66	3317.34	3748.24	749.80
1.00E+09	3008.02	3731.05	626.08	3116.80	4045.43	675.99	3370.58	3890.72	726.51	3290.53	3700.91	748.91
1.00E+08	2941.33	3593.33	622.97	3044.57	3862.11	672.73	3304.46	3772.91	724.12	3243.04	3618.90	747.00
1.00E+07	2830.65	3380.84	618.65	2925.43	3691.65	666.38	3192.07	3593.84	719.19	3157.24	3479.21	742.90
1.00E+06	2651.54	3085.24	609.87	2734.43	3208.58	654.13	3005.92	3291.19	709.09	3006.95	3248.35	734.19
1.00E+05	2376.26	2623.77	592.26	2442.08	2699.73	630.69	2710.95	2862.58	688.59	2754.05	2895.03	715.92
1.00E+04	1981.61	2060.26	557.95	2027.33	2083.70	589.24	2276.91	2288.64	648.66	2357.43	2394.28	678.63
1.00E+03	1479.54	1431.45	494.96	1505.11	1429.79	514.73	1709.97	1617.32	574.74	1805.29	1709.23	605.76
1.00E+02	943.93	848.45	391.66	954.05	845.93	401.80	1092.28	969.29	453.18	1159.01	1038.41	483.45
1.00E+01	494.65	420.37	253.79	496.93	427.15	259.54	568.97	480.84	291.45	609.67	514.77	313.22
1.00E+00	213.08	177.50	122.20	212.79	187.01	129.02	242.02	201.78	138.87	257.76	214.39	149.33
1.00E-01	90.71	69.70	42.63	80.11	75.51	47.27	90.93	77.92	48.29	97.59	83.51	52.24
1.00E-02	30.57	27.17	12.58	30.13	30.91	14.77	34.75	31.30	14.53	39.05	35.13	16.45
1.00E-03	13.16	12.12	4.18	12.85	13.93	4.95	15.41	14.51	5.04	18.84	17.68	6.27
1.00E-04	6.90	6.43	1.89	6.67	7.30	2.15	6.42	6.11	2.39	11.35	10.89	3.32
1.00E-05	4.40	4.07	1.16	4.23	4.48	1.24	5.50	5.42	1.54	8.26	7.99	2.32
1.00E-06	3.28	2.97	0.89	3.12	3.17	0.90	4.33	4.16	1.21	6.84	6.57	1.93
1.00E-07	2.74	2.42	0.78	2.59	2.60	0.76	3.71	3.52	1.07	5.14	5.87	1.77
1.00E-08	2.46	2.13	0.73	2.31	2.14	0.69	3.38	3.18	1.01	5.79	6.49	1.69
1.00E-09	2.30	1.95	0.70	2.15	1.93	0.65	3.21	2.98	0.98	5.60	5.29	1.65
1.00E-10	2.22	1.85	0.69	2.07	1.81	0.64	3.11	2.88	0.97	5.50	5.18	1.65

Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8© en Ruta 27, Informe MT-010-2022

En el siguiente cuadro y figura, se muestra un resumen de las propiedades de rigidez de los tratamientos experimentales a 21,1°C y 10 Hz. Los resultados muestran la consistencia de las propiedades de rigidez de todos los tratamientos. La diferencia entre el tratamiento control y el 1%

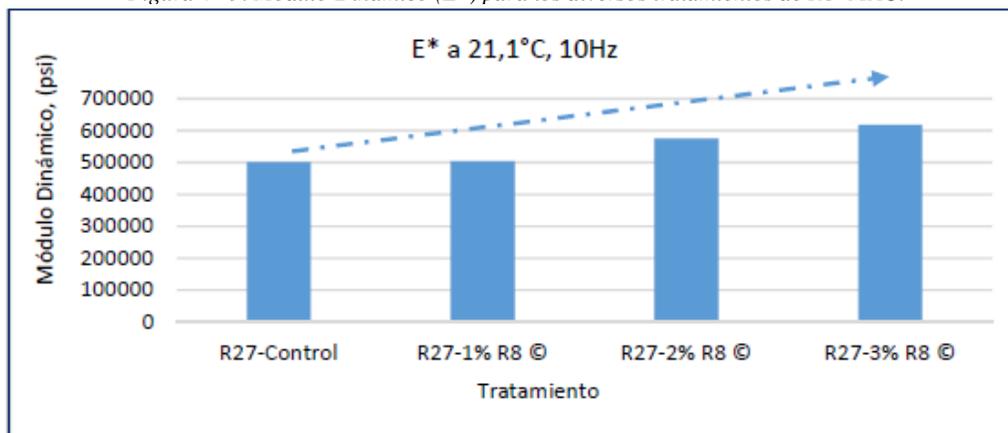
con R8[®]-MAC es casi nula, como era de esperar. Cuando el R8[®] se incrementa a 2% y 3% también hay un incremento, pero en un rango mayor. El E* indica que no hubo ningún comportamiento de cruce que implique cambios en los componentes elásticos o viscosos del material. R8[®] básicamente endurece el ligante asfáltico sin producir ningún cambio estructural significativo, morfológico o en las temperaturas de transición vítrea.

Tabla 4– 8. Módulo Dinámico (E*) @ 21,1°C y 10 Hz.

Tratamiento	E* @ 21,1°C;10Hz, psi	Incremento (%)
R27-Control	501000	
R27-1% R8 [®]	503100	0,4
R27-2% R8 [®]	576200	15,0
R27-3% R8 [®]	617700	23,3

Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8[®] en Ruta 27, Informe MT-010-2022

Figura 4– 9. Módulo Dinámico (E*) para los diversos tratamientos de R8[®]MAC.



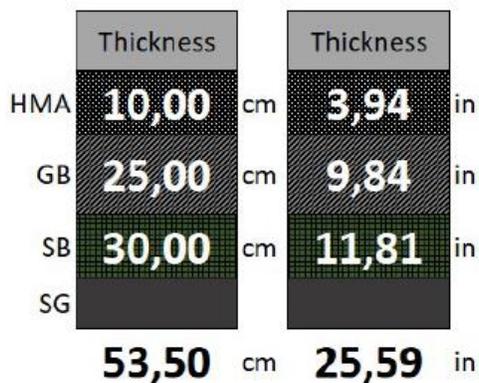
Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8[®] en Ruta 27, Informe MT-010-2022

4.1.5 Análisis Mecánico-Empírico de desempeño de un pavimento control versus las mezclas analizadas

Se modeló una estructura de pavimento típica bajo la metodología AASHTO 93 y una evaluación mecanicista-empírica de fatiga y deformación permanente. A continuación, se muestran los cálculos para cada uno de los tratamientos experimentales. El módulo dinámico medido (E*) a 21,1 °C y 10 Hz se fue seleccionado como la rigidez de la capa MAC.

La estructura estudiada es la siguiente:

Figura 4– 10. Estructura de pavimento estudiada.



Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8® en Ruta 27, Informe MT-010-2022

Los parámetros de diseño propuestos son los siguientes:

Tabla 4– 9. Resumen parámetros de diseño.

Resumen de Parámetros de diseño		
ESAL's de diseño	20 000 000	ESAL
Nivel de confiabilidad, Z_R	90	%
Desviación estándar, S_o	0,49	
Serviceabilidad final, P_t	2,2	PSI
Serviciabilidad inicial, P_i	4,2	PSI
Variación de PSI	2,0	PSI
M_r de SR, suelo de grano fino	9605	psi
CBR de SR	10	
Período de diseño	--	años

Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8® en Ruta 27, Informe MT-010-2022

El modelo empleado para determinar el módulo de resiliencia de la subrasante es el siguiente:

$$Mr \text{ de la subrasante} = 1862 \times \text{CBR}^{0,7125} \text{ (psi)}$$

Los modelos mecanicistas usados para determinar la vida de fatiga y deformación permanente de la capa de MAC y del pavimento son los siguientes:

Modelo de fatiga para la capa de MAC (Método del AI)

$$Nf = 0.0796 (\epsilon_t)^{-3.291} (E)^{-0.854}$$

Nf = Número de repeticiones de carga para la falla,

ϵ_t = Deformación por tracción en la parte inferior de la capa MAC, y;

E^* = Módulo dinámico de la capa MAC.

Daño acumulado por deformación plástica (Modelo MEPDG-LanammeUCR NCHRP)

$$Nr = 1.365 \times 10^{-9} (\epsilon_{vs})^{-4.477}$$

ϵ_{vs} = Deformación en la parte superior de la subrasante.

Deformación permanente de la capa de MAC

$$Nr = 1.077 \times 10^{18} (\epsilon_{vs})^{-4.4843}$$

La principal conclusión de este análisis de diseño ME es que todos los tratamientos R8©-MAC aumentaron la vida útil esperada del pavimento en una magnitud importante dado que el diseño original teórico fue planeado para 20 millones de ejes equivalentes de carga. Los resultados arrojaron vidas de fatiga y deformación permanente muy superiores a dicho valor.

Tabla 4– 10. Diseño ME de Pavimento Hipotético. Vidas de fatiga y deformación permanente

	R27- Control	R27-1%	R27-2%	R27-3%
Número estructural (SN)				
SN Calculado	5,30	5,33	5,35	5,52
SN Requerido	4,91	4,91	4,91	4,91
Espesor de capa (cm)				
HMA (cm)	10,00	10,00	10,00	10,00
BG (cm)	25,00	25,00	25,00	25,00
SB (cm)	30,00	30,00	30,00	30,00
Espesor de capa (in)				
HMA (in)	3,94	3,94	3,94	3,94
BG (in)	9,84	9,84	9,84	9,84
SB (in)	11,81	11,81	11,81	11,81
Módulo dinámico a 21,1°C y 10Hz				
HMA (psi)	501 000	509 700	503 100	576 200
BG (psi)	28 000	28 000	28 000	28 000
SB (psi)	15 000	15 000	15 000	15 000
ESALs				
SN Calculado W18	37 019 744	38 066 784	37 019 744	48 116 947
SN Requerido W18	20 000 000	20 000 000	20 000 000	20 000 000
Daño Acumulado				
Vida de fatiga	2,08E+07	2,11E+07	2,08E+07	2,34E+07
Def. Perm. MAC	1,83E+33	1,92E+33	1,85E+33	2,69E+33
Def. Perm. SR	4,22E+06	4,28E+06	4,23E+06	4,69E+06

Fuente: Construcción de Pistas de Prueba de Mezcla Asfáltica en Caliente con Resin8© en Ruta 27, Informe MT-010-2022

4.2 Desarrollo de información para objetivo específico 2

Actividades realizadas para construir un paño de prueba aplicando la técnica de estabilización de RAP y material existente con emulsión asfáltica y comparar su funcionalidad versus un tratamiento superficial bituminoso de dos capas (TSB2) existente, como solución sostenible para la rehabilitación de calles marginales de la Ruta 27.

4.2.1 Estudios preliminares

En función de la guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto del Laboratorio Nacional de

Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (Lanamme UCR), se establecieron los estudios preliminares necesarios para la elaboración del diseño.

Los resultados reportados corresponden a ensayos realizados tanto en campo como en laboratorio, entre los cuales se realizaron chequeos de calicatas para verificar espesores, recolección de muestras de RAP y base granular existente para caracterización y pruebas para verificar inactividad del asfalto en el RAP.

Para la caracterización de la base granular existente, se realizaron dos calicatas en sitio resultando dos diferentes muestras de material que fue enviado al laboratorio para realizar granulometría, próctor modificado T-180 (densidad máxima, humedad óptima y CBR) y la verificación de sus propiedades fisiomecánicas (caras fracturadas, abrasión/durabilidad, equivalente de arena, partículas friables y presencia de materia orgánica).

En las imágenes a continuación, se muestra el proceso de toma de muestras mediante calicatas en el caso de base granular existente en el sitio previo a la realización del proyecto y en el apilamiento de RAP:

Figura 4– 11. Elaboración de calicata en sitio para toma de muestra y medición de espesores en octubre 2021



Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

Figura 4– 12. Toma de muestra de RAP en sitio de apilamiento, octubre 2021



Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

4.2.2 Elaboración del diseño

De acuerdo con lo solicitado al laboratorio consultor de la calidad, se describe el diseño para la propuesta de rehabilitación de marginales mediante la técnica de estabilización con emulsión asfáltica. El

material resultante propuesto para ser estabilizado se compone 1/3 de base granular existente en el sitio y 2/3 de RAP producto de la Campaña de Pavimentación 2021. Se estableció un espesor total de 15 cm por las siguientes razones:

- a) Generar un nivel de superficie de ruedo terminado que no afectara los accesos a residencias existentes.
- b) Al incorporar el RAP con la capa subyacente que contenía materiales tratados, se buscó formar una nueva base uniforme que sirviera como estructura para una futura lechada asfáltica. A su vez, se evitó la posibilidad de posibles daños por laminación al tener dos capas notablemente distintas entre sí.

Se emiten seguidamente los estados de resultados de las características de los agregados usados, métodos de ensayo utilizados y memoria de calidad de las pruebas efectuadas; todo lo anterior de conformidad a la Guía de Diseño para Materiales Estabilizados con Asfalto, realizada por Lanamme UCR.

1) Agregados

- a) Fecha de muestreo:

Tabla 4– 11. Fechas de toma de muestras para diseño

Material	Fecha de muestreo
RAP	12/oct/2021
Base granular existente	12/oct/2021
Emulsión Asfáltica CSS-1H	28/dic/2021
Emulsión Asfáltica CRS-1	01/jul/2021
Polvo de piedra	10/jul/2021

Fuente: Elaboración, propia 2022

b) Emulsiones asfálticas

Tabla 4– 12. Certificados de calidad emulsiones CSS-1H y CRS-1



Informe N°.3388A21

Edigo a partir de
2010-06-27
Versión 1

INFORME DE ENSAYOS

AS-09-06-038

Tipo de producto: Emulsión Asfáltica
Lenta (CSS-1H)
Tanque N°: 174

Cliente: Producto Negro
Teléfono: 2284-2700

Fecha de muestreo: 2021/12/28
Fecha de recepción: 2021/12/28

Terminal: El Alto

Lote N°: 114-20210512-CSS-1H

Volumen, m³: 65.00

Ensayo	Descripción	Resultado	Especificación	Analista	Fecha
*ASTM D-7496	Viscosidad Saybolt Puro a 25 °C, SSP	23.2 ± 6.1	20.0 - 100.0	ARNOLDO-GC	2021/12/28
**ASTM D-8937	Densidad a 25 °C, kg/m³	1001.4 ± 0.3	Reportar	ARNOLDO-GC	2021/12/28
**ASTM D-6997	Residuo por destilación, fracción masa, % en masa	60.2 ± 2.0	Mínimo 57.0	MARCELA-SS	2021/12/28
	Fracción volumen aceite destilado, % volumen masa	2.0	Reportar	MARCELA-SS	2021/12/28
*ASTM D-5	Penetración residuo (25 °C, 100 g, 5 s), 1/10mm	55.0 ± 6.9	40.0 - 90.0	MARCELA-SS	2021/12/28
**ASTM D-6933	Fracción masa retenida en malla N°20, % en masa	<0.01 ± 0.08	Máximo 0.10	MARCELA-SS	2021/12/28
**ASTM D-6930	Estabilidad 24h, fracción de asfalto, % en masa	0.8 ± 0.6	Máximo 1.0	MARCELA-SS	2021/12/29

Última línea

Muestreo realizado de acuerdo a **ASTM D-4057 por: DANNY-ET

REGULACIÓN: Los resultados de los análisis ejecutados CUMPLEN con la indicado en el Decreto Ejecutivo N°92812-COMEX-MINAE-MERC. Reglamento Técnico Interamericano. ITCA 75.01.22.04. Especificaciones técnicas para Asfaltos y Emulsiones Asfálticas

OBSERVACIONES:

Acreditación de acuerdo a la Norma INTE-ISO/IEC 17025-2017, ver alcance de acreditación en www.eca.or.cr.

* Ensayo Acreditado. **Ensayo No acreditado. Todas las referencias ASTM marcadas con un asterisco (*) están asociadas al ensayo acreditado.



INFORME DE ENSAYOS
AS-09-06-038

Tipo de producto: Emulsión Asfáltica
Rápida (CRS-1)
Tanque N°: 176

Cliente: Producto Negro
Teléfono: 2284-2700

Fecha de muestreo: 2022/01/07
Fecha de recepción: 2022/01/07

Terminal: El Alto

Lote N°: 118-20220108-CRS-1

Volumen, m³: 63.00

Ensayo	Descripción	Resultado	Especificación	Analista	Fecha
*ASTM D-7496	Viscosidad Saybolt Furol a 50 °C, SSF	35.7 ± 31.4	20.0 - 100.0	MARCELA-SS	2022/01/07
**ASTM D-6937	Densidad a 25 °C, kg/m³	1000.4 ± 0.3	Reportar	MARCELA-SS	2022/01/07
**ASTM D-6997	Residuo por destilación, fracción masa, % en masa	60.7 ± 2.0	Mínimo 60.0	TOMAS-HA	2022/01/07
	Fracción volumen aceite destilado, % volumen masa	1.0	Máximo 3.0	TOMAS-HA	2022/01/07
**ASTM D-5	Penetración residuo (25 °C, 100 g, 5 s), 1/10mm	139.0 ± 6.5	100 - 250	TOMAS-HA	2022/01/07
**ASTM D-6933	Fracción masa retenida en malla N°20, % en masa	<0.01 ± 0.08	Máximo 0.10	MARCELA-SS	2022/01/07
**ASTM D-6936	Demulsibilidad, fracción masa de asfalto, % en masa	74.6	Mínimo 40.0	TOMAS-HA	2022/01/07
**ASTM D-6930	Estabilidad 24h, fracción de asfalto, % en masa	0.6 ± 0.6	Máximo 1.0	TOMAS-HA	2022/01/05

Última línea

Muestreo realizado de acuerdo a **ASTM D-6057 por: OSVALDO-MV

REGULACIÓN: Los resultados de los análisis ejecutados CUMPLEN con la indicado en el Decreto Ejecutivo N°32812-COMEX-MINAE-MEIC. Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.01.22.01. Especificaciones técnicas para Asfaltos y Emulsiones Asfálticas

OBSERVACIONES: Los siguientes análisis provienen del informe de análisis indicado entre paréntesis: ASTM D-6930 (17A22). Análisis completo para venta

Acreditación de acuerdo a la Norma INTE-ISO/IEC 17025-2017, ver alcances de acreditación en www.oca.or.cr.

*** Ensayo Acreditado. **Ensayo No acreditado. Todas las referencias ASTM marcadas con un asterisco (*) están asociadas al ensayo acreditado.**



Fuente: RECOPE 2022

c) Base granular

Tabla 4– 13 Caracterización muestras de base granular muestra 1

Base N°1		
Caracterización Material		
N° Muestra:		21-276.1-21 9.94342940; -84.2294788
Coordenadas		-84.2294788
Fecha de Muestreo:		2021-10-12
Ensayo	Resultado	Especificación
Granulometría		
<i>Malla</i>	<i>Pasando</i>	-
63 mm (2 1/2")	100	-
50,8 mm (2")	81	-
37,5 mm (1 1/2")	81	-
25,4 mm (1")	64	-
19,1 mm (3/4")	60	-
12,5 mm (1/2")	53	-
9,5 mm (3/8")	49	-
4,75 mm (N°4)	40	-
425 µm (N°40)	16	-
75 µm (N°200)	6.9	-
Límite Líquido	N.P.	-
Índice Plástico	N.P.	10 máx.
Próctor Modificado T-180 D		
Densidad Máx.	1933	-
Humedad Ópt.	9.7	-
CBR	83	20% mín.
Propiedades fisicomecánicas		
1 o + caras	100	50% mín.
2 o + caras	100	-
sin caras	0	-
Abrasión	37%	50% máx.
Durabilidad	93%	35% mín.
Equivalente de arena	69%	30% mín.
Partículas friables	0%	No presencia
Presencia material orgánica	Más clara que color patrón	No presencia

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

Tabla 4– 14. Caracterización muestras de base granular muestra 2

Base N°2

Caracterización Material		
N° Muestra:		21-276.3-21
Coordenadas		9.94191156;
Fecha de Muestreo:		-84.22751495 2021-10-12
Ensayo	Resultado	Especificación
Granulometría		
<i>Malla</i>	<i>Pasando</i>	-
63 mm (2 1/2")	100	-
50,8 mm (2")	100	-
37,5 mm (1 1/2")	100	-
25,4 mm (1")	83	-
19,1 mm (3/4")	76	-
12,5 mm (1/2")	67	-
9,5 mm (3/8")	62	-
4,75 mm (N°4)	51	-
425 µm (N°40)	20	-
75 µm (N°200)	6.6	-
Límite Líquido	N.P.	-
Índice Plástico	N.P.	10 máx.
Próctor Modificado T-180 D		
Densidad Máx.	1903	-
Humedad Ópt.	9.7	-
CBR	81	20% mín.
Propiedades fisicomecánicas		
1 o + caras	100	50% mín.
2 o + caras	100	-
sin caras	0	-
Abrasión	38%	50% máx.
Durabilidad	91%	35% mín.
Equivalente de arena	70%	30% mín.
Partículas friables	0%	No presencia
Presencia material orgánica	Más clara que color patrón	No presencia

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

d) RAP

Muestra tomada en el apilamiento situado en el intercambio de Escobal (km 42+000)

Tabla 4- 15. Caracterización muestra de RAP

Caracterización Material		
N° Muestra:		21-275-21
Fecha de Muestreo:		2021-10-12
Ensayo	Resultado	Especificación
Granulometría		
<i>Malla</i>	<i>Pasando</i>	-
63 mm (2 1/2")	100	-
50,8 mm (2")	100	100-100
37,5 mm (1 1/2")	97	97-100
25,4 mm (1")	91	76-100
19,1 mm (3/4")	82	65-100
12,5 mm (1/2")	64	55-90
9,5 mm (3/8")	52	48-80
4,75 mm (N°4)	37	35-62
2.36 mm (N°8)	26	25-47
1.18 mm (N°16)	20	18-36
600 µm (N°30)	13	12-27.
425 µm (N°40)	11	10-24.
300 µm (N°50)	8	8-21.
150 µm (N°100)	5	3-16.
75 µm (N°200)	2	2-10.
Límite Líquido	N.P.	-
Índice Plástico	N.P.	10 máx.
Próctor Modificado T-180 D		
Densidad Máx.	1812	-
Humedad Ópt.	3.2	-
Propiedades fisicomecánicas		
Recubrimiento y adherencia	73%	60% mín.
ITS	No activo (54 kPa)	Máx. 100 kPa
Presencia material orgánica	Más clara que color patrón	No presencia

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

e) Material por estabilizar con emulsión de rompimiento lento

Tabla 4– 16. Caracterización de material por estabilizar

Caracterización Material		
N° Muestra:		21-275-21
Fecha de Muestreo:		2021-10-12
Ensayo	Resultado	Especificación. Tabla 1 de la guía de estabilización.
Granulometría		
<i>Malla</i>	<i>Pasando</i>	-
63 mm (2 1/2")	100	-
50,8 mm (2")	100	100-100
37,5 mm (1 1/2")	98	97-100
25,4 mm (1")	87	76-100
19,1 mm (3/4")	80	65-100
12,5 mm (1/2")	67	55-90
9,5 mm (3/8")	57	48-80
4,75 mm (N°4)	36	35-62
2.36 mm (N°8)	26	25-47
1.18 mm (N°16)	21	18-36
600 µm (N°30)	14	12-27.
425 µm (N°40)	11	10-24.
300 µm (N°50)	8	8-21.
150 µm (N°100)	7	3-16.
75 µm (N°200)	5.7	2-10.
Límite Líquido	N.P.	-
Índice Plástico	N.P.	10 máx.
Próctor Modificado T-180 D		
Densidad Máx.	1905	-
Humedad Ópt.	9.7	-

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

Para la combinación de ambos materiales, se tiene un estimado de 15.0 cm de espesor a estabilizar, de los cuales 5,0 cm corresponden a base granular existente y los restantes 10,0 cm a RAP. La granulometría, densidad seca máxima y humedad óptima, y el moldeo de pastillas Marshall con los distintos puntos de asfalto residual, se realizaron con los porcentajes establecidos.

Figura 4-13. Agregados y emulsión asfáltica previo al moldeo de pastillas Marshall, noviembre 2021



Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

Figura 4-14. Ensayos de recubriendo y adherencia de los agregados y emulsión asfáltica, noviembre 2021



Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

2) Diseño de estabilización con asfalto

a) Parámetros y datos de diseño

Obteniendo las caracterizaciones de los agregados presentados anteriormente, se procedió a la realización de puntos óptimo de humedad por medio del ensayo de compactación modificado. Cada punto de la curva de compactación posee un porcentaje de asfalto residual.

Los puntos de asfalto residual se establecen en la tabla 9 (estimación del porcentaje de asfalto inicial) de la Guía de Diseño Materiales estabilizados con asfalto. La cual indica rangos de material pasando la malla N°200 y N°4; para estimar el punto inicial de asfalto.

Tabla 4–17. Estimación del porcentaje de asfalto inicial

Fracción pasando el tamiz N° 200 (%)	Adición de asfalto espumado % sobre peso seco de agregado		Material típico
	Fracción pasando el tamiz N° 4		
	< 50 %	> 50 %	
< 4	2,0	2,0	RAP
4 - 7	2,2	2,4	RAP/Piedra triturada graduada, gravas naturales, mezclas de las anteriores
7 - 10	2,4	2,8	
> 10	2,6	3,2	Gravas/arenas

Fuente: Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto, Lanamme UCR 2020.

A continuación, se muestra la densidad máxima seca y el óptimo de humedad obtenidos del ensayo de Proctor:

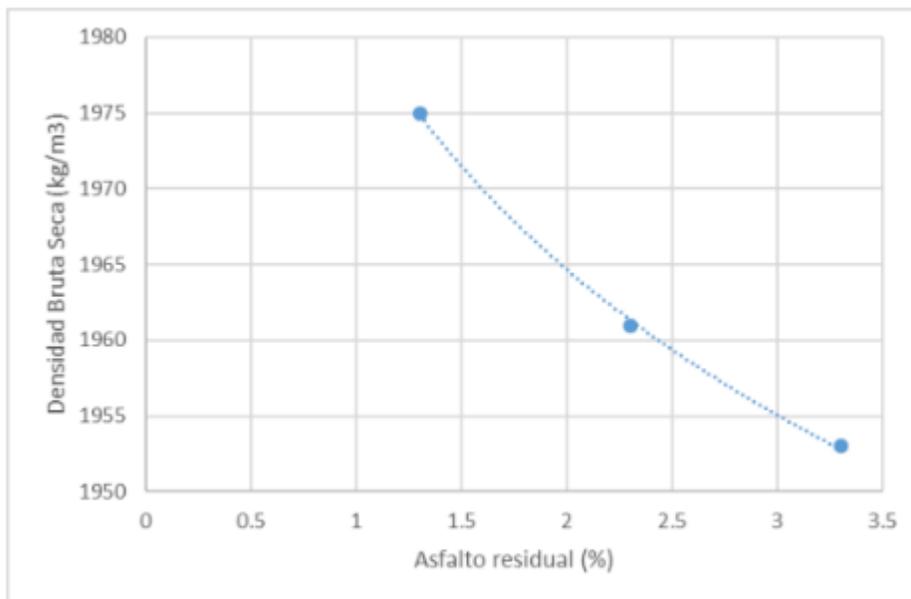
Tabla 4–18. Resultados de densidad obtenida en función del contenido de asfalto residual, noviembre 2021

Asfalto residual (%)	Densidad Bruta Seca (kg/m ³)	Humedad Optima (%)
1.3	1975	8.8
2.3	1961	9.0
3.3	1953	9.3

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

En la figura a continuación, se muestra la gráfica de la densidad bruta seca contra el contenido de asfalto residual:

Figura 4–15. Gráfica de Densidad Bruta Seca versus Asfalto residual, noviembre 2021



Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

A continuación, se muestra los resultados de densidad bruta promedio obtenido de los tres especímenes realizados:

Tabla 4–19. Resultados de densidad bruta promedio, noviembre 2021

-	N° Pastilla	Altura (mm)					Diámetro (mm)					Volumen (m³)	Peso (g)	Densidad Bruta (kg/m³)	Densidad Bruta Promedio (kg/m³)
		1	2	3	4	Promedio	1	2	3	4	Promedio				
1.3%	1	62.5	62.2	62.4	62.4	62.4	101.8	102.0	102.0	101.8	101.9	0.0005068	1021.5	2008	2015
	2	64.1	64.3	62.8	63.6	63.7	101.4	101.5	101.5	101.5	101.5	0.0005150	1021.4	1983	
	3	62.2	62.0	62.4	62.3	62.2	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5	0.0005035	1025.8	2037	
	4	62.2	62.0	62.4	62.3	62.2	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5	0.0005035	1025.8	2037	
	5	62.1	62.1	62.2	62.2	62.1	101.7	101.7	101.7	101.7	101.7	0.0005050	1029.9	2040	
	6	61.0	61.2	61.2	61.4	61.2	102.9	102.9	103.1	103.1	103.0	0.0005098	1027.2	2015	
	7	62.8	63.2	63.1	62.6	62.9	101.6	101.6	101.7	101.8	101.7	0.0005110	1022.5	2001	
	8	62.8	63.2	63.1	62.6	62.9	101.6	101.6	101.7	101.8	101.7	0.0005110	1022.5	2001	
2.3%	1	64.7	64.7	64.5	64.5	64.6	101.5	101.5	101.5	101.6	101.5	0.0005228	1037.2	1984	1972
	2	63.3	63.2	62.9	63.1	63.1	103.3	103.1	103.3	103.2	103.2	0.0005284	1031.5	1952	
	3	64.3	64.3	64.1	64.3	64.2	101.7	101.7	101.6	101.5	101.6	0.0005212	1034.0	1984	
	4	64.3	64.3	64.1	64.3	64.2	101.7	101.7	101.6	101.5	101.6	0.0005212	1034.5	1985	
	5	65.1	65.1	65.1	65.0	65.1	101.7	101.7	101.6	101.7	101.7	0.0005283	1033.6	1956	
	6	65.3	65.7	65.4	65.4	65.4	102.0	101.8	102.0	101.9	101.9	0.0005336	1037.7	1945	
	7	64.3	64.8	64.4	64.3	64.4	101.6	101.7	101.5	101.5	101.6	0.0005222	1037.9	1988	
	8	64.3	64.8	64.4	64.3	64.4	101.6	101.7	101.5	101.5	101.6	0.0005222	1035.9	1984	
3.3%	1	64.4	64.5	64.7	64.5	64.5	101.9	101.7	101.6	101.8	101.7	0.0005246	1023.2	1951	1976
	2	65.4	65.6	65.5	65.3	65.4	101.8	101.5	101.4	101.5	101.5	0.0005298	1035.9	1955	
	3	63.9	63.8	63.4	63.7	63.7	101.6	101.4	101.6	101.5	101.5	0.0005159	1029.3	1995	
	4	63.9	63.8	63.4	63.7	63.7	101.6	101.4	101.6	101.5	101.5	0.0005159	1029.3	1995	
	6	63.5	63.4	63.1	63.1	63.3	102.2	102.2	102.1	102.1	102.2	0.0005184	1020.6	1969	
	7	63.1	62.9	63.1	63.0	63.0	102.0	101.9	101.9	101.9	101.9	0.0005141	1023.4	1991	
	8	64.2	64.1	63.9	64.0	64.1	101.9	101.8	102.1	101.1	101.7	0.0005205	1029.3	1977	
	9	64.2	64.1	63.9	64.0	64.1	101.9	101.8	102.1	101.1	101.7	0.0005205	1029.3	1977	

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

A continuación, se muestran los porcentajes de relación de tensión diametral obtenidos con las pastillas moldeadas:

Tabla 4–20. Resultados de relación de tensión diametral, noviembre 2021

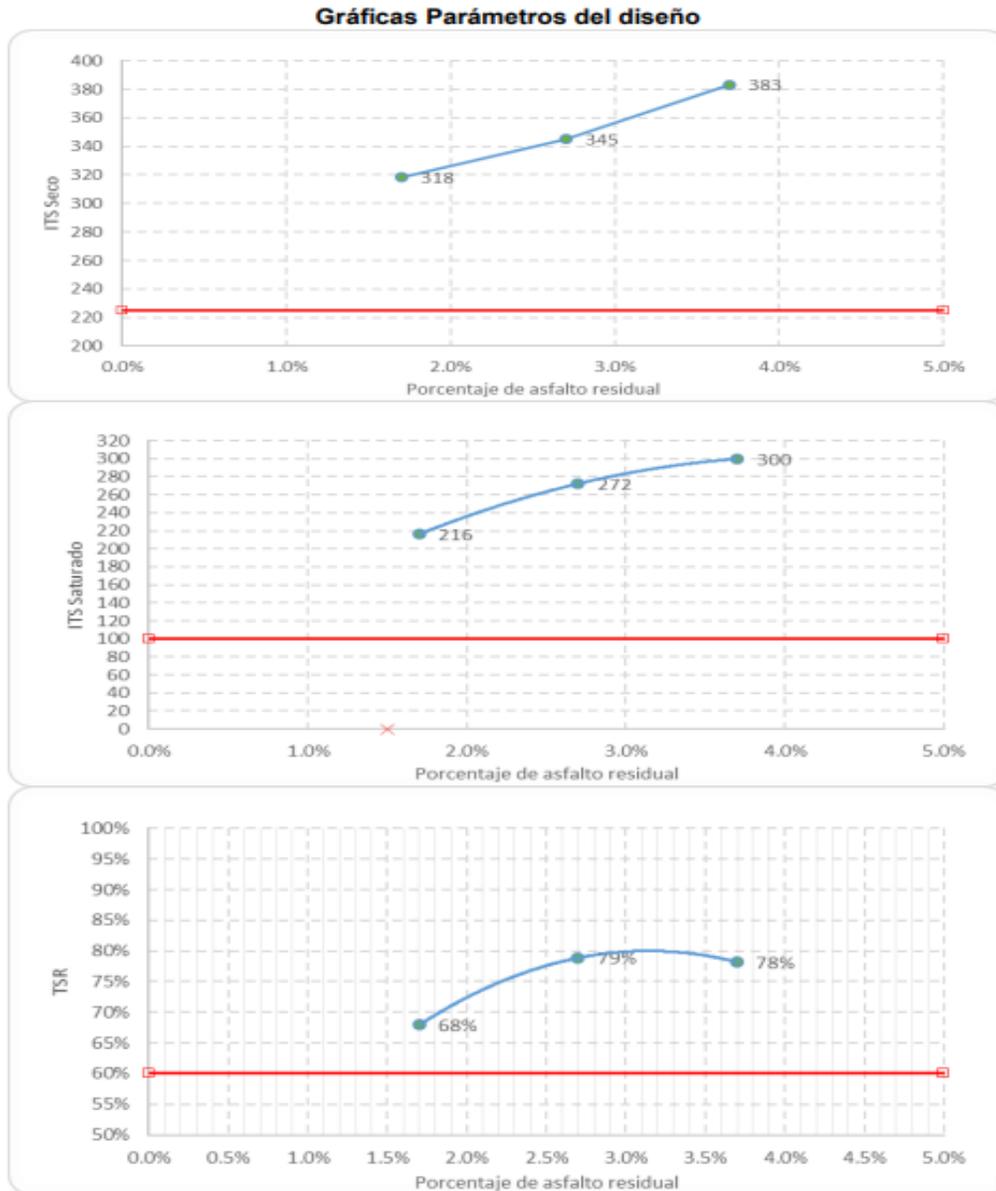
-	N° Pastilla	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Volumen (m3)	Fuerza (kN)	Resistencia (kPa)	Resistencia Promedio (kPa)	Relación Tensión Diametral
Punto 1.3%	1	62.4	101.9	0.0005088	2.347	235	Cond. 231	65%
	2	63.7	101.5	0.0005150	2.411	237		
	3	62.2	101.5	0.0005035	2.238	226		
	4	62.2	101.5	0.0005035	2.238	226		
	5	62.1	101.7	0.0005050	3.425	345	Sin Cond. 358	
	6	61.2	103.0	0.0005098	3.313	335		
	7	62.9	101.7	0.0005110	3.774	375		
	8	62.9	101.7	0.0005110	3.774	375		
Punto 2.3%	1	64.6	101.5	0.0005228	2.958	287	Cond. 264	89%
	2	63.1	103.2	0.0005284	2.957	289		
	3	64.2	101.6	0.0005212	2.469	241		
	4	64.2	101.6	0.0005212	2.469	241		
	5	65.1	101.7	0.0005283	3.604	347	Sin Cond. 298	
	6	65.4	101.9	0.0005336	2.738	261		
	7	64.4	101.6	0.0005222	3.011	293		
	8	64.4	101.6	0.0005222	3.011	293		
Punto 3.3%	1	64.5	101.7	0.0005246	3.107	301	Cond. 299	78%
	2	65.4	101.5	0.0005298	3.122	299		
	3	63.7	101.5	0.0005159	3.036	299		
	4	63.7	101.5	0.0005159	3.036	299		
	5	63.3	102.2	0.0005184	3.764	371	Sin Cond. 384	
	6	63.0	101.9	0.0005141	3.959	392		
	7	64.1	101.7	0.0005205	3.959	387		
	8	64.1	101.7	0.0005205	3.959	387		

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

b) Fórmula de trabajo

El contenido de ligante se calcula con base en el estudio de los valores obtenidos, curvas y criterios de diseño establecidos por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), se define un valor de emulsión óptima sobre el agregado de 2.0% (5.65 l/m²). Este óptimo posee un factor de seguridad del 15% propuesto por el diseñador debido a que el método de diseño no considera un factor de seguridad, con este factor se pretende contrarrestar posibles errores o variaciones del diseño en campo.

Figura 4–16 Gráficas para parámetros de diseño, noviembre 2021



Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

Con este porcentaje óptimo se tienen las siguientes características de la Fórmula de Trabajo de la mezcla, la cual cumple con las especificaciones propuestas para el proyecto:

Tabla 4–21. Parámetros de la mezcla con el óptimo de emulsión establecido por la Guía de Diseño, noviembre 2021

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN	RANGO DE TRABAJO
Contenido de emulsión sobre agregado	%	2.00%
Densidad Máxima de la mezcla	kg/m ³	1970
Humedad Óptima	%	9.0
ITS Seca	225 kPa mín.	326
ITS Saturada	100 kPa mín.	235
Relación TSR	Mín 60%	68%
Dosificación en 15,0 cm de espesor	lt/m ²	5.65

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

c) Recomendaciones

El diseño debe ser evaluado mediante mezclado y paño de prueba en el sitio de producción para verificar la mezcla y obtener la fórmula para el trabajo en concordancia con lo que se establece en los requerimientos técnicos.

Se recomienda tener un estricto control sobre la granulometría de los agregados, y la fuente de emulsión, así como la tasa de riego aplicada y la humedad del material en sitio durante el proceso de producción, a fin de mantener un producto homogéneo con un comportamiento mecánico adecuado.

4.2.3 Especificaciones técnicas para licitación privada

Para llevar cabo la construcción del paño de prueba propuesto se procedió con un proceso de compras en el cual se solicitó una cotización a tres distintos proveedores, se realizó un análisis de las ofertas recibidas y por último la adjudicación del proyecto mediante la emisión de una orden de compra.

Seguidamente, se presentan las especificaciones técnicas solicitadas a las empresas participantes:

d) Descripción del proyecto

- Acarreo, colocación, estabilización y conformación de una capa de 15 cm de espesor de RAP y Base Granular existente estabilizado con emulsión asfáltica de rompimiento lento con una dosificación de 5,85 L/m² y posteriormente, un TSB-1 compuesto por una dosificación de 1,1 L/m² + polvo de piedra.
- El ancho promedio es de 7,5 m.
- La distancia de acarreo entre del RAP a la marginal es de 33 km aproximadamente.
- El diseño de estabilización lo aporta Globalvia.
- Considerar en la oferta los requerimientos de control de calidad mínimos que van a emplear, la cantidad y la frecuencia (verificaciones de compactación, tasa de riego)
- Equipo mínimo requerido: niveladora, tanque de agua, recuperadora, distribuidor de emulsión, compactadora de rodillo, compactador llanta de hule, back hoe, distribuidor de agregados y por lo menos 4 vagonetas. Se debe indicar las características, modelo y rendimiento de los equipos que se dispondrán para la ejecución de las obras.
- Indicar el tiempo estimado para la ejecución de la obra.

e) Se adjunta un plano con la vista en planta y perfil longitudinal de la marginal y algunas fotografías ilustrativas de la condición actual

Figura 4-18 Registro fotográfico de la condición de la marginal previo a la rehabilitación



Condición de marginal previo a la intervención



Acceso ilegal y empozamiento de agua sobre la calzada



Superficie de ruedo en TSB-2



Condición general de la superficie de ruedo en TSB-2

Fuente: Propia, Ruta 27

4.2.4 Aseguramiento, control y verificación de la calidad

- a) Pruebas de deflectometría de impacto (FWD) ASTM D 4694 y cálculo de módulos de rigidez (antes de rehabilitación)

Se realizaron un total de 13 mediciones distribuidas siete en el carril derecho y las seis en el carril izquierdo de la marginal. Se muestran en las siguientes tablas los resultados de deflexiones obtenidas y el cálculo del módulo de rigidez.

Tabla 4–22. Deflexiones y módulos de rigidez previos a la rehabilitación, enero 2022

Fecha y hora	Lado	Estación	Presión	Temperatura del aire	Temperatura de la superficie	Medidas de campo						
						D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1/4/2022 6:24	LD	0.000	568.5	21.3	18.0	799.2	367.7	155.8	90.9	62.1	41.9	34.7
1/4/2022 6:29	LD	0.100	601.3	21.3	18.6	731.3	374.6	209.0	135.2	88.6	64.6	44.3
1/4/2022 6:30	LD	0.201	581.6	21.2	18.6	483.4	187.7	99.8	74.3	60.7	47.2	38.7
1/4/2022 6:31	LD	0.300	587.8	21.4	18.6	683.2	245.0	134.4	87.9	63.2	51.5	39.4
1/4/2022 6:33	LD	0.400	566.1	21.4	18.5	521.2	166.9	138.1	92.6	60.1	41.5	35.7
1/4/2022 6:34	LD	0.500	574.0	21.5	20.6	579.6	212.0	96.1	87.0	58.4	45.6	20.7
1/4/2022 6:35	LD	0.600	655.6	21.5	19.9	615.2	215.5	124.8	69.1	57.5	38.7	22.3
1/4/2022 6:39	LI	0.550	583.4	21.9	19.1	581.6	175.4	90.2	57.5	50.3	26.4	18.6
1/4/2022 6:41	LI	0.450	591.1	21.9	19.0	610.1	256.2	141.1	87.2	60.3	43.5	29.7
1/4/2022 6:42	LI	0.350	591.0	21.9	19.3	488.3	225.0	122.1	83.0	59.7	42.7	38.1
1/4/2022 6:43	LI	0.249	600.0	21.8	19.0	466.2	235.0	133.1	82.8	59.0	43.6	32.3
1/4/2022 6:44	LI	0.150	590.4	22.0	19.0	598.7	258.4	147.7	86.8	60.3	39.5	33.5
1/4/2022 6:45	LI	0.049	576.0	22.6	19.6	628.7	301.0	177.1	133.1	84.5	52.7	42.8

Mediciones normalizado							Módulo resiliente (Mpa)		Módulo resiliente (PSI)	
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Granular	Subrasante	Granular	Subrasante
795.5	366.0	155.1	90.5	61.8	41.7	34.5	310.1	105.5	44979.1	5099.0
688.2	352.5	196.7	127.2	83.4	60.8	41.7	505.3	97.1	73280.3	4695.8
470.4	182.7	97.1	72.3	59.1	45.9	37.7	506.3	184.4	73438.4	8916.0
657.8	235.9	129.4	84.6	60.8	49.6	37.9	316.9	146.5	45956.6	7083.2
521.0	166.8	138.0	92.6	60.0	41.5	35.7	427.6	176.1	62018.1	8513.2
571.4	209.0	94.8	85.8	57.6	44.9	20.4	360.5	169.9	52290.4	8213.5
531.0	186.0	107.8	59.6	49.7	33.4	19.3	378.7	187.0	54920.0	9042.6
564.2	170.1	87.5	55.8	48.8	25.6	18.1	297.3	208.7	43121.2	10091.2
584.0	245.2	135.1	83.5	57.7	41.6	28.4	428.7	142.9	62179.1	6907.7
467.6	215.5	116.9	79.4	57.1	40.9	36.5	632.5	158.8	91734.9	7678.8
439.6	221.6	125.5	78.1	55.6	41.1	30.5	779.2	153.5	113007.6	7422.1
573.8	247.6	141.6	83.2	57.8	37.9	32.1	458.3	140.4	66467.9	6785.3
617.6	295.7	174.0	130.7	83.0	51.8	42.0	545.0	111.0	79038.3	5365.4
								Percentil 16	45,878	5,344

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

b) Pruebas de deflectometría de impacto (FWD) ASTM D 4694 y cálculo de módulos de rigidez (después de rehabilitación)

Se realizaron un total de 15 mediciones distribuidas ocho en el carril derecho y las siete en el carril izquierdo de la marginal. A continuación, se muestran los resultados de deflexiones obtenidas y el cálculo del módulo de rigidez.

Tabla 4–23. Deflexiones y módulos de rigidez después de la rehabilitación, enero 2022

Fecha y hora	Lado	Estación	Presión	Temperatura del aire	Temperatura de la superficie	Medidas de campo						
						D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1/20/2022 6:39	LD	0.000	597.7	21.3	18.1	889.6	431.0	169.3	88.8	60.5	51.5	40.7
1/20/2022 7:01	LI	0.050	562.8	22.6	20.8	682.1	288.3	161.4	112.1	76.5	58.9	35.9
1/20/2022 6:42	LD	0.100	606.6	21.3	18.6	919.0	401.1	210.3	132.8	70.3	53.2	38.5
1/20/2022 7:00	LI	0.150	590.0	22.0	18.8	897.1	316.4	151.1	117.1	69.9	53.5	38.7
1/20/2022 6:43	LD	0.201	571.8	21.4	18.6	628.0	196.4	100.7	75.9	64.4	55.9	38.4
1/20/2022 6:57	LI	0.250	576.0	22.0	18.9	563.7	198.4	111.3	80.5	64.0	45.4	37.5
1/20/2022 6:44	LD	0.301	576.7	21.5	18.8	765.3	267.1	112.9	74.3	64.8	56.0	41.4
1/20/2022 6:56	LI	0.350	578.7	22.1	19.6	578.8	203.3	130.7	87.8	71.2	59.5	39.8
1/20/2022 6:45	LD	0.400	575.4	22.1	18.8	753.6	238.5	103.0	77.4	69.1	53.1	25.3
1/20/2022 6:55	LI	0.449	566.1	22.0	19.2	632.9	223.6	112.9	74.0	65.5	46.1	31.9
1/20/2022 6:47	LD	0.501	576.8	22.4	18.6	623.7	213.2	105.2	61.9	47.7	36.5	27.3
1/20/2022 6:53	LI	0.550	578.1	22.3	19.9	620.9	165.6	86.7	57.9	51.6	48.0	23.5
1/20/2022 6:48	LD	0.600	576.3	22.2	19.1	747.0	231.5	96.7	66.3	55.5	48.5	32.9
1/20/2022 6:52	LI	0.650	572.3	22.3	20.4	652.8	268.2	134.4	99.2	88.1	73.3	56.7
1/20/2022 6:49	LD	0.675	576.6	22.3	19.5	733.2	357.8	138.9	86.8	67.6	59.3	32.1

Mediciones normalizado							Módulo resiliente (Mpa)		Módulo resiliente (PSI)	
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Granular	Subrasante	Granular	Subrasante
842.2	408.0	160.2	84.1	57.2	48.8	38.6	300.6	97.5	43592.5	4713.2
685.8	289.9	162.3	112.7	76.9	59.3	36.1	226.9	124.6	32912.0	6023.4
857.3	374.2	196.2	123.9	65.6	49.6	35.9	295.9	100.9	42916.7	4879.6
860.4	303.5	145.0	112.3	67.1	51.3	37.1	228.9	124.9	33199.1	6039.9
621.5	194.3	99.7	75.1	63.8	55.3	38.0	297.7	184.3	43170.5	8909.2
553.8	194.9	109.3	79.1	62.9	44.6	36.9	386.2	180.3	56016.5	8716.3
750.9	262.1	110.8	72.9	63.6	54.9	40.6	252.1	148.8	36568.4	7195.8
566.0	198.8	127.8	85.9	69.7	58.2	38.9	400.1	168.1	58028.1	8128.4
741.1	234.6	101.3	76.1	67.9	52.2	24.9	228.3	170.2	33110.7	8229.4
632.7	223.5	112.9	74.0	65.4	46.0	31.9	319.9	165.7	46391.8	8011.9
611.9	209.2	103.2	60.7	46.8	35.8	26.8	308.6	183.2	44764.4	8855.5
607.8	162.1	84.9	56.7	50.5	47.0	23.0	261.6	224.2	37941.9	10838.7
733.5	227.4	95.0	65.1	54.5	47.7	32.3	226.0	162.4	32774.2	7853.3
645.4	265.1	132.9	98.1	87.1	72.5	56.1	386.5	127.2	56051.3	6148.6
719.5	351.2	136.3	85.2	66.4	58.1	31.5	367.1	110.7	53246.2	5349.5
								Percentil 16	33,132	5,511

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

c) Determinación de densidad por densimetría nuclear ASSHTO T 310

Se llevaron a cabo un total de 12 chequeos de compactación en sitio utilizando un densímetro nuclear por parte del laboratorio verificador de la calidad, los resultados a continuación:

Tabla 4–24. Chequeos de compactación, enero 2022

Chequeos de compactación						
Sitio	Número de muestra	Densidad Seca kg/m ³	Densidad Humeda kg/m ³	Contenido de humedad %	Densidad comparativa kg/m ³	Porcentaje de compactación %
Estación 0+050	20-010.1-21	1967	2174	10.5	1970	99.8
		1973	2173	10.1	1970	100.2
		1959	2149	9.7	1970	99.4
	Promedio	1966	2165	10.1	1970	99.8
Estación 0+100	20-010.2-21	1884	2101	11.5	1970	95.6
		1890	2105	11.4	1970	95.9
		1892	2118	11.9	1970	96.0
	Promedio	1889	2108	11.6	1970	95.9
Estación 0+150	20-010.3-21	2004	2217	10.6	1970	101.7
		2002	2208	10.3	1970	101.6
		1991	2179	9.4	1970	101.1
	Promedio	1999	2201	10.1	1970	101.5
Estación 0+190	20-010.4-21	1981	2192	10.7	1970	100.6
		1968	2175	10.5	1970	99.9
		1959	2149	9.7	1970	99.4
	Promedio	1969	2172	10.3	1970	100.0
Estación 0+220	20-010.5-21	1991	2179	9.4	1970	101.1
		1968	2175	10.5	1970	99.9
		1967	2162	9.9	1970	99.8
	Promedio	1975	2172	10.0	1970	100.3
Estación 0+240	20-010.6-21	1907	2130	11.7	1970	96.8
		1946	2170	11.5	1970	98.8
		1925	2135	10.9	1970	97.7
	Promedio	1926	2145	11.4	1970	97.8
Estación 0+280	20-010.7-21	1971	2171	10.1	1970	100.1
		1973	2173	10.1	1970	100.2
		1959	2149	9.7	1970	99.4
	Promedio	1968	2164	10.0	1970	99.9

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

Tabla 4-25. Chequeos de compactación, enero 2022

Chequeos de compactación						
Sitio	Número de muestra	Densidad Seca	Densidad Humeda	Contenido de humedad	Densidad comparativa	Porcentaje de compactación
		kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	%
Estación 0+390	20-011.1-21	1937	2135	10.2	1970	98.3
		1932	2120	9.7	1970	98.1
		1943	2134	9.8	1970	98.6
	Promedio	1937	2130	9.9	1970	98.3
Estación 0+460	20-011.2-21	1921	2117	10.2	1970	97.5
		1964	2169	10.4	1970	99.7
		1946	2150	10.5	1970	98.8
	Promedio	1944	2145	10.4	1970	98.7
Estación 0+530	20-011.3-21	1981	2227	12.4	1970	100.6
		1958	2212	13.0	1970	99.4
		1975	2223	12.6	1970	100.3
	Promedio	1971	2221	12.6	1970	100.1
Estación 0+620	20-011.4-21	1919	2133	11.2	1970	97.4
		1900	2112	11.2	1970	96.4
		1905	2122	11.4	1970	96.7
	Promedio	1908	2122	11.2	1970	96.9
Estación 0+220	20-011.5-21	1914	2119	10.7	1970	97.2
		1909	2114	10.7	1970	96.9
		1931	2122	9.9	1970	98.0
	Promedio	1918	2118	10.4	1970	97.4

Fuente: Certificado de Finalización de Obra, Laboratorio Ingeniería Gamboa S.A 2022

Para el buen desempeño de las mezclas estabilizadas con asfalto la compactación es fundamental, por lo que es necesario alcanzar la máxima densidad posible, debido a lo anterior se estableció como mínimo requerido llegar al menos a un 98% de compactación según la densidad máxima seca del Proctor modificado. En sitio, de un total de 12 puntos analizados, cuatro arrojaron resultados por debajo de las condiciones de diseño establecidas con resultados promedio de 95,9% - 97,8% - 96,9% y 97,4%.

d) Medición de tasa de aspersión

Para llevar a cabo la medición y calibración de la tasa de aspersión de emulsión asfáltica aplicada, el laboratorio de autocontrol de la calidad utilizó el método ASTM D-2995. A continuación, se presentan los resultados reportados por el laboratorio de autocontrol de la calidad.

i) Medición de tasa de aspersión de emulsión asfáltica durante el proceso de estabilización

Tabla 4–26. Medición tasa de aspersión aplicada para estabilización, enero 2022

Fecha de ejecución	Muestra	Ubicación	Parámetro	Sentido Longitudinal	Parámetro	Sentido Transversal
12-01-2022	01-0375-2022	Marginal ruta 27	Bitumen (l/m ²)	5,7	Bitumen (l/m ²)	5,7

Fuente: Informe Tasa de Aspersión, Laboratorio ICOMA Consultores S.A

- ii) Medición de tasa de aspersión de emulsión asfáltica y polvo de piedra durante la construcción del TSB-1

Tabla 4–27. Medición tasa de aspersión aplicada para construcción de TSB-1, enero 2022

Fecha de ejecución	Muestra	Ubicación	Parámetro	Sentido Longitudinal	Parámetro	Sentido Transversal
14-01-2022	01-0378-2022	0+714 a 0+614	Bitumen (l/m ²)	1,17	Bitumen (l/m ²)	1,16
14-01-2022	01-0379-2022	0+714 a 0+614	Riego polvo piedra (l/m ²)	9,0	Riego polvo piedra (l/m ²)	-

Fuente: Informe Tasa de Aspersión, Laboratorio ICOMA Consultores S.A

- e) Resistencia retenida a la tensión diametral en mezclas asfálticas, AASHTO T-283
Método de ensayo para la resistencia retenida a la tensión diametral realizado por el proveedor como autocontrol de la calidad.

Tabla 4–28. Resultados tensión diametral del material estabilizado, enero 2022

Muestra		01-0376-2022					
Fecha de realización		12/1/2022					
Espécimen	Peso Húmedo	Después de 72 horas en horno			Acondicionamiento	Carga de Falla (kN)	Tensión Diametral (%)
		Peso Seco	Altura	Diámetro			
1,0	1033,1	994,0	62,68	101,18	SECO	3,644	71,10
2,0	1012,0	968,8	62,10	101,42	SECO	3,744	
3,0	1033,7	996,5	63,90	101,15	SECO	3,749	
4,0	1016,6	986,3	62,37	101,09	ACONDICIONADO	2,750	
5,0	1011,7	982,9	62,15	101,26	ACONDICIONADO	2,590	
6,0	1024,0	990,9	62,35	101,56	ACONDICIONADO	2,578	

Muestra		01-0377-2022					
Fecha de realización		12/1/2022					
Espécimen	Peso Húmedo	Después de 72 horas en horno			Acondicionamiento	Carga de Falla (kN)	Tensión Diametral (%)
		Peso Seco	Altura	Diámetro			
1,0	1033,1	994,1	62,68	101,18	SECO	3,645	70,90
2,0	1012,6	968,6	63,84	101,44	SECO	3,724	
3,0	1033,5	996,3	63,91	101,16	SECO	3,749	
4,0	1016,8	985,4	62,30	101,05	ACONDICIONADO	2,753	
5,0	1011,5	982,6	62,18	101,23	ACONDICIONADO	2,596	
6,0	1022,9	990,8	62,13	101,50	ACONDICIONADO	2,581	

Fuente: Informe Tensión Diametral, Laboratorio ICOMA Consultores S.A

4.2.5 Rehabilitación de calle marginal *Hacienda Brasil*

A continuación, se describe mediante ocho pasos el proceso constructivo realizado:

- a) Paso 1: Acarreo y colocación de una capa uniforme de 10 cm de RAP procedente el km 42+000 Intercambio de Escobal al sitio de proyecto.

Figura 4-19 Proceso de extendido de RAP sobre la superficie existente previo a la rehabilitación



Fuente: Propia, Ruta 27

- b) Paso 2: Utilizando los “rippers” o uñas de las motoniveladoras, se combinó y desconfinó la superficie resultante a una profundidad de 15 cm.

Figura 4-20 Proceso previo a la dosificación de emulsión asfáltica



Fuente: Propia, Ruta 27

- c) Paso 3: Utilizando un tanque distribuidor de agua se incorporó de forma gradual un poco de contenido de humedad al material mediante pequeñas dosificaciones de agua controladas sin exceder el contenido de humedad óptimo del material.



Figura 4-21 Aplicación de humedad al material previo a la dosificación de emulsión asfáltica
Fuente: Propia, Ruta 27

- d) Paso 4: Seguidamente, se aplicó una tasa de riego con emulsión asfáltica de rompimiento lento de 5,85 l/m² utilizando un tanque distribuidor. Se verificó el cumplimiento de la tasa de riego por parte del personal de autocontrol y verificación de la calidad.

Figura 4-22 Aplicación de la dosificación de emulsión asfáltica de rompimiento lento



Fuente: Propia, Ruta 27

- e) Paso 5: Consecuentemente, se incorporó la recuperadora de caminos, para llevar a cabo el proceso de homogenización del material resultante con el estabilizador asfáltico.

Figura 4-23 Estabilización de material con emulsión asfáltica de rompimiento lento a 15 cm de profundidad



Fuente: Propia, Ruta 27

- f) Paso 6: El material estabilizado se conformó con una motoniveladora de caminos y densificado mediante un compactador de rodillo vibratorio hasta alcanzar porcentajes de compactación igual o mayor al 95%.

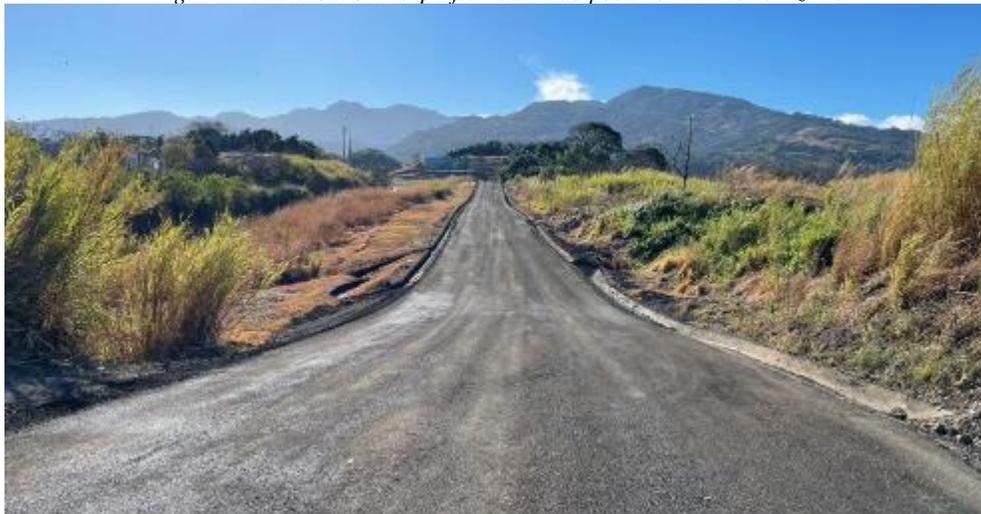
Figura 4–24 Conformación y compactación de material estabilizado



Fuente: Propia, Ruta 27

Seguidamente se muestra el acabado resultante de la superficie de ruedo de la marginal rehabilitada:

Figura 4–25 Acabado de superficie de ruedo posterior a la estabilización



Fuente: Propia, Ruta 27

g) Paso 7: Construcción de un TSB-1 como sello de impermeabilización y acabado final.
Para este paso se aplicó una tasa de riego de 1,1 l/m² seguido de una tasa de 9 kg/m² de polvo de piedra.

Figura 4-26 Construcción de TSB-1



Fuente: Propia, Ruta 27

Finalizado el proceso anterior, se obtuvo el siguiente acabado general en la marginal intervenida con la técnica de estabilización de RAP con emulsión asfáltica de rompimiento lento sellada por medio de un TSB-1:

Figura 4-27 Acabado final de marginal Hacienda Brasil, posterior a su rehabilitación



Fuente: Propia, Ruta 27

Capítulo 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- i) Objetivo específico #1
 - (1) Graduación de agregados: de las granulometrías realizadas a los cuatro diseños de mezcla realizados se puede concluir que la adición de R8© no cambia la granulometría de la mezcla sustancialmente de manera que se produzca algún incumplimiento de los límites inferior o superior de aceptación establecidos en el diseño. Además, no hubo incrementos en el relleno mineral de la mezcla por la incorporación de la resina reciclada. Todos los tratamientos cumplieron los límites de las especificaciones.
 - (2) Características de abrasión y superficie del agregado: no hubo ninguna indicación de que el R8© cambiara negativamente las características del agregado y la abrasión. La estabilidad y el flujo de Marshall indican que la mezcla R8© mantiene sus propiedades de resistencia. La granulometría del agregado es casi la misma, por lo que no se observaron cambios importantes, ni siquiera la presencia del R8© en la mezcla.
 - (3) Viscosidad del ligante asfáltico a altas temperaturas: el incremento en la estabilidad/flujo Marshall y en la rigidez de la MAC determinada con el ensayo de módulo dinámico demuestran que si hay una interacción entre las cadenas poliméricas del R8© y el ligante asfáltico. El efecto es de incrementar la rigidez, lo cual es común cuando se mezclan polímeros provenientes de plástico reciclado con asfalto. Lo importante es que el desempeño a fatiga no fue afectado de manera negativa y, como se esperaba, la resistencia a la deformación aumentó por el hecho del incremento de la rigidez del asfalto.
 - (4) La estabilidad de la mezcla fue muy alta, alrededor de dos veces el valor mínimo de especificación, lo que implica que el R8©-MAC no se distorsionará (ahuellará –rutting) ni se deformará (empuje –shoving-) bajo carga de tráfico. Como se mencionó anteriormente, se esperaba el incremento en la estabilidad siempre que se aumentara el contenido de R8©.
 - (5) Respecto del diseño de mezcla, el proceso de producción en planta, la operación de acarreo, de colocación y compactación in situ se puede decir lo siguiente:
 - El proceso de producción no necesita ningún otro dispositivo especial que los componentes comunes de una planta MAC. Por lo tanto, el alimentador de RAP en el tambor mezclador fue lo suficientemente bueno y adecuado para proporcionar un flujo de RESIN8 controlado y que fue apropiadamente

cuantificado en el proceso de mezclado en tambor mezclador del R8[®] con el agregado pétreo y el asfalto.

- El acarreo y colocación del R8[®]-MAC fue normal y no requirió de ningún equipo adicional ni de operaciones diferentes a las usuales.
- La compactación de R8[®]-MAC alcanzó el nivel exigido por las especificaciones (> 91,0%).

(6) Diseño estructural: El diseño estructural teórico realizado con base en el módulo dinámico de las mezclas asfálticas analizadas en esta investigación, mostraron que los pavimentos que contruidos con una capa de ruedo con R8[®]-MAC van a tener un mejor desempeño que el tramo de control. En el caso de la mezcla con 3% de R8[®] el desempeño a fatiga fue muy superior al tratamiento control y los otros que contenían R8[®].

ii) Objetivo específico #2

- (1) En general, los resultados de la construcción de la sección experimental fueron superiores a la condición previa a la intervención, máxime que se trató de un primer experimento formal en el uso de RAP estabilizado con emulsión asfáltica de rompimiento lento en rutas de bajo tránsito.
- (2) Con medición de la deflectometría de impacto antes y después de la intervención se logró por medio del retrocálculo estimar el módulo de rigidez del material resultante y compararlo con el anterior, llama la atención que el valor obtenido después de la construcción fue menor al existente.
- (3) Los resultados del desempeño y auscultación visual obtenidos en la rehabilitación de la marginal Hacienda Brasil fue satisfactorio, esto permitió generar una campaña de rehabilitación de marginales con esta técnica, con lo cual, se proyecta reutilizar 7,500 m³ de RAP.
- (4) Se evidenció un incremento en el número estructural (SN) del pavimento resultante al momento de compararlo contra el tratamiento superficial bituminoso de dos capas existente.

Recomendaciones

i) Objetivo específico #1

- (1) Continuar realizando un seguimiento mensual de condición del pavimento. La idea es determinar si existe algún tipo de deterioro prematuro que pueda ser debido a la adición de RESIN8 a la mezcla asfáltica. Evaluar mensualmente el desempeño en sitio de cada uno de los tramos de prueba mediante la metodología del PCI (Índice de Condición de Pavimento).

ii) Objetivo específico #2

- (1) Considerar en un mediano plazo, estableciendo un año como máximo, colocar un tratamiento superficial tipo slurry seal para proteger y prolongar la vida útil de la intervención realizada.
- (2) Buscar nuevas alternativas para la reutilización del RAP en las técnicas de mantenimiento y conservación de la red vial, una posibilidad es la elaboración de un diseño de mezcla asfáltica caliente que contenga un porcentaje de RAP.
- (3) Mejorar la rigidez del material resultante mediante la incorporación de un relleno mineral activo como el cemento, de manera que se altere químicamente las propiedades de la mezcla con el objetivo de mejorar su desempeño.
- (4) La construcción de camellones con material homogenizado y aterrizar las cunetas cada cierta distancia, dieron buenos resultados como planes de contingencia para evitar la afectación a cuerpos de agua cercanos por los excedentes de emulsión asfáltica al momento de realizar el riego de imprimación con el distribuidor.

Capítulo 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, D. (2019). Gestión de Proyectos de Construcción bajo una perspectiva de Economía Circular. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- Loría, G. (2021). *Alternativas de uso de la mezcla asfáltica reciclada (RAP) – conocido como perfilado- en pavimentos*. 12, 0–11.
- MacArthur, F. (2015). *HACIA UNA ECONOMÍA CIRCULAR : MOTIVOS ECONÓMICOS PARA*.
- MOPT. (2011). *Plan Nacional de Transportes de Propuesta de Desarrollo Vial Redes Viales y Jerarquía Funcional Volumen 2*.
- Pedregal. (2021). *Propuesta para la Construcción de Tramos de Prueba a Escala Real con Mezcla Asfáltica Modificada con Eco-Arena*.
- PIARC, A. M. de la C. (2019). *Soluciones para una Pavimentación Ecológica y Materiales Sostenibles*.
- Rodríguez, J. (2016). El Mantenimiento Preventivo, Clave Para La Protección Del Patrimonio Vial. *Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales - Universidad de Costa Rica*, 1–6.
- Valdés, G. (2020). Highway trial sections: Performance evaluation of warm mix asphalt and recycled warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 262, 120069.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120069>

Enlaces a sitios web de consulta:

<https://globalviaruta27.com/>

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

<https://www.larepublica.net/noticia/ruta-27-es-la-primera-carretera-del-pais-certificada-en-sostenibilidad>

<https://www.larepublica.net/noticia/tramo-de-ocho-carriles-tunel-y-nuevos-puentes-entre-lo-propuesto-para-ampliar-la-ruta-27>

<https://archive.ellenmacarthurfoundation.org>

<https://semanariouniversidad.com/pais/obras-de-ampliacion-de-ruta-27-san-jose-caldera-empezaran-en-abril-de-2021/>

<https://www.elmundo.cr/costa-rica/ampliacion-de-la-ruta-27-incrementaria-hasta-en-53-la-capacidad-de-la-via/>

<http://www.fundacionconama.org/>

<https://www.piarc.org/>

Capítulo 7 ANEXOS

Anexo 1: Objetivos Desarrollo Sostenible

Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

 Objetivo 1: Poner fin a la POBREZA Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo.	 11 CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES  Conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
 Objetivo 2: HAMBRE Cero Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.	
 Objetivo 3: Buena SALUD Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.	
 Objetivo 4: EDUCACIÓN de calidad Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos.	
 Objetivo 5: IGUALDAD de género Lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y niñas.	
 Objetivo 6: AGUA limpia y saneamiento Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.	
 Objetivo 7: ENERGÍA asequible y sostenible Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.	
 Objetivo 8: TRABAJO decente y crecimiento económico Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.	
 Objetivo 9: INDUSTRIA, innovación, infraestructura Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.	
 Objetivo 10: Reducir INEQUIDADES Reducir la desigualdad en y entre los países.	
 Objetivo 12: CONSUMO responsable y producción Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.	
 Objetivo 13: Acción CLIMÁTICA Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.	
 Objetivo 14: Vida MARINA Conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible.	
 Objetivo 15: Vida en la TIERRA Proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, efectuar una ordenación sostenible de los bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de diversidad biológica.	
 Objetivo 16: Paz, JUSTICIA e instituciones fuertes Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y crear instituciones eficaces, responsables e inclusivas a todos los niveles.	
 Objetivo 17: ALIANZAS para los objetivos Fortalecer los medios de ejecución y revitalizar la alianza mundial para el desarrollo sostenible.	

En la Cumbre para el Desarrollo Sostenible celebrada en septiembre de 2015, los Estados Miembros de la ONU aprobaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que incluye un conjunto de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para poner fin a la pobreza, luchar contra la desigualdad y la injusticia, y hacer frente al cambio climático.

Los ODS, también conocidos como Objetivos Mundiales, se basan en los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), pero van mucho más allá. La incorporación de la necesaria mejora de los espacios urbanos como Objetivo número 11 ha sido uno de los logros más aplaudidos desde ONU Habitat.

