

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de pavimento rígido con losa de hormigón hidráulico utilizando llantas recicladas en una carreta de IV orden Ruta del Cacao – Guayas.

INGE-2503

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Nombre de la titulación

Ingeniero Civil

Presentado por:

Torres Cano Julianny Nohemi

Zuñá Quezada Javier Andrés

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

DEDICATORIA

Este proyecto es dedicado a Dios, por brindarme la sabiduría, fortaleza y constancia. A mis padres, los cimientos de mi vida, por su amor, apoyo incondicional y nunca dejarme solo a lo largo de mi vida. A mi hermano Fabián, por acolitarme y estar siempre. A mi hermana Estefanía, por su constante apoyo, por ser mi fuente de inspiración y consejos. A mi mami María, Johanna y Javier, que desde el cielo me cuidan y guían en cada paso que doy. A mi novia Julianny, su amor, cariño y motivación incondicional hicieron mi vida universitaria, un camino inolvidable.

Gracias por siempre confiar en mi y acompañarme en este bonito capítulo de mi vida, sin ustedes no lo habría logrado.

Javier Andrés Zuña Quezada

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a Dios, por guiar cada paso de mi vida y darme la fortaleza para alcanzar este logro. A mis padres, quienes, con su infinito amor, paciencia, apoyo, y motivación, han sido mi mayor inspiración y ejemplo a seguir. Este logro es para ustedes. A mis abuelitos, Persida Margarita, Francisco y Arelis, por sus consejos y amor incondicional. A mis angelitos María Irene y Álvaro, quienes desde el cielo me cuidan en cada paso que doy.

A mis tías Yadelis, Stephany, Makelis, Karla, Yesi, Yumari, Yeya y tío Jean, Ángel, Alberto, Gian Franco, Samuel, gracias por su increíble amor. Cada uno de ustedes ha sido una parte fundamental en este camino. Y a tío José, que gracias a verte de pequeña haciendo planos y estudiando tanto, me inspiraste a empezar este capítulo de mi vida. Y a Javier, mi otra mitad y el mejor compañero de tesis, te agradezco por tus consejos, tu apoyo y por estar siempre a mi lado.

Julianny Nohemi Torres Cano

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar agradeciendo a Dios por permitirme llegar a este punto de mi vida. A mi tutora, Ing. Natividad García por su apoyo y guía durante la presente. A los miembros del Centro de Innovación Holcim, especialmente al Ing. Jorge Flores y Ing. Henry Zambrano, por su colaboración, disposición y transmisión de conocimientos en la etapa práctica de este proyecto. A mi novia y compañera de tesis, por su esfuerzo y dedicación para culminar con éxito nuestra tesis. A mis amigos y hermanos que me dio la universidad, gracias por hacer más amena mi etapa universitaria.

Javier Andrés Zuña Quezada

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida.

Mi sincero agradecimiento a mi tutora, la Ingeniera Natividad, por su motivación, dedicación y apoyo en nuestra tesis. Extiendo también mi gratitud a los miembros del CIH, Christopher, Charly, especialmente a los Ing. Jorge Flores, al Ing. Henry Zambrano por su invaluable ayuda, conocimientos y valiosos aportes en la parte experimental de nuestro proyecto.

A mis amigas y amigos por su compañerismo, risas y lágrimas compartidas en esta hermosa etapa de mi vida. Finalmente, agradezco de manera especial a mis hermanas de corazón, porque con cariño siempre han estado a mi lado para levantarme en cada caída.

Julianny Nohemi Torres Cano

DECLARACIÓN EXPRESA

Yo Javier Andres Zuña Quezada y Julianny Nohemi Torres Cano acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, Dosificación de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 27 de septiembre del 2024.



Firmado electrónicamente por:
JAVIER ANDRES ZUÑA
QUEZADA

Zuña Quezada Javier



Firmado electrónicamente por:
JULIANNY NOHEMI
TORRES CANO

Torres Cano Julianny

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
INGRID TATIANA ORTA
ZAMBRANO

MSc. Ingrid Orta Zambrano

Profesor de Materia



Firmado electrónicamente por:
NATIVIDAD LEONOR
GARCIA TRONCOSO

PhD. Natividad García Troncoso

Tutor de proyecto

RESUMEN

En las últimas décadas, la disposición final de los neumáticos fuera de uso (NFU), ha representado un desafío ambiental significativo. El presente proyecto se centra en el diseño de un pavimento rígido para la “Ruta del Cacao” en la Provincia del Guayas, basado en la incorporación de NFU como reemplazo parcial del árido fino en la capa de rodadura. El principal objetivo de este estudio es determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de llantas recicladas reemplazadas de manera óptima.

El estudio se desarrolló mediante la comparación de dosificaciones con porcentajes de reemplazo de NFU del 0 (patrón), 3, 5, 7, 10, 20, 50 y 100%, optando por la sustitución del 3% de NFU como reemplazo óptimo, debido a su capacidad para resistir esfuerzos a compresión y flexión, alcanzado los 32.73 y 4.46 MPa respectivamente, logrando reducir el espesor de la capa de rodadura en 1cm. e incrementado su capacidad de resistencia a flexión.

La incorporación del NFU en la mezcla de hormigón no solo garantiza la durabilidad y capacidad de cargar del pavimento, sino que también, reduce las emisiones de CO₂ en un 7.18% y logra ahorrar \$14.512 ,74 del costo total del proyecto, cumpliendo con los ODS 9, 11, 12.

Palabras Clave: Pavimento rígido, Neumáticos fuera de uso, Capa de rodadura, Viabilidad, Reutilización.

ABSTRACT

In recent decades, the final disposal of end-of-life tires (ELT) represents a significant environmental challenge. This project focuses on the design of a rigid pavement for the "Ruta del Cacao" in the Province of Guayas, based on the incorporation of ELT as a partial replacement for fine aggregate in the surface course. The main objective of this study is to determine the technical, economic, and environmental feasibility of optimally using recycled tires as a replacement.

The study was developed by comparing dosages with ELT replacement percentages from 0 (standard), 3, 5, 7, 10, 20, 50, 100%, opting for the 3% ELT replacement as the optimal substitute due to its ability to withstand compressive and flexural stresses, reaching 32.73 and 4.46 MPa. respectively, managing to reduce the thickness of the surface course by 1 cm. and increasing its flexural resistance capacity.

The incorporation of ELT in the concrete mix not only ensures the durability and load capacity of the pavement but also reduces CO₂ emissions by 7.18% and saves \$14,512.74 of the total project cost, aligning with SDG 9, 11, 12.

Keywords: *Rigid pavement, end-of-life tires (ELT), surface course, Viability, Reuse*

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	III
ABREVIATURAS	VIII
SIMBOLOGÍA.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
Capítulo 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Descripción del Problema.....	4
1.3 Justificación del Problema	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
Capítulo 2	7
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
2.1 Revisión de literatura.....	8
2.1.1 Vías.....	8
2.1.2 Pavimentos	8
2.1.3 Tránsito.....	9
2.1.4 Trafico promedio diario anual (TPDA).....	9
2.1.5 Hormigón con caucho de llantas recicladas	10
2.1.6 Ensayos de pavimentos	11
2.2 Área de estudio	12
2.3 Trabajo de campo y laboratorio.....	14

2.4 Análisis de datos	18
2.4.1 Dosificación 1: Diseño patrón (0% de reemplazo de caucho de llanta) del hormigón 19	
2.4.2 Dosificación 2: Diseño con 3% de reemplazo de NUF en el hormigón	19
2.4.3 Dosificación 3: Diseño con 5% de reemplazo de NUF en el hormigón	20
2.4.4 Dosificación 4: Diseño con 7% de reemplazo de NUF en el hormigón	20
2.4.5 Dosificación 5: Diseño con 10% de reemplazo de NUF en el hormigón	21
2.4.6 Dosificación 6: Diseño con 20% de reemplazo de NUF en el hormigón	21
2.4.7 Dosificación 7: Diseño con 50% de reemplazo de NUF en el hormigón	22
2.4.8 Dosificación 8: Diseño con 100% de reemplazo de NUF en el hormigón	22
2.4.9 Análisis preliminar de resistencias a la compresión de las dosificaciones ensayadas. 23	
2.4.10 Análisis definitivo mediante ensayos destructivos y no destructivos.	24
2.5 Análisis de alternativas	32
2.5.1 Factor económico	33
2.5.2 Factor ambiental.....	33
2.5.3 Desempeño mecánico.....	33
2.5.4 Escala de Likert.....	33
2.5.5 Diseño definitivo.	34
Capítulo 3	35
3. DISEÑOS Y ESPECIFICACIONES	36
3.1 Diseño del pavimento rígido.....	36
3.1.1 Periodo de diseño	36
3.1.2 Módulo de elasticidad del hormigón con 3% de NFU (Ec)	37
3.1.3 Módulo de ruptura del hormigón con 3% de NFU (Mr).....	37
3.1.4 Número de Ejes equivalentes ESALs.....	37
3.1.5 Índice de serviciabilidad.....	38
3.1.6 Coeficientes de drenaje (Cd).....	39

3.1.7	Espesor de subbase.....	40
3.1.8	Módulo efectivo de reacción de la subrasante (K).....	40
3.1.9	Nivel de confiabilidad (R).....	41
3.1.10	Desviación estándar total (S_o).....	42
3.1.11	Coefficientes de transferencia de carga (J).....	42
3.1.12	Espesor de losa.....	43
3.1.13	Dimensionamiento de losa.....	44
3.1.14	Barras de transferencia.....	45
3.1.15	Barras de anclaje.....	47
3.1.16	Diseño geométrico de losa con refuerzo de juntas.....	47
3.1.17	Dimensionamiento reservorio de junta.....	48
3.2	Especificaciones técnicas.....	51
3.2.1	Obras preliminares.....	51
3.2.2	Movimiento de tierras.....	54
3.2.3	Obra vial.....	57
Capítulo 4	61
4. ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL	62
4.1	Descripción del proyecto.....	62
4.2	Línea base Ambiental.....	63
4.2.1	Medio físico.....	63
4.2.2	Medio biótico.....	66
4.2.3	Medio territorial.....	67
4.3	Actividades del proyecto.....	68
4.3.1	Preparación del terreno.....	68
4.3.2	Preparación de la sub-base.....	68
4.3.3	Obra vial.....	69
4.4	Identificación de impactos ambientales.....	70

4.5 Valoración de impactos ambientales	72
4.6 Medidas de prevención/mitigación.....	76
4.7 Estimación de la huella de carbono	78
4.8 Conclusiones y recomendaciones del EIA.....	80
Capítulo 5	82
5. PRESUPUESTO.....	83
5.1 Estructura desglosada de trabajo	83
5.2 Rubros y análisis de precios unitarios.....	83
5.2.1 APU 1.1: Desbroce y limpieza.....	84
5.2.2 APU 1.2: Trazado y replanteo.....	85
5.2.3 APU 1.3: Rasanteo de la subrasante.....	86
5.2.4 APU 2.1: Acabado de la obra básica.....	87
5.2.5 APU 2.2: Sub-base e=15 cm	88
5.2.6 APU 2.3: Transporte de sub-base (35 km).....	89
5.2.7 APU 3.1: Losa de hormigón hidráulico 3%NFU e=13cm	90
5.2.8 APU 3.2: Acero de refuerzo junta transversal.....	91
5.2.9 APU 3.3: Acero de refuerzo junta longitudinal.....	92
5.2.10 APU 3.4: Corte de juntas, limpieza, colocación de cordón de resguardo y sello de junta.	93
5.3 Descripción de cantidades de obra.....	94
5.3.1 Desbroce y limpieza	94
5.3.2 Trazado y replanteo.....	95
5.3.3 Rasanteo de la subrasante.....	95
5.3.4 Acabado de la obra básica.....	95
5.3.5 Sub-base e=15cm	95
5.3.6 Transporte de sub-base (35km).....	95
5.3.7 Losa de hormigón hidráulico e=13cm (incluye transporte)	95

5.3.8 Acero de refuerzo junta transversal (Dowells).....	96
5.3.9 Acero de refuerzo junta longitudinal (varilla corrugada).....	96
5.3.10 Corte de juntas, limpieza, colocación de cordón de resguardo y sello de junta.	96
5.4 Valoración integral del costo del proyecto	97
5.5 Cronograma de obra.....	100
Capítulo 6	101
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
6.1 Conclusiones.....	102
6.2 Recomendaciones	104
REFERENCIAS	106
ANEXOS.....	116

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ASTM	American Society for Testing and Materials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Official
ACPC	American Concrete Pavement Association
ACI	American Concrete Institute
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador
NFU	Neumático Fuera de Uso
TPDA	Tráfico Promedio Diario Anual
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
RPA	Rubber Pavements Association
CIH	Centro de Innovación Holcim
TCD	Tracción por Compresión Diametral
ESALs	Ejes Equivalentes de Cargas
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
CBR	California Bearing Ratio
ICPA	Instituto del Cemento Portland Argentino
EPD	Declaración ambiental de los productos
EIA	Estudio de Impacto Ambiental

SIMBOLOGÍA

°C	Grados centígrados
CO ₂	Dióxido de carbono
cm	Centímetro
f'c	Resistencia a la compresión del hormigón
MR	Modulo de ruptura del hormigón
HP	Horsepower
km	Kilómetro
kWh	Kilovatio hora
kg	Kilogramo
kN	Kilonewton
kT	Permeabilidad al aire del concreto
lbf	Libre fuerza
mm	Milímetro
m	Metro
m ³	Metro cúbico
m ²	Metro cuadrado
ml	Metro lineal
mbar	Milibar
m ³ /Km	Metro cúbico por kilómetro
m/s	Metro por segundo
Mn	Manganeso
MPa/m	Megapascal por metro

MPa	Megapascales
N	Newton
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
psi	Libras por pulgada cuadrada
pulg	Pulgada
P	Fósforo
s	Segundo
μs	Microsegundo
V	Velocidad

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Impacto ambiental en el sector de la construcción</i>	3
Figura 2	<i>Vía de estudio: Ruta del Cacao, Km. 46.5 de la Vía a la Costa (3.48 Km.)</i>	13
Figura 3	<i>Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión</i>	23
Figura 4	<i>Diagrama “Escala de Likert” con la calificación de cada dosificación</i>	34
Figura 5	<i>Tabla de conteo de tráfico “Ruta del Cacao”</i>	38
Figura 6	<i>Diseño basado en la metodología AASHTO 1993</i>	44
Figura 7	<i>Vista 3D del diseño de las capas del pavimento</i>	45
Figura 8	<i>Catálogo de barra lisa del Dowell</i>	46
Figura 9	<i>Reforzamiento de las juntas longitudinales.</i>	47
Figura 10	<i>Vista 3D de la losa del pavimento con detalles del refuerzo de juntas</i>	48
Figura 11	<i>Dimensiones recomendadas para reservorio de junta transversal</i>	48
Figura 12	<i>Diseño geométrico de la junta transversal</i>	49
Figura 13	<i>Dimensiones recomendadas para reservorio de junta longitudinal</i>	50
Figura 14	<i>Diseño de la junta longitudinal</i>	50
Figura 15	<i>Mapa de la vía de estudio, extensión: 3.48 Km.</i>	62
Figura 16	<i>Temperaturas tomadas por la Estación Meteorológica Aeropuerto Internacional José Joaquín de Olmedo en el año 2023</i>	65
Figura 17	<i>Precipitaciones tomadas por la Estación Meteorológica Aeropuerto Internacional José Joaquín de Olmedo en el año 2023</i>	65
Figura 18	<i>Mapa de la ruta Cantera Hermano HERSUA – Ruta del Cacao</i>	69
Figura 19	<i>Impactos ambientales causados por la preparación del terreno</i>	70
Figura 20	<i>Impactos ambientales causados por la actividad de preparación de la sub-base</i>	71
Figura 21	<i>Impactos ambientales causados por la actividad de obra vial</i>	71
Figura 22	<i>Ponderaciones seleccionadas de criterios a evaluar</i>	72
Figura 23	<i>Criterios de valoración cualitativa del índice de importancia</i>	73
Figura 24	<i>Calificación del impacto ambiental de acuerdo con el valor del índice IA</i>	73
Figura 25	<i>Concepto de cada criterio a evaluar</i>	74
Figura 26	<i>Valoración de impactos ambientales</i>	75
Figura 27	<i>Medidas de mitigación para la preparación del terreno</i>	76

Figura 28 <i>Medidas de mitigación para la preparación de la sub-base</i>	77
Figura 29 <i>Medidas de mitigación para la obra vial</i>	78
Figura 30 <i>Diagrama de la estructura desglosada de trabajo</i>	83
Figura 31 <i>Análisis de precio unitario Rubro 1.1</i>	84
Figura 32 <i>Análisis de precio unitario Rubro 1.2</i>	85
Figura 33 <i>Análisis de precio unitario Rubro 1.3</i>	86
Figura 34 <i>Análisis de precio unitario Rubro 2.1</i>	87
Figura 35 <i>Análisis de precio unitario Rubro 2.2</i>	88
Figura 36 <i>Análisis de precio unitario Rubro 2.3</i>	89
Figura 37 <i>Análisis de precio unitario Rubro 3.1</i>	90
Figura 38 <i>Análisis de precio unitario Rubro 3.2</i>	91
Figura 39 <i>Análisis de precio unitario Rubro 3.3</i>	92
Figura 40 <i>Análisis de precio unitario Rubro 3.4</i>	93
Figura 41 <i>Cuantificación de materiales en obra</i>	94
Figura 42 <i>Presupuesto total del proyecto: Pavimento rígido con hormigón 3% de NFU</i>	97
Figura 43 <i>Costo por metro cúbico de la dosificación 3% NFU</i>	98
Figura 44 <i>Costo por metro cúbico de la dosificación patrón</i>	98
Figura 45 <i>Diseño de la losa en el pavimento utilizando la AASHTO 93</i>	99
Figura 46 <i>Comparación entre el precio final de la dosificación patrón y 3% de NFU</i>	99
Figura 47 <i>Cronograma de actividades para la construcción del pavimento con 3% de NFU</i>	100
Figura 48 <i>Caucho de llanta reciclada: granulado TMN 1 mm</i>	117
Figura 49 <i>Mezcla de hormigón con 3% de NFU</i>	117
Figura 50 <i>Control de calidad del hormigón: Asentamiento</i>	118
Figura 51 <i>Control de calidad del hormigón: Densidad en estado fresco</i>	118
Figura 52 <i>Especímenes cilíndricos codificados, edad 1 día</i>	119
Figura 53 <i>Vigas, edad 1 día</i>	119
Figura 54 <i>Fundición en masa en concretera de 1m³</i>	120
Figura 55 <i>Fundición de cubos 15x15x15 cm. y vigas 15x15x50 cm.</i>	120
Figura 56 <i>Registro de resistencia de ensayos realizados</i>	121
Figura 57 <i>Ensayo de resistencia a la compresión</i>	121

Figura 58	<i>Ensayo de Ultrasonido</i>	122
Figura 59	<i>Preparación de cilindro para ensayo de ultrasonido</i>	122
Figura 60	<i>Aparato de medición de la permeabilidad al aire del hormigón TORRENT</i>	123
Figura 61	<i>Ensayo de la permeabilidad al aire del hormigón TORRENT</i>	123
Figura 62	<i>Ensayo de resistencia a la flexión</i>	124
Figura 63	<i>Ensayo de Tracción Indirecta</i>	124
Figura 64	<i>Ensayo de resistencia mediante esclerómetro dosificación patrón</i>	125
Figura 65	<i>Ensayo de resistencia mediante esclerómetro dosificación 3% de NFU</i>	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Tamaño de las partículas de caucho de llanta reciclada</i>	14
Tabla 2 <i>Dosificaciones utilizadas para los diseños a ensayar</i>	18
Tabla 3 <i>Resultados de ensayo a compresión axial del diseño patrón</i>	19
Tabla 4 <i>Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 2</i>	19
Tabla 5 <i>Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 3</i>	20
Tabla 6 <i>Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 4</i>	20
Tabla 7 <i>Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 5</i>	21
Tabla 8 <i>Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 6</i>	21
Tabla 9 <i>Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 7</i>	22
Tabla 10 <i>Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 8</i>	22
Tabla 11 <i>Diferencia de resistencias a la compresión a los 28 días de cada dosificación respecto al diseño patrón</i>	24
Tabla 12 <i>Resultados de resistencias a la compresión del hormigón dosificación patrón</i>	26
Tabla 13 <i>Resultados de resistencias a la compresión del hormigón para la dosificación 3% de NFU</i>	26
Tabla 14 <i>Resultado de resistencias a la flexión dosificaciones patrón y 3% de NFU</i>	28
Tabla 15 <i>Resultados del módulo de ruptura del hormigón a 28 días para la dosificación patrón y 3% de reemplazo</i>	28
Tabla 16 <i>Resultados de ensayo de esclerometría para la dosificación patrón</i>	29
Tabla 17 <i>Resultados de ensayo de esclerometría para la dosificación de 3% de NFU</i>	29
Tabla 18 <i>Clasificación del hormigón por permeabilidad al aire</i>	30
Tabla 19 <i>Resultados de ensayos de permeabilidad al aire del hormigón, dosificación patrón y 3% de NFU</i>	30
Tabla 20 <i>Clasificación del hormigón según el ensayo de ultrasonido</i>	31
Tabla 21 <i>Resultado del ensayo de ultrasonido para la dosificación patrón y 3% de NFU</i>	32
Tabla 22 <i>Periodos de diseño según la clasificación de la vía</i>	36
Tabla 23 <i>Coefficiente de drenaje del pavimento</i>	39
Tabla 24 <i>Coefficientes de drenaje según su calidad</i>	40
Tabla 25 <i>Valor K según el espesor de la subbase</i>	41

Tabla 26 Nivel de confiabilidad según funcionalidad de la vía	42
Tabla 27 Desviación Estándar según la condición de diseño	42
Tabla 28 Coeficiente de transferencia de carga recomendada para varios tipos de pavimentos y condiciones de diseño.....	43
Tabla 29 Parámetros para el espesor de la losa	43
Tabla 30 Características del pasador seleccionado	46
Tabla 31.....	64
Tabla 32 Tráfico de la “Ruta del Cacao”	67
Tabla 33 Actividades susceptibles a causar impactos ambientales	68
Tabla 34 Emisiones de CO ₂ caudas por la dosificación patrón de la losa del pavimento	79
Tabla 35 Emisiones de CO ₂ caudas por la dosificación 3% de NFU de la losa del pavimento	80

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El impacto ambiental producido por la descontrolada cantidad de residuos generados en el planeta impulsa la necesidad de promover prácticas sostenibles, fomentando la búsqueda por la innovación en la industria de la construcción vial. Por ello, la incorporación de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) en los pavimentos ha causado gran interés en los últimos años, según Vélez Moreira & Alonso Aenlle (2022) debido a sus características para reducir los costos económicos y modificar las propiedades del concreto con diversos beneficios, aportando a la eliminación de desechos, y buscando disminuir la contaminación ambiental.

La generación de residuos a partir de llantas viejas ha aumentado y provocado la degradación ambiental con el aumento del número de vehículos, particularmente en las ciudades (Mbereyaho et al., 2020).

Globalmente se estima que alrededor del 60% de los residuos de llantas son originados en áreas urbanas, generando gran preocupación tanto en el ámbito económico como ecológico (Tileuberdi et al., 2015), al ser incinerados como una manera de eliminación altamente contaminante. Esta situación es alarmante, debido a que contribuye al calentamiento global y a la escasez de recursos, comprometiendo a futuras generaciones.

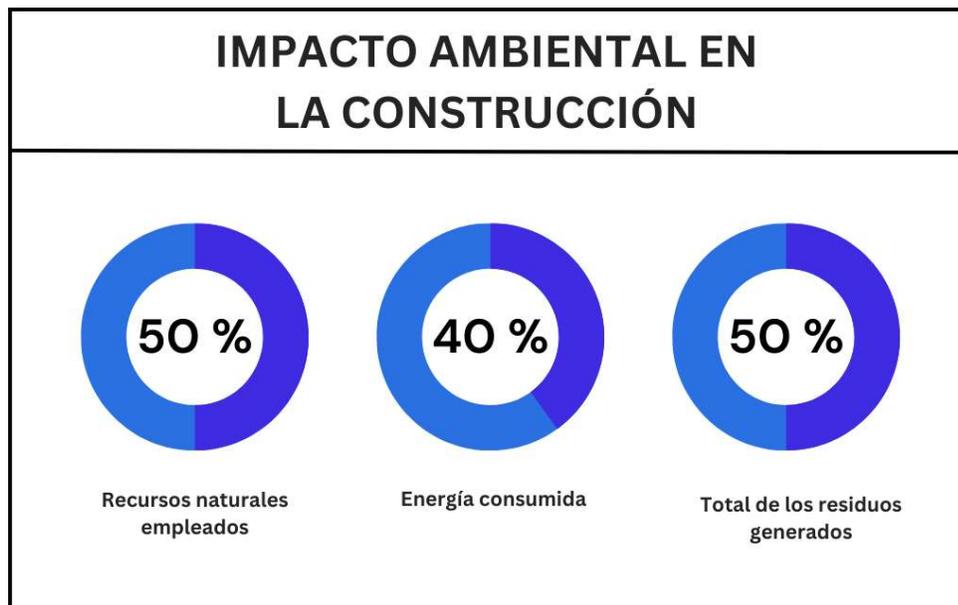
En el caso de Ecuador, según el Anuario publicado por la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, en el año 2018 se importaron cerca de 3.7 millones de llantas, estimando que solo el 30% (según lo requerido por la ley) recibió un procedimiento adecuado de reciclaje o reutilización (Peñaloza Lopez & Cisneros Razo, 2022).

Los neumáticos al final de su ciclo de vida son una valiosa fuente de materiales de construcción sostenibles, económicos y de fácil acceso, con propiedades que contribuyen a procesos de ingeniería (Tasalloti et al., 2021). Estas alternativas resaltan debido al impacto

ambiental significativo en el sector de la construcción. Según Annik et al. (1996), este sector gasta el 40% de la energía consumida (incluyendo la energía en uso) el 50% de los recursos naturales, y el 50% del total de los residuos generados, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Impacto ambiental en el sector de la construcción



En ese contexto, el área del diseño y construcción de pavimentos no es ajeno a este problema, ya que, produce costos ambientales importantes, tanto en construcciones nuevas como en controles rutinarios y mantenimientos periódicos que se realizan (Zapata Ferrero et al., 2021).

Entre la variedad de pavimentos existentes el hormigón hidráulico es preferido por su durabilidad. Por ende, se usa para diseñar alternativas innovadoras, evaluando la adición de nuevos materiales, optimizando sus propiedades físicas y mecánicas, a su vez, reduciendo el precio de producción y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

El diseño y construcción de pavimentos está completamente ligado con la combinación de materiales como cemento, agua y agregados, la explotación de este último genera altas emisiones

de gases de efecto invernadero, degradación de ecosistemas naturales, pérdida de biodiversidad y la alteración de hábitats locales, así mismo, una mala gestión representa un peligro considerable debido a la extracción excesiva de agregados en las canteras, conllevando al agotamiento de recursos naturales no renovables.

1.2 Descripción del Problema

La Ruta del Cacao, ubicada en la provincia del Guayas constituye ahor

El presente proyecto busca proporcionar una solución sostenible y un impacto ambiental positivo a la presente, por lo que, entre los problemas que se necesitan abordar y los identificados con la empresa en cuestión, se encuentra el desarrollo de un pavimento que incorpore llantas recicladas en el hormigón de la capa de rodadura, asegurando la resistencia del pavimento resultante. Además, para lograr un equilibrio entre la sostenibilidad y la resistencia del pavimento, es importante evaluar el contenido exacto de llanta reciclada a utilizar en la mezcla de hormigón. Para esto, se llevarán a cabo pruebas de laboratorio que incluirán diferentes proporciones de NFU para evaluar su resistencia y propiedades físicas. Estas pruebas son esenciales para comprender cómo la inclusión de llantas recicladas afecta las características del hormigón.

Otro desafío es la evaluación del impacto ambiental del uso de llantas recicladas en pavimentos de hormigón, considerando aspectos como la reducción de residuos de llantas, el ahorro de recursos naturales y la disminución de la huella de carbono. Por último, se realizará un análisis de la viabilidad económica de la implementación de pavimentos de hormigón con llantas recicladas, incluyendo los costos asociados al pavimento sostenible y comparándolo con un pavimento convencional para determinar su rentabilidad a largo plazo.

Entre los problemas que se deben abordar, se incluye el desarrollo de un diseño de pavimento que incorpore llantas recicladas de manera óptima en el hormigón, asegurando su resistencia. Además, se evaluará y determinará el contenido óptimo de llanta reciclada a utilizar

en la mezcla de hormigón para lograr un equilibrio adecuado entre sostenibilidad y resistencia del pavimento. Estas evaluaciones se comprobarán mediante pruebas de laboratorio que examinen sus propiedades mecánicas. Otro desafío es la evaluación del impacto ambiental del uso de llantas recicladas en pavimentos de hormigón, considerando aspectos como la reducción de residuos de llantas, el ahorro de recursos naturales y la disminución de la huella de carbono. Por último, se realizará un análisis de la viabilidad económica asociados a la sostenibilidad del pavimento.

1.3 Justificación del Problema

El pavimento rígido convencional está conformado por agua, agregados y cemento. Los materiales utilizados para dar con el resultado final generan un impacto ambiental considerable durante su fabricación o explotación. Por un lado, la industria cementera genera grandes cantidades de contaminación, según la Unión Europea (2023) anualmente se producen aproximadamente el 8% de las emisiones mundiales de CO₂, lo que equivale alrededor de 4,000 millones de toneladas de cemento; por otro lado, la extracción desmedida de recursos no renovables como la arena y la roca es alarmante debido a la posible escasez futura de recursos. Por ende, es necesario replantear el concepto de pavimentos tradicionales, adaptándolo a las necesidades globales.

Actualmente, se busca la sostenibilidad por medio de la reutilización de materiales de desecho lo cual se ha convertido en un reto común. A medida que aumentan las preocupaciones medioambientales relacionadas con la eliminación de residuos de neumáticos y se incrementa la demanda de prácticas de construcción sostenibles, la reutilización de neumáticos desechados en el hormigón emerge como una solución prometedora.

El pavimento con llantas recicladas busca ser más sostenible al utilizar materiales de residuo, extendiendo su vida útil y su ciclo de vida. Al incorporar llantas recicladas al pavimento rígido, se busca reducir las emisiones de CO₂, a su vez, dándole un nuevo uso y contribuyendo

con la reutilización de materiales. Adicionalmente, con la alta demanda de neumáticos en Ecuador y el poco tratamiento adecuado a los NFU, se evita que se depositen en vertederos evadiendo su proceso de lenta degradación y alta contaminación. Esto contribuye a una economía circular sostenible gracias al aprovechamiento de los residuos y a la disminución del uso de recursos naturales.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de llantas recicladas en pavimentos de hormigón, mediante el desarrollo de un diseño de pavimento que incorpore llantas recicladas de manera óptima.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el comportamiento mecánico del hormigón de muestras con diferentes porcentajes de llanta reciclada a través de ensayos destructivos y no destructivos.
2. Determinar el porcentaje óptimo de llanta reciclada incorporado en el hormigón, mediante comparaciones de propiedades mecánicas, cumpliendo así el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.
3. Analizar el impacto ambiental del pavimento diseñado para la Ruta del Cacao con llantas recicladas mediante el cálculo de la huella de carbono, para cumplir el ODS 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles; y el ODS 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.
4. Analizar la viabilidad económica respecto a un pavimento convencional, por metro cúbico de construcción.

Capítulo 2

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Revisión de literatura

2.1.1 Vías

Las vías constituyen la fuente principal de comunicación entre ciudades, estados, países, a su vez, impulsan el desarrollo económico de los lugares por donde esta se desarrollan. De acuerdo con el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2018) en su Reglamento Ley Sistema Infraestructura Vial del Transporte Terrestre, define a las vías como estructuras construidas para el tránsito y movilidad de peatones, automóviles, motocicletas, ciclistas. Adicionalmente, estas se dividen según su funcionalidad, uso, jurisdicción y competencia, TPDA, y su diseño. Esta última se subdivide en autopistas, autovías, vías rápidas, carreteras, caminos vecinales y urbanas. Según Setyawan et al. (2015) las vías son muy importantes para conectar a las comunidades y permitir un movimiento eficiente de servicio y bienes, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos.

2.1.2 Pavimentos

Pavimento es la composición de varias capas de materiales, entre el suelo natural, también llamado subrasante, hasta la superficie de rodamiento. La función principal es soportar los esfuerzos dados a partir del tránsito de vehículos, distribuyendo de manera uniforme su peso, realizando transferencias de cargas a la sub-base y al suelo subyacente (Papagiannakis & Masad, 2012).

De acuerdo con Flores Tandaypán & Valverde Rodríguez (2019) la base granular puede conformarse mínimo por una capa de suelo y sus espesores dependen del diseño de la carretera. La capa de rodadura puede ser de asfalto, cemento o ambos materiales combinados, la elección de esta depende de las especificaciones técnicas para la que será diseñada la vía, tomando el nombre de pavimento flexible o rígido.

El pavimento flexible convencional generalmente está conformado por cuatro capas: capa de subrasante, sub-base, base y carpeta asfáltica, esta última ubicada en la parte superior del pavimento, puede calcularse para espesores entre dos y cuatro pulgadas, y está diseñada para soportar diferentes condiciones climáticas gracias a su composición bituminosa. Adicionalmente, su vida útil oscila entre 10 y 15 años; aunque es económico en comparación a un pavimento rígido, su mantenimiento es costoso debido a las constantes intervenciones que necesita a lo largo de su vida útil. (Flores Tandaypán & Valverde Rodríguez, 2019)

Por otra parte, el pavimento rígido está compuesto por una capa de concreto hidráulico, simple o armado en la parte superior del pavimento, seguido de una capa de base y subrasante. En la investigación de Flores Tandaypán & Valverde Rodríguez (2019) se menciona que, este tipo de pavimento es más costoso y que su tiempo de vida útil es de 20 a 40 años, requiriendo mantenimientos mínimos en las juntas y en la totalidad de la vía.

2.1.3 Tránsito

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2013) establece que para dar inicio con el diseño de una vía o de alguna parte que la conforme, es necesario contar con fundamentos y bases de los datos reales de la zona donde se llevará a cabo la misma, es decir, de los vehículos y usuarios que harán uso de esta. El tránsito delimita el tipo de servicio para el que será construida la vía, a su vez, una errónea estimación o cálculo está directamente relacionada con la geometría del diseño, por lo que, es ilógico realizar un diseño vial sin información verificada y exacta sobre el tráfico.

2.1.4 Tráfico promedio diario anual (TPDA)

Los estudios sobre volúmenes de tránsito son realizados con el propósito de obtener información relacionada con el movimiento de automóviles y/o personas sobre puntos o secciones específicas dentro de un sistema vial (Chiquito Ortega, 2019). La información de un

estudio de tráfico se mide mediante el conteo de vehículos, comúnmente llamado aforo vehicular. El Tráfico promedio diario anual (TPDA), es la unidad de medida del tráfico de una vía proyectado a varios años. Según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2018) se subdividen en:

- Carretera RI, RII: TPDA desde 8.000 Vehículos.
- Carretera Clase I: TPDA de 3.000-8.000 Vehículos.
- Carretera Clase II: TPDA de 1.000-3.000 Vehículos.
- Carretera Clase III: TPDA de 300-1.000 Vehículos.
- Carretera Clase IV: TPDA de 100-300 Vehículos.
- Carretera Clase V: este tipo tiene un TPDA menor a 100 vehículos.

2.1.5 Hormigón con caucho de llantas recicladas

El hormigón es una mezcla de materiales que incorpora cemento, agua, agregados finos y gruesos; al fraguar, la unión de estos genera una masa altamente resistente, y durable capaz de resistir grandes cargas. Sin embargo, su uso convencional actualmente genera consecuencias sobre el planeta por su alta emisión de CO₂. A causa de esto, se buscan soluciones sostenibles e innovadoras capaces de mitigar o reducir la contaminación que este genera. Por lo que, la incorporación de caucho de llantas recicladas en sustitución parcial del agregado fino surge como una idea de fácil acceso e innovación. Como establece Garcia-Troncoso et al., (2023) el agregado fino puede ser reemplazado parcialmente por caucho, conservando un rendimiento considerablemente, similar en comparación con sus homólogos que solo contienen arena, ubicándolo como una posible solución para reducir la contaminación plástica, abordando dos problemáticas presentes en la actualidad.

Según Vélez Moreira & Alonso Aenlle (2022), al agregar NUF existe una reducción de resistencia, pero se puede diseñar una mezcla de hormigón para pavimentos de hasta un máximo

de 10% de reemplazo del agregado fino, obteniendo buenos resultados de resistencia y cumpliendo con las normativas técnicas vigentes del país. Adicionalmente, múltiples artículos mencionan que el contenido óptimo de caucho reciclado es 5%, alcanzando mejor desempeño comparando con los otros porcentajes estudiados de 10% y 15% (Monsalve, 2020) (Zuraida et al., 2023).

Finalmente, una investigación en Brasil sobre pavimentos con NFU declaró que el hormigón con caucho de llantas presentó múltiples ventajas, entre esas, la reducción de 4% de los costos de producción y disminución de masa específica (Silva et al., 2019).

2.1.6 Ensayos de pavimentos

Los ensayos de laboratorio realizados a los pavimentos son fundamentales para garantizar la resistencia, durabilidad y vida útil del mismo, logrando un control de calidad general, a su vez, cumpliendo con los estándares, normas y especificaciones técnicas requeridas. A continuación, se enlistan los ensayos más relevantes en la industria.

2.1.6.1 Resistencia a la flexión del hormigón

El Instituto Ecuatoriano de Normalización (2011), declara que este tipo de ensayos se emplea en pruebas de hormigón para la construcción de losas y pavimentos, evaluando la resistencia a la flexión a través de vigas, simulando la carga a soportar por el pavimento una vez se encuentre en servicio, además, en su apartado INEN NTE 2554:2011 dispone la metodología de ensayo para llevar a cabo el ensayo resistencia a la flexión de los especímenes de hormigón preparados y curados de acuerdo con las normas ASTM C 42, ASTM C 31 o ASTM C 192. Los resultados obtenidos se reportan como módulo de ruptura.

2.1.6.2 Resistencia a la compresión del hormigón

Mide la capacidad de Resistencia que tiene el hormigón ante cargas verticales externas, prediciendo la carga real a soportar por el pavimento en servicio. Por otro lado, según lo establecido en la ASTM C39, el ensayo es realizado mediante cilindros de hormigón sometidos a cargas verticales administradas por una prensa hidráulica (American Society for Testing and Materials, 2024).

2.1.6.3 Permeabilidad

La American Society for Testing and Materials (2022), en su apartado ASTM C1202 indica que su metodología tiene como objetivo principal determinar la capacidad de resistencia a la penetración del agua en el hormigón. Este ensayo es esencial para preservar la vida útil y durabilidad de los pavimentos, un correcto manejo de este parámetro evitará posibles corrosiones de los aceros, así mismo, la pérdida del material fino en la capa inferior de la losa de hormigón.

2.2 Área de estudio

El presente proyecto consiste en diseñar un pavimento rígido con losa de hormigón hidráulico utilizando llantas recicladas para una carretera de IV orden en la “Ruta del Cacao”, localizada en la provincia del Guayas, Ecuador. La carretera tiene una longitud de 3.48 Km y se encuentra situada en el km. 46.5 de la Vía a la Costa. La Figura 2 identifica la vía de interés del proyecto.

Figura 2

Vía de estudio: Ruta del Cacao, Km. 46.5 de la Vía a la Costa (3.48 Km.)



Nota: Imagen extraída de Google Earth.

La vía de estudio se encuentra clasificada dentro de las carreteras de IV Orden, por lo que, según el Ministerio de Transportes y Obras Públicas del Ecuador (2018) su Tráfico Promedio Diario Anual se encuentra entre los 100-300 vehículos. A su vez, cada uno de sus parámetros de diseño se encuentran estrechamente relacionados con el tipo de terreno en el que se desarrolla.

Por otro lado, las condiciones actuales de la carretera no son las mejores, esto debido a su ubicación climática y las precipitaciones que experimenta, por lo que, buscar ideas innovadoras y sostenibles surge como un reto en la presente investigación.

La implementación del pavimento con llantas recicladas busca satisfacer las necesidades de movilidad de los habitantes y transeúntes que diariamente transitan por la Ruta del Cacao, en la actualidad, debido a las condiciones de la vía no existe un flujo continuo de vehículos. Según Yanqui Miranda (2021) el flujo incontinuo hace que los vehículos se trasladen a velocidades bajas, produciendo mayores emisiones de NO₂, siendo los más dañinos aquellos que utilizan diésel, como los camiones.

Por otra parte, la Rubber Pavements Association (RPA) descubrió mediante una investigación que el pavimento con llantas recicladas disminuye un 50% el sonido de los neumáticos de los vehículos y añadió que, si el 5% de carreteras del país estuvieran pavimentadas con este tipo de mezcla, se eliminarían casi todos los neumáticos sin uso del flujo de residuos.

2.3 Trabajo de campo y laboratorio

En la primera etapa del proyecto, se obtuvo el caucho de llantas recicladas a través de la empresa [ECSADE S.A.](#), misma que brinda servicios de gestión y disposición final responsable de los NFU. La empresa puso a disposición partículas de caucho de diferentes granulometrías, a continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los diferentes intervalos propuestos.

Tabla 1

Tamaño de las partículas de caucho de llanta reciclada

Tamaño	Unidades
0 - 1	mm
0 - 2	mm
0.5 - 3	mm
2 - 4	mm
2 - 7	mm

Para el presente estudio, se eligió el caucho granulado con partículas de tamaño entre 0 – 1 mm, esto debido a que servirá como reemplazo parcial del agregado fino, a su vez, su pequeño tamaño de partícula logrará una buena adherencia con el resto de la mezcla de hormigón.

Por otro lado, el cemento y los agregados utilizados fueron propinados por el Centro de Innovación de Holcim (CIH), logrando adquirir materiales de calidad y cumpliendo los parámetros establecidos en las normativas vigentes:

- ASTM-C 136: Método de ensayo estándar para el análisis granulométrico de áridos finos y gruesos.
- NTE INEN 2380: Cementos hidráulicos. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos.

En la segunda etapa del proyecto, se determinó la dosificación preliminar patrón del hormigón hidráulico para el pavimento, misma que sigue los parámetros de diseño de mezclas ACI 211.

La dosificación definitiva se obtuvo mediante revisión bibliográfica y pruebas de laboratorio, de la siguiente manera:

1. Se determinó si el reemplazo de agregado fino de la dosificación debe ser de manera directa o considerando las densidades de los materiales. Según (Zuraida et al., 2023), al reemplazar o sustituir materiales compuestos en un componente de hormigón, se debe tomar en cuenta la diferencia de densidades de los materiales. Es necesario convertir el peso de los materiales utilizando sus densidades para equilibrar la capacidad. A continuación, se utiliza la Ecuación 2.1 $m_w = \frac{\rho_w}{\rho_{fa}} * m_{fa}$

(2.1 para obtener la capacidad máxima de reposición:

$$m_w = \frac{\rho_w}{\rho_{fa}} * m_{fa} \quad (2.1)$$

Donde:

m_w = capacidad de la masa de los materiales de desecho (g).

ρ_w = densidad de los materiales de desecho (g/cm^3).

ρ_{fa} =densidad del árido fino (g/cm^3).

m_{fa} =masa del árido fino (g).

2. En base a la Ecuación 2.1, se realizaron reemplazos a la dosificación patrón del 3 y 5% de caucho de llantas recicladas por árido fino. Posteriormente, se elaboraron 4 cilindros de hormigón por porcentaje de reemplazo para rupturas a edades de 1 y 3 días. La comparación se dio por los resultados de resistencia obtenidos mediante la dosificación que considera las densidades de los materiales (usando Ecuación 2.1), respecto a la dosificación reemplazando las masas directamente.
3. Finalmente, las resistencias de los cilindros ensayados utilizando la dosificación y expresión que considera las densidades de los materiales dieron mejores resultados, logrando establecer la dosificación definitiva.

Esta fase tuvo como objetivo principal determinar la eficiencia de las resistencias del hormigón, evaluando el reemplazo de los materiales, ya sea considerando sus densidades o sustituyéndolos directamente.

La tercera etapa del proyecto tuvo como objetivo la elaboración y fundición de especímenes cilíndricos de 100 x 200 mm. siguiendo la ASTM C 31, estos se elaboraron bajo 8 diferentes dosificaciones, partiendo de la dosificación patrón, y con porcentajes de reemplazo de NFU del 3, 5, 7, 10, 20, 50 y 100%. La evaluación de resistencia de los especímenes se dio a edades de tres, siete, catorce y veintiocho días, a su vez, se realizaron ensayos de calidad del hormigón, garantizando y cumpliendo con las especificaciones técnicas establecidas en la normativa vigente:

- Preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en obra. INEN NTE 1576 – ASTM C 31.
- Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto. INEN NTE 1573 – ASTM C 39.

- Método de Ensayo Estándar para Resistencia a la Flexión del Concreto (Usando Viga Simple con Carga a los Tercios del Claro). INEN NTE 2554 – ASTM C 78.
- Práctica estándar para la toma de muestras de hormigón recién. ASTM C 172.
- Método de ensayo para asentamiento del hormigón. INEN NTE1578 – ASTM C143.
- Método de ensayo para determinar la temperatura del hormigón fresco. ASTM 1064.
- Método de ensayo normalizado de densidad, rendimiento, y contenido de aire del hormigón. ASTM C 138.

Adicionalmente, la experimentación se desarrolló en el Laboratorio del Centro de Innovación de Holcim, lugar que brinda condiciones ideales de humedad y temperatura de curado en la preparación de especímenes, con un valor de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ basado en la ASTM C 192, salvaguardando las propiedades del hormigón desde el inicio hasta el final de las muestras.

Esta etapa tuvo el propósito de evaluar el comportamiento mecánico, especificaciones técnicas y los estándares de calidad de la mezcla de los diferentes porcentajes de reemplazo de caucho de llanta de los especímenes. A su vez, permitió conocer el porcentaje óptimo de reemplazo, asegurando el desempeño y calidad del hormigón.

La cuarta etapa del estudio comprendió la última fundición en masa, esta vez, únicamente considerando la dosificación óptima y patrón, elaborando de especímenes cilíndricos de 100x200 mm., vigas de 150x150x500 mm. y cubos de 150x150x150 mm. para luego evaluarlos mediante ensayos destructivos y no destructivos, a edades de 3, 7, 14 y 21 días. Esta fase tuvo como objetivo la realización en masa de especímenes para obtener resultados con menor un margen de error y cercanas a la realidad, bajo las mismas condiciones de tiempo, temperatura y estado de los materiales involucrados.

Finalmente, con los parámetros y datos obtenidos durante las diferentes etapas del proyecto, haciendo uso de la dosificación óptima de concreto y siguiendo lo establecido por la normativa vigente de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO

93), se procedió a diseñar el pavimento de hormigón hidráulico para una carretera de IV orden en la Ruta del Cacao, localizada en la Provincia del Guayas, Ecuador.

2.4 Análisis de datos

Para esta sección se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos destructivos y no destructivos realizados en el laboratorio del Centro de Innovación de Holcim. Cada diseño por ensayar tuvo como mínimo dos especímenes de hormigón por edad, cumpliendo con lo establecido en la normativa vigente ASTM C 31: Probetas cilíndricas. Es importante mencionar, que cada diseño cuenta con su respectiva dosificación, variando el porcentaje de caucho de llantas en reemplazo del agregado fino.

En la Tabla 2 se presentan las dosificaciones utilizadas a lo largo del proyecto. En la cual, la Dosificación 1 corresponde al diseño con reemplazo del 0% de llantas (Patrón), la Dosificación 2 hace referencia al diseño con 3% de reemplazo de NFU y así sucesivamente hasta completar la Dosificación 8 con el 100% de sustitución. Cabe resaltar que los ensayos fueron realizados bajo las condiciones ideales que ofrece el laboratorio, mencionadas previamente.

Tabla 2

Dosificaciones utilizadas para los diseños a ensayar

DOSIFICACIONES [1 m ³]								
Materiales [kg/m ³]	1 [0%]	2 [3%]	3 [5%]	4 [7%]	5 [10%]	6 [20%]	7 [50%]	8 [100%]
Cemento HE	408	408	408	408	408	408	408	408
Piedra #67	700	700	700	700	700	700	700	700
Piedra #78	311	311	311	311	311	311	311	311
Caucho	0.00	8.72	14.53	20.34	29.05	58.11	145.26	290.53
Arena de Rio	854.31	845.59	839.78	833.97	825.26	796.20	709.05	563.78
Agua	175	175	175	175	175	175	175	175
Sikaplast® 2001-R	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
Sikaplast® 5012	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67

2.4.1 Dosificación 1: Diseño patrón (0% de reemplazo de caucho de llanta) del hormigón

Para el diseño patrón, se utiliza una dosificación sin la utilización de NFU. En la Tabla 3 se presentan los resultados de los ensayos a compresión axial simple de los especímenes cilíndricos. Esta tabla incluye las edades correspondientes a la ruptura de 3, 7, 14 y 28 días.

Tabla 3

Resultados de ensayo a compresión axial del diseño patrón

Resultado de Resistencias: Dosificación 1			
Edad [días]	Peso [Kg]	Carga de Ruptura [kN]	Resistencia [MPa]
3	4.09	274.35	34.24
7	4.01	358.70	44.77
14	4.13	437.97	54.67
28	4.15	442.84	55.27

2.4.2 Dosificación 2: Diseño con 3% de reemplazo de NUF en el hormigón

Para la dosificación 2, se reemplazó el 3% del agregado fino por NUF. Los resultados de los ensayos a compresión axial simple a las probetas de hormigón se presentan en la Tabla 4. Al igual que la Dosificación 1, la tabla incluye las edades de ruptura de 3, 7, 14 y 28 días.

Tabla 4

Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 2

Resultado de Resistencias: Dosificación 2			
Edad [días]	Peso [Kg]	Carga de Ruptura [kN]	Resistencia [MPa]
3	4.07	270.70	33.79
7	4.05	360.72	45.02
14	4.07	419.10	52.31
28	4.07	439.95	54.91

2.4.3 Dosificación 3: Diseño con 5% de reemplazo de NUF en el hormigón

Para la dosificación 3, se realizó un reemplazo del 5% del agregado fino por NFU. Los resultados de los ensayos a compresión axial simple a las probetas de hormigón se presentan en la Tabla 5. Los datos obtenidos vienen dados de acuerdo con sus edades de ruptura de 3, 7, 14, 28 días.

Tabla 5

Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 3

Resultado de Resistencias: Dosificación 3			
Edad [días]	Peso [Kg]	Carga de Ruptura [kN]	Resistencia [MPa]
3	4.07	256.68	32.04
7	4.03	335.09	41.82
14	4.06	397.83	49.66
28	4.05	425.04	53.05

2.4.4 Dosificación 4: Diseño con 7% de reemplazo de NUF en el hormigón

Para la dosificación 4, se sustituyó el 7% del agregado fino por NFU. Se presentan los resultados de los ensayos a compresión axial simple a las probetas de hormigón en la Tabla 6. Los datos obtenidos vienen dados de acuerdo con sus edades de ruptura de 3, 7, 14, 28 días.

Tabla 6

Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 4

Resultado de Resistencias: Dosificación 4			
Edad [días]	Peso [Kg]	Carga de Ruptura [kN]	Resistencia [MPa]
3	3.97	148.62	18.55
7	3.84	201.23	25.12
14	3.91	232.58	29.03
28	3.83	253.05	31.58

2.4.5 Dosificación 5: Diseño con 10% de reemplazo de NUF en el hormigón

Para la dosificación 5, se reemplazó el 10% del agregado fino por NFU. Los resultados de los ensayos a compresión axial simple a las probetas de hormigón se presentan en la Tabla 7. Los datos obtenidos vienen dados de acuerdo con sus edades de ruptura de 3, 7, 14, 28 días.

Tabla 7

Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 5

Resultado de Resistencias: Dosificación 5			
Edad [días]	Peso [Kg]	Carga de Ruptura [kN]	Resistencia [MPa]
3	3.98	140.47	17.53
7	3.90	186.38	23.26
14	3.97	223.65	27.92
28	3.90	245.80	30.68

2.4.6 Dosificación 6: Diseño con 20% de reemplazo de NUF en el hormigón

Para la dosificación 6, se utiliza un 20% del agregado fino para reemplazarlo por NFU. Los resultados de los ensayos a compresión axial simple a las probetas de hormigón se presentan en la Tabla 8. Los datos obtenidos vienen dados de acuerdo con sus edades de ruptura de 3, 7, 14, 28 días.

Tabla 8

Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 6

Resultado de Resistencias: Dosificación 6			
Edad [días]	Peso [Kg]	Carga de Ruptura [kN]	Resistencia [MPa]
3	3.75	125.76	15.70
7	3.75	156.56	19.54
14	3.77	184.35	23.01
28	3.71	204.15	25.48

2.4.7 Dosificación 7: Diseño con 50% de reemplazo de NUF en el hormigón

Para la dosificación 7, se reemplaza 50% del agregado fino por NFU. Se presentan los resultados de los ensayos a compresión axial simple a las probetas de hormigón en la Tabla 9. Los datos obtenidos vienen dados de acuerdo con sus edades de ruptura 3, 7, 14, 28 días.

Tabla 9

Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 7

Resultado de Resistencias: Dosificación 7			
Edad [días]	Peso [Kg]	Carga de Ruptura [kN]	Resistencia [MPa]
3	3.59	54.52	6.81
7	3.48	65.00	8.11
14	3.62	68.46	8.55
28	3.61	70.10	8.75

2.4.8 Dosificación 8: Diseño con 100% de reemplazo de NUF en el hormigón

Para la dosificación 8, se sustituye el 100% del agregado fino por NFU. Los resultados de los ensayos a compresión axial simple a las probetas de hormigón se presentan en la Tabla 10. Los datos obtenidos vienen dados de acuerdo con sus edades de ruptura de 3, 7, 14, 28 días.

Tabla 10

Resultados de ensayo a compresión axial de la dosificación 8

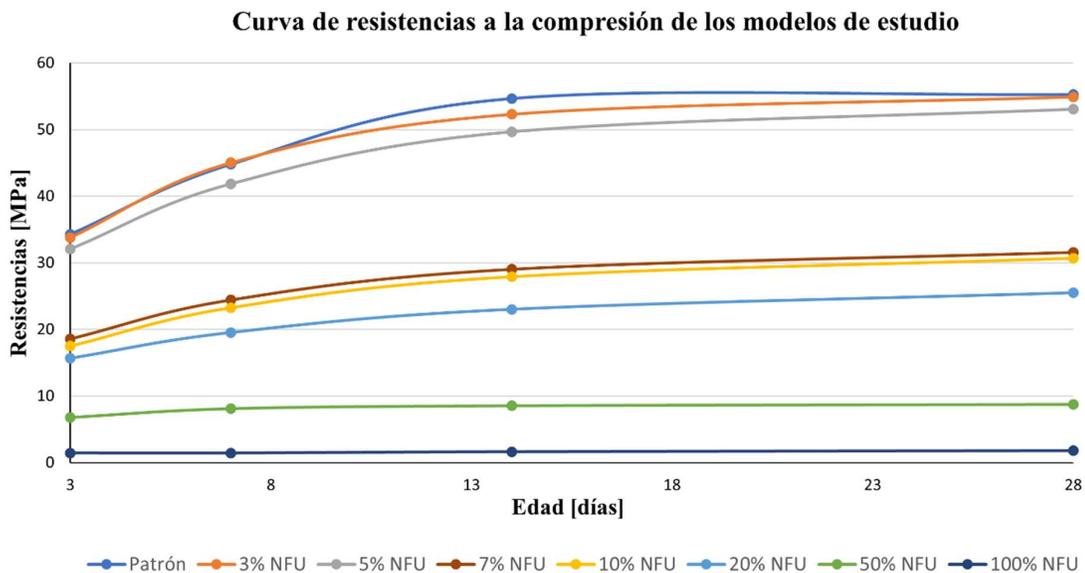
Resultado de Resistencias: Dosificación 8			
Edad [días]	Peso [Kg]	Carga de Ruptura [kN]	Resistencia [MPa]
3	3.05	11.67	1.46
7	2.93	11.61	1.45
14	3.00	13.08	1.63
28	3.10	14.31	1.79

2.4.9 Análisis preliminar de resistencias a la compresión de las dosificaciones ensayadas.

El objetivo principal de este apartado es analizar y discutir las resistencias a la compresión axial simple obtenidas en los ensayos de laboratorio de la tercera fase del proyecto de las diferentes dosificaciones de reemplazo de caucho de llantas recicladas.

Figura 3

Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión



La Figura 3, representa las curvas de las resistencias a la compresión de los diferentes especímenes cilíndricos de hormigón, donde las abscisas representan las edades de ruptura a 3, 7, 14 y 28 días. Por otro lado, el eje de las ordenadas contiene los valores de resistencia dependiendo del porcentaje de reemplazo de llantas trituradas por el agregado fino.

Adicionalmente, las curvas presentadas poseen pendientes crecientes, lo que indica que las resistencias se incrementan con el pasar del tiempo y no sufren alteraciones por la presencia del NFU, también, se puede evidenciar que a medida que el porcentaje de reemplazo de caucho de llanta reciclada aumenta en el hormigón, las resistencias a la compresión decrecen, lo que quiere decir, a mayor reemplazo de caucho de llantas, menor resistencia a la compresión del hormigón.

A continuación, la Tabla 11 muestra la diferencia de resistencias a la compresión de cada uno de los Dosificación ensayados a la edad de 28 días, respecto al diseño patrón.

Tabla 11

Diferencia de resistencias a la compresión a los 28 días de cada dosificación respecto al diseño patrón

Dosificación	Resistencia a la compresión [MPa]	Diferencia de resistencias [MPa]
Patrón	55.27	-
2	54.91	0.36
3	53.05	2.22
4	31.58	23.69
5	30.68	24.59
6	25.48	29.79
7	8.75	46.52
8	1.79	53.49

Analizando la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y los resultados de resistencia previamente mostrados, se puede decir que entre el Dosificación patrón y el Dosificación 3% existe la mínima diferencia de 0.36 MPa a la edad de 28 días, demostrando que es una opción altamente viable para considerar al momento de diseñar un pavimento. De la misma manera, la dosificación 5% presenta una disminución de 2.22 MPa respecto al dosificación patrón, sin embargo, aunque su decrecimiento de resistencia es mayor, no deja de ser una opción factible en comparación con los beneficios ambientales que ofrece.

Finalmente, a través de la Tabla 11 se puede concluir que a partir de la dosificación 4, mismo que representa el 7% de reemplazo de NFU por agregado fino, las resistencias decrecen en un 42.86%, incrementando este porcentaje a medida que la sustitución de NFU aumenta.

2.4.10 Análisis definitivo mediante ensayos destructivos y no destructivos.

Los ensayos destructivos y no destructivos son utilizados para incrementar la fiabilidad de los resultados (European Standard, 2001). Tradicionalmente para determinar la resistencia se

realizan ensayos destructivos con especímenes cilíndricos según la normativa, en las edades preestablecidas a partir del día en el que se realiza la mezcla del hormigón, este tipo de ensayos nos provee una información certera, pero involucra mayores costos y trabajo (Ivanchev, 2022). Actualmente, los ensayos no destructivos están siendo implementados con mayor frecuencia, debido a que son más económicos, de fácil-rápida aplicación, y pueden ser utilizados en estructuras existentes sin causar daño alguno, sin embargo, al ser métodos indirectos representan una desventaja, ya que, son calculados mediante estimaciones de parámetros del concreto (Ivanchev, 2022).

Para el presente proyecto, mediante el análisis preliminar presentado y la evaluación de resistencias a la compresión conseguidas, se determinó la mejor opción de dosificación para diseñar el pavimento, por lo que, se realizó y ensayó nuevamente los especímenes cilíndricos de hormigón, pero esta vez, únicamente para la dosificación patrón y 3% de reemplazo de NFU (cuarta fase del proyecto). Esto para obtener resultados con menor margen de error, bajo las mismas condiciones de tiempo, temperatura y estado de los materiales.

Adicionalmente, es importante aclarar que los resultados que se presentarán pueden diferir de los obtenidos en el análisis preliminar, debido a que estos fueron ensayados en los exteriores del laboratorio, simulando condiciones de campo.

2.4.10.1 Ensayo destructivo: Resistencia a la compresión del hormigón

A continuación, se exhibe la Tabla 12, la cual contiene los resultados de resistencias a la compresión de los ensayos correspondientes a la dosificación patrón, datos obtenidos a edades de 3, 7, 14 y 28 días. De la misma manera, se muestra la Tabla 13 haciendo referencia a lo ensayado en la dosificación con 3% de reemplazo de NFU.

Tabla 12*Resultados de resistencias a la compresión del hormigón dosificación patrón*

Resultado de resistencias a la compresión: Dosificación Patrón					
Edad [días]	Cilindro	Peso [Kg]	Carga de Ruptura [kN]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
3	1	3.96	199.89	24.95	25.27
	2	3.95	205.10	25.59	
7	1	4.01	292.75	36.54	34.46
	2	4.02	259.35	32.37	
14	1	3.94	287.31	35.86	36.09
	2	3.96	290.91	36.31	
28	1	3.98	320.46	39.99	39.40
	2	3.98	310.86	38.80	

Tabla 13*Resultados de resistencias a la compresión del hormigón para la dosificación 3% de NFU*

Resultado de resistencias a la compresión: Dosificación 3%					
Edad [días]	Cilindro	Peso [Kg]	Carga de Ruptura [kN]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
3	1	3.88	166.13	20.74	21.14
	2	3.87	172.59	21.54	
7	1	3.86	22.58	27.78	27.14
	2	3.87	212.27	26.50	
14	1	3.88	223.52	27.90	28.80
	2	3.91	237.87	29.69	
28	1	3.92	258.02	32.20	32.73
	2	3.85	266.44	33.26	

Bajo el análisis de las tablas presentadas, se puede decir que la diferencia de resistencia a los 28 días es de 6.67 MPa, representando una disminución del 16.93% de la dosificación 3% de NFU respecto al diseño patrón. Adicionalmente, en base a resultados obtenidos durante la experimentación, se puede argumentar que uno de los factores que influyen en la disminución de la resistencia a la compresión mencionada anteriormente es la reducción de la densidad entre las mezclas. En este caso, la dosificación patrón obtuvo una densidad de 2539 kg/m³ con un

asentamiento de 20 cm, mientras que, la dosificación con un 3% de NFU tuvo una densidad de 2489 kg/m³ con un asentamiento de 18 cm. A su vez, considerando lo investigado por Othman et al. en 2021, un hormigón más denso proporciona una mayor resistencia a la compresión y menos huecos dentro del volumen,

2.4.10.2 Ensayo destructivo: Resistencia a la flexión

El módulo de ruptura proviene del ensayo a flexión, mismo que se rige bajo la normativa ASTM C 78: “Método de Ensayo Estándar para Resistencia a la Flexión del Concreto”, para el ensayo se utilizó una viga simple con carga en los tercios del claro, la cual posee dimensiones normadas de 15 cm. de base, 15cm. de altura y 50cm. de largo. Para las pruebas, se utilizaron especímenes a 28 días de curado de la dosificación patrón y 3% de reemplazo de NFU.

Antes de presentar los resultados, es importante aclarar que la fractura en ambos ensayos se dio dentro del tercio medio del largo de la luz, por lo que, el cálculo del módulo de ruptura se determina de la siguiente manera:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.2)$$

Donde:

R = módulo de ruptura, psi, ó MPa.

P = carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayos, lbf ó N.

L = largo de la luz, pulg o mm.

b = ancho promedio de la probeta, pulg o mm, en la fractura.

d = altura promedio de la probeta, pulg o mm, en la fractura.

Con lo ya mencionado, en la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a flexión obtenidos.

Tabla 14*Resultado de resistencias a la flexión dosificaciones patrón y 3% de NFU*

Resultado de resistencias a la flexión						
Dosificación	Luz [mm]	b [mm]	d [mm]	Carga máxima [kN]	Resistencia máxima [MPa]	Módulo de ruptura [MPa]
Patrón	450	167	158	39.83	5.31	4.30
3%		153	154	35.97	4.79	4.46

Con los resultados presentados, se puede inferir que la implementación de NFU como reemplazo del 3% de árido fino, incrementa la capacidad del hormigón para resistir esfuerzo de flexión.

2.4.10.3 Ensayo destructivo: Resistencia a la tracción por compresión diametral (TCD)

Según lo establecido en la ASTM C496: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2006) “Es un método de ensayo consiste en la aplicación de una fuerza de compresión diametral en el sentido longitudinal de una probeta cilíndrica de hormigón a una velocidad dentro de un rango establecido hasta que se produzca la falla.” (p.1)

En la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos durante el ensayo TCD.

Tabla 15

Resultados del módulo de ruptura del hormigón a 28 días para la dosificación patrón y 3% de reemplazo

Resultado de TCD a 28 días		
Dosificación	Carga máxima [kN]	Resistencia máxima [MPa]
Patrón	137.63	4.316
Dosificación 3%	121.77	3.819

2.4.10.4 Ensayo no destructivo: Rebote esclerómetro

Método de ensayo normado por la ASTM C 805, se encarga de medir el número de rebotes en el hormigón endurecido, estableciendo que cuanto mayor es la cantidad de rebotes, mayor es la resistencia del hormigón. El presente ensayo se lo realizó a especímenes cúbicos normados de 15 cm. de ancho, 15 cm. de alto y 15 cm. de largo.

Como lo establece la normativa vigente, la Tabla 16 presenta los resultados del ensayo de rebote esclerómetro de la dosificación patrón, dando un total de 31.3 rebotes en promedio.

Tabla 16

Resultados de ensayo de esclerometría para la dosificación patrón

Ensayo de Esclerometría Dosificación 1: Diseño Patrón										
Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rebotes	30	31	30	30	35	32	31	32	30	32

De la misma manera, la Tabla 17 presenta los resultados del ensayo de rebote esclerómetro de la dosificación 3% de reemplazo de NFU, dando 26.4 rebotes en promedio.

Tabla 17

Resultados de ensayo de esclerometría para la dosificación de 3% de NFU

Ensayo de Esclerometría Dosificación 2: Reemplazo 3% NFU										
Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rebotes	27	25	27	26	29	26	26	27	25	26

2.4.10.5 Ensayo no destructivo: Permeabilidad

Método no destructivo de ensayo diseñado para la medición “in situ” de la permeabilidad al aire del recubrimiento de hormigón. Se basa en crear vacío dentro de una celda colocada sobre la superficie de este y en medir la velocidad con la que la presión retorna al valor atmosférico (TORRENT R.J., 1998, p.1). Por otro lado, en el mismo estudio realizado por el autor, establece la clasificación de la calidad del hormigón y su recubrimiento de acuerdo con la permeabilidad

del aire ensayada a edades de 30 a 90 días. Como se observa en la Tabla 18, se denomina Clase 1 a hormigones de alta resistencia (> 60 MPa), correctamente compactados y curados, en cuanto a la clase 5 corresponden a hormigones de baja resistencia (> 15 MPa), con un curado incorrecto. Es importante mencionar que kT es la permeabilidad al aire del concreto.

Tabla 18

Clasificación del hormigón por permeabilidad al aire

Clase N°	Descripción	kT [10^{-16} m^2]
1	Excelente	< 0.01
2	Muy Bueno	0.01 - 0.1
3	Normal	0.1 - 1
4	Pobre	1-10
5	Muy malo	> 10

Nota: Adaptado de TORRENT R.J (1998).

A continuación, se presenta en la Tabla 19 los resultados obtenidos en el ensayo de permeabilidad de aire, realizados a la edad de 30 días en cubos normados de 15 cm. de base, 15 cm. de altura y 15. de ancho.

Tabla 19

Resultados de ensayos de permeabilidad al aire del hormigón, dosificación patrón y 3% de NFU

Resultados ensayo permeabilidad al aire del hormigón			
Dosificación	Edad [días]	Pi [mbar]	Kt [10^{-16} m^2]
Patrón	30	30	0.069
3%		37	0.033

En base a lo mencionado, se puede concluir que ambas dosificaciones son de clase 2 y poseen una calidad “muy buena”, lo que quiere decir que son poco penetrables ante agentes externos como cloruros, sulfuros, entre otros, sirviendo como un indicador de calidad para durabilidad y buen desempeño del hormigón.

2.4.10.6 Ensayo no destructivo: Ultrasonido

El ensayo de ultrasonido es un método de prueba estándar capaz de medir la velocidad de propagación de pulso a través del hormigón, esta se encuentra regularizada bajo la normativa ASTM C 597. Es aplicable para valorar la calidad relativa y uniformidad del concreto, además, revela la existencia de grietas y huecos en la matriz de hormigón.

En 1985, Malhotra realizó estudios sobre los criterios y parámetros de aceptación del hormigón, fundamentándose en la medición de velocidad de onda mediante el ensayo de ultrasonido, clasificó la calidad del concreto en intervalos de velocidad, como se observa en la Tabla 20.

Tabla 20

Clasificación del hormigón según el ensayo de ultrasonido

Velocidad ultrasónica o de onda [m/s]	Clasificación del hormigón
$V > 4575$	Excelente
$4575 > V > 3660$	Bueno
$3660 > V > 3050$	Cuestionable
$3050 > V > 2135$	Pobre
$V < 2135$	Muy pobre

Nota: Adaptado de Malhotra V.M. (1985).

La Tabla 21 muestran los resultados del ensayo de ultrasonido, los cuales hacen referencia a la dosificación patrón y 3% de reemplazo de NFU a la edad de 28 días. En base a lo mencionado, se puede definir que la calidad del hormigón de las pruebas ensayadas se encuentra dentro de la clasificación “Buena”, ya que, sus velocidades de onda se encuentran en el rango de 3660 m/s a 4575 m/s. Adicionalmente, en el hormigón, la resistencia depende de la porosidad (Korolkov et al., 2020). En este caso, la implementación de NFU aumenta la porosidad de la matriz de hormigón, haciendo que, mientras más poros tenga el hormigón, menor será su densidad y resistencia, relentizando la propagación de los ultrasonidos (Korolkov et al., 2020). Esto explica

por qué la velocidad de onda en la dosificación patrón es mayor que en la dosificación con 3% de NFU.

Tabla 21

Resultado del ensayo de ultrasonido para la dosificación patrón y 3% de NFU

Resultados ensayo Ultrasonido					
Dosificación	Edad [días]	Cilindro	Tiempo [μs]	Velocidad de onda [m/s]	Velocidad de onda promedio [m/s]
Patrón	28	1	44.7	4451	4426.5
		2	45.2	4402	
3%		1	46.0	4326	4345
		2	45.6	4364	

2.5 Análisis de alternativas

Para el desarrollo de la carretera Ruta del Cacao se consideraron múltiples alternativas, buscando siempre incluir la sostenibilidad e innovación mediante la incorporación de llantas recicladas trituradas con un tamaño nominal de 1 mm., como reemplazo parcial del agregado fino para el diseño del pavimento.

Mediante el análisis de datos se ha demostrado que con altos porcentajes de caucho de llantas recicladas el comportamiento mecánico del hormigón se ve afectado, entre las posibles causas se encuentra una característica restrictiva del caucho, es hidrofóbico, lo que quiere decir que no posee una buena reacción o mezcla con el agua. Debido a esto, se evaluó el comportamiento al mezclarse con el hormigón a través de ensayos destructivos y no destructivos, los cuales se realizaron mediante pruebas de dosificaciones que van desde el 3% de reemplazo hasta el 100% de NFU, logrando cumplir con las especificaciones técnicas de las normativas vigentes. Se realizaron 8 dosificaciones diferentes, buscando la opción que resulte más viable. Para evaluar dicha factibilidad se analizaron diversos factores: económico, ambiental y desempeño mecánico.

2.5.1 Factor económico

Se analizan los beneficios y viabilidad económica, evaluando la factibilidad de la reutilización de materiales de desecho para disminuir la explotación de recursos naturales.

2.5.2 Factor ambiental

El factor ambiental está relacionado con el impacto de cada diseño en el medio ambiente, incluyendo la mitigación de la huella de carbono y la disminución de llantas desechadas en los vertederos y depósitos en general.

2.5.3 Desempeño mecánico

Se basa en el comportamiento y desempeño mecánico que tendrá la dosificación en el pavimento, incluyendo sus características de resiliencia, durabilidad y su capacidad de soportar cargas en servicio.

2.5.4 Escala de Likert

Para la evaluación de la opción con una mayor factibilidad, se realizó una escala de Likert, misma que en procesos de investigación es utilizada como instrumento de medición para recolectar datos cuantitativos (Luna, 2007). En este caso, la escala estará conformada por 5 niveles de satisfacción: excelente, muy bueno, normal, pobre y muy malo, en ese orden de importancia.

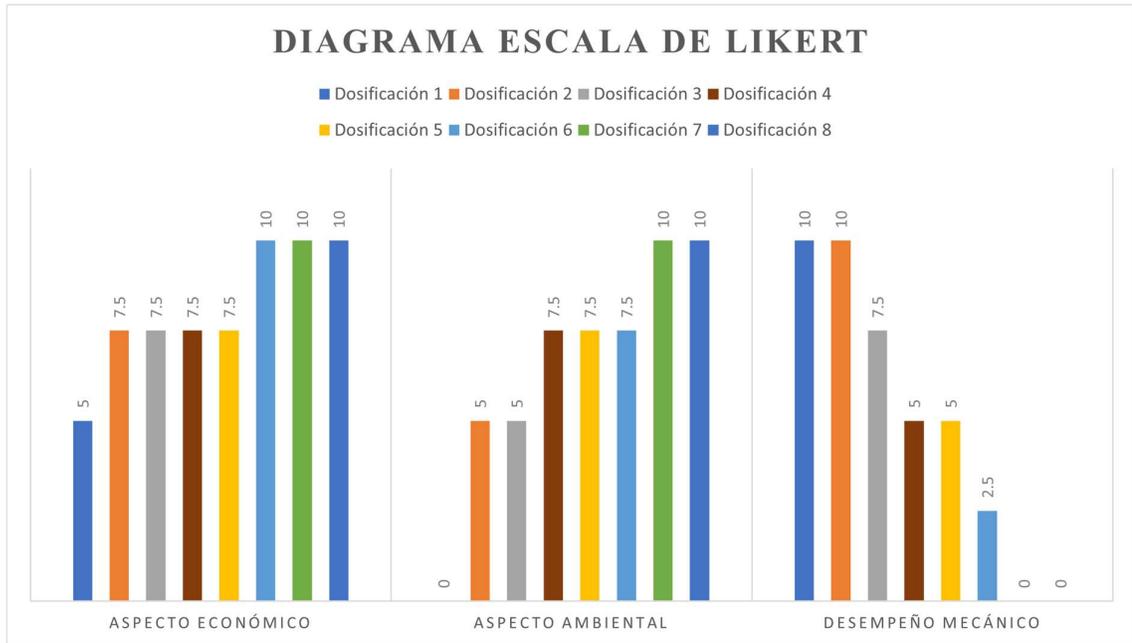
En la Tabla 2, se pueden observar las dosificaciones a evaluar; con el fin de crear un gráfico para mayor entendimiento, se asignó para cada uno las siguientes calificaciones:

- Excelente 10 puntos.
- Muy bueno 7.5 puntos.
- Normal 5 puntos.
- Pobre 2.5 puntos.

- Malo 0 puntos.

Figura 4

Diagrama “Escala de Likert” con la calificación de cada dosificación



La Figura 4

Diagrama “Escala de Likert” con la calificación de cada dosificación se encuentra conformado por 3 gráficos de barras divididos por una línea vertical, separando cada parámetro seleccionado. El primero corresponde al aspecto económico, el segundo al aspecto ambiental y el tercero hace referencia al desempeño mecánico.

2.5.5 Diseño definitivo.

El diseño elegido para el pavimento de la carretera de IV orden “Ruta del Cacao” es la dosificación 2, que corresponde al 3% de NFU en reemplazo del árido fino. Su elección se basó en la puntuación más alta del diagrama de Likert, con un total de 22.5 de 30 puntos posibles, representando un alto desempeño en cada una de las alternativas evaluadas y buscando la opción que contribuya de mejor manera a la económica circular, sostenibilidad, resiliencia y resistencia de la vía.

Capítulo 3

3. DISEÑOS Y ESPECIFICACIONES

3.1 Diseño del pavimento rígido

Para dar inicio con el diseño del pavimento rígido, es importante empezar mencionando que los cálculos a realizar se encuentran fundamentados en la metodología de diseño para pavimentos rígidos de la AASHTO 93.

En primera instancia, se determinará el espesor de losa de hormigón hidráulico, considerando que los valores de las propiedades mecánicas del concreto vienen dados por la dosificación de 3% de reemplazo de NFU por agregado fino, posteriormente se calculará las dimensiones de los pasadores y barras de amarre que reforzarán el pavimento, finalmente, se diseñará el reservorio para el sello de juntas.

3.1.1 Periodo de diseño

El periodo de diseño es el tiempo o vida útil en que el pavimento va a cumplir con las especificaciones técnicas y de desempeño para las que fue diseñado, en el presente caso de estudio, la “Ruta del Cacao” se encuentra localizada en una zona rural de la provincia de Guayas, a su vez, es catalogada como una carretera de IV orden, debido a su bajo volumen de tráfico. Con lo ya mencionado y en base a lo establecido en la Tabla 22, el periodo de diseño será de **20 años**.

Tabla 22

Periodos de diseño según la clasificación de la vía

Clasificación de la vía	Periodo de diseño [Años]
Urbana de alto volumen de tráfico	30 - 50
Rural de alto volumen de tráfico	20 - 50
Pavimentada de bajo volumen de tráfico	15 - 25
No pavimentada de bajo volumen de tráfico	10 - 20

Nota: Extraído de la AASHTO (1993).

3.1.2 Módulo de elasticidad del hormigón con 3% de NFU (E_c)

Es un indicador de la rigidez y capacidad que tiene la losa del pavimento para distribuir las cargas cuando se encuentra en servicio. Su cálculo se rige bajo el American Concrete Institute-318 (2019), bajo la siguiente expresión:

$$E_c = 57000(f'c)^{0.5} \quad (3.1)$$

Donde $f'c$ representa la resistencia a la compresión del concreto, como se observa en la Tabla 13, el valor de resistencia para el hormigón con dosificación de 3% de reemplazo de NFU a la edad de 28 días es 32.73 MPa (4747.09 psi), dando como resultado:

$$E_c = 57000(4747.09)^{0.5} = 3927250 \text{ psi}$$

3.1.3 Módulo de ruptura del hormigón con 3% de NFU (M_r)

Para este apartado se considera lo obtenido en la Tabla 14 de la sección 2.4.10.2, considerando el valor de 4.46 MPa de módulo de ruptura para el hormigón de dosificación con 3% de reemplazo de NFU a la edad de 28 días.

$$M_r = 4.46 \text{ MPa} = 646.87 \text{ psi} \quad (3.2)$$

3.1.4 Número de Ejes equivalentes ESALs

El estudio del tráfico de la “Ruta del Cacao” se realizó por medio del conteo de automóviles, camionetas, buses y camiones que circulan por la vía, logrando calcular el número de ejes equivalentes (ESALs) para el periodo de diseño del pavimento, dando como resultado **277000 ESALs**, como se observa en la Figura 5.

Figura 5

Tabla de conteo de tráfico “Ruta del Cacao”

Tipo de vehículo	Denominación	Tipo MTOP	Esquema	TPD	Factor equivalencia de carga	Tasa anual de crecimiento	Factor crecimiento	Tráfico acumulado de diseño	ESALs acumulado periodo de diseño
Livianos	Automoviles	2 EJES		30	0.0001	1.5	4.09	22397.7	2.24
	Camionetas	2 EJES		35	0.0001	1.5	4.09	26130.65	2.61
Buses	Bus 2 ejes	BUS 2 EJES		10	1.08	1	4.06	7410.23	8003.05
Camiones	Camión 2 ejes	2DB		97	3.73	1.2	4.07	72094.81	268913.63
Total				172				128033.39	2.77E+05

Nota: Extraído de Bucheli Pérez & Sarmiento Segovia (2021).

3.1.5 Índice de serviciabilidad

La serviciabilidad en el pavimento se define como la seguridad y confort que brinda un pavimento al flujo de vehículos que por ella transitan. La filosofía de diseño es el concepto serviciabilidad-rendimiento, que provee el significado de diseño de pavimento basado en las especificaciones del volumen de tráfico total y un mínimo nivel de serviciabilidad deseado al final del período de vida útil, esta se divide en tres niveles de serviciabilidad:

- El índice de serviciabilidad presente (PSI): Se obtiene a partir de la rugosidad y daños. Sus rangos son de 0 a 5, donde el más bajo significa una carretera de calidad baja-pobre y el más alto hace referencia a una en perfectas condiciones.
- El índice de serviciabilidad inicial (p_0): según la experimentación realizada en la AASHTO 93, esta tiene valores de 4.2 para pavimentos flexibles y 4.5 en pavimentos rígidos.
- El índice de serviciabilidad final (p_f): Es el nivel más bajo aceptable antes de que tenga que existir la necesidad de una reconstrucción, para autopistas grandes se

recomienda utilizar un coeficiente de 2.5 o mayor, pero para carreteras con menor volúmenes de tráfico se sugiere utilizar 2.

$$\Delta PSI = p_o - p_t \quad (3.3)$$

En el caso del presente proyecto, el coeficiente de serviciabilidad inicial (p_o) es 4.5 y la serviciabilidad final (p_t) de 2.

$$\Delta PSI = 4.5 - 2$$

$$\Delta PSI = 2.5$$

3.1.6 Coeficientes de drenaje (Cd).

El proceso de drenado es muy importante para las vías, ya que, influye directamente en los cambios que puede producir sobre la estructura, las características y propiedades de los materiales que lo conforman. Por lo tanto, en base a la Tabla 23 se considera para este proyecto una calidad de drenaje “Buena” con un tiempo de remoción del agua de 1 día, gracias a la capa de material granular y bombeo que tendrá el pavimento.

Tabla 23

Coeficiente de drenaje del pavimento

Calidad del drenaje	Tiempo de remoción del agua
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy Pobre	No drena

Nota. Extraído de AASHTO (1993).

Con lo ya mencionado, se calcula el porcentaje de tiempo cercano a la saturación del pavimento, este se relaciona directamente con el tiempo expuesto a lluvia “R” y congelamiento

“S”, como se observa en la Ecuación 3.4. $P = \frac{(S+R)*100}{365} \quad (3.4)$

$$P = \frac{(S+R)*100}{365} \quad (3.4)$$

El área de estudio se encuentra en la zona rural del Guayas, misma no que no se encuentra expuesta a congelamientos o temperaturas bajas, además, según el Anuario Meteorológico del INAMHI (2013) en Guayas llueve 71 veces al año, por lo que, el porcentaje de tiempo de exposición del pavimento se lo determina de la siguiente manera:

$$P = \frac{(0 + 71) * 100}{365} = 19.45\%$$

Finalmente, una vez determinada la calidad del drenaje y calculado su porcentaje de exposición, en base a la Tabla 24 se puede concluir que el coeficiente de drenaje es **1.05**, considerando el promedio del rango en el que se encuentra.

Tabla 24

Coefficientes de drenaje según su calidad

Calidad del drenaje	% del tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1%	1 – 5%	5 – 25%	> 25%
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.1
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1
Regular	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.9
Pobre	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.8
Muy Pobre	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.7

Nota. Extraído de AASHTO (1993).

3.1.7 Espesor de subbase

La capa subbase a considerar para el presente diseño tiene un espesor de **15 cm** de tipo granular.

3.1.8 Módulo efectivo de reacción de la subrasante (K).

Para esta sección, se tienen los datos de CBR de 41.90% y 5.90% para la subbase y subrasante respectivamente, los valores fueron obtenidos de Bucheli-Pérez et al. (2021). El

módulo efectivo de reacción de la subrasante se determinará en primera instancia mediante la

$$\text{Ecuación 3.5. } K_{preliminar} = 2.55 + 52.5 * \log (CBR) \quad (3.5)$$

1. Expresión para CBR menores a 10%:

$$K_{preliminar} = 2.55 + 52.5 * \log (CBR) \quad (3.5)$$

$$K_{preliminar} = 2.55 + 52.5 * \log (5.90)$$

$$K_{preliminar} = 43.02 \frac{MPa}{m}$$

Sin embargo, como la losa del pavimento se apoyará en una subbase de 150 mm de espesor, el parámetro K se ve modificado en base a la Tabla 25 American Concrete Pavement Association ,2006).

Tabla 25

Valor K según el espesor de la subbase

Valor K subrasante [Mpa/m]	Espesor de la subbase con módulo entre 100 y 500 Mpa			
	100 mm	150 mm	230 mm	305 mm
27	28.6 - 34.5	31.1 - 40.9	35.6 - 51.1	39.9 - 60.7
40.5	40.8 - 49.3	43.5 - 57.2	48.7 - 69.9	53.8 - 81.8
54	54.0 - 63.6	55.2 - 72.6	60.8 - 87.3	66.5 - 101.1

Nota. Extraído de ACPA (2006).

En relación con lo establecido, se interpolan los rangos en la que se encuentra el valor K preliminar, considerando el valor de 43.5 MPa/m (valor del tercio del rango) para el valor de 40.5 MPa/m y 55.2 MPa/m (valor inicial del rango) para 54.0 MPa/m, dando como resultado el valor K definitivo:

$$K_{definitivo} = 45.68 \frac{MPa}{m} = 168.28 \text{ pci}$$

3.1.9 Nivel de confiabilidad (R)

Es la probabilidad del pavimento para cumplir su funcionalidad estructural, brindar seguridad y confort a los transeúntes durante su vida útil, logrando resistir las condiciones para

las que fue diseñado. La Tabla 26 presenta los valores recomendados por la AASHTO (1993) para el diseño de pavimentos rígidos. La vía de estudio se encuentra ubicada en una zona rural y es una carretera colectora, por lo que, para el presente diseño se tomará el valor de **80%**.

Tabla 26

Nivel de confiabilidad según funcionalidad de la vía

Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urbano	Rural
Rutas interestatales y otras vías libres	85 - 99.9	85 - 99.9
Arterias principales	80 - 90	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Nota. Extraído de AASHTO (1993).

3.1.10 Desviación estándar total (S_0)

Tomando en consideración lo establecido en la Tabla 27, considerando que se diseñará para una variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito, el valor de desviación estándar seleccionado es **0.34**.

Tabla 27

Desviación Estándar según la condición de diseño

Condición de diseño	Desviación Estándar (S_0)	
	Pavimento rígido	Pavimento flexible
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito.	0.34	0.44
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito	0.39	0.49

Nota. Extraído de AASHTO (1993).

3.1.11 Coeficientes de transferencia de carga (J)

Factor que considera o mide la capacidad de la estructura del pavimento para transferir cargas de manera eficiente de una losa a otra, disminuyendo las deflexiones en las juntas (AASHTO, 1993). La Tabla 28 contiene los coeficientes de transferencia de carga dependiente el

tipo de pavimento y dispositivo de carga a emplear, considerando que para este proyecto no se diseñará berma de hormigón, a su vez, será “simple con juntas y reforzado con juntas” el valor a establecido para el diseño es 3.6.

Tabla 28

Coefficiente de transferencia de carga recomendada para varios tipos de pavimentos y condiciones de diseño

Berma	Asfalto		Hormigón	
	Si	No	Si	No
Dispositivo de transferencia de carga				
Tipo de pavimento				
Simple con juntas y reforzado con juntas	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 3.1	3.6 - 4.2
Pavimentos de concreto continuamente reforzado	2.9 - 3.2	-	2.3 - 2.9	-

Nota: Extraído de la AASHTO (1993).

3.1.12 Espesor de losa

La Tabla 29 presenta de manera tabulada los valores de los parámetros a considerar para el diseño del espesor de la capa de losa del pavimento.

Tabla 29

Parámetros para el espesor de la losa

Parámetro	Símbolo	Valor
Periodo de diseño	n	20 años
Módulo de elasticidad del hormigón	Ec	3927250 psi
Módulo de ruptura del hormigón	Mr	646.87 psi
Ejes equivalentes	ESALs	277000
Serviciabilidad inicial	Po	4.5
Serviciabilidad final	Pf	2
Coefficiente de drenaje	Cd	1.05
Módulo de reacción compuesto de la subrasante	K	168.28 pci
Nivel de confiabilidad	R	80%
Desviación estándar total	So	0.34
Coefficiente de transferencia de carga	J	3.6

Haciendo uso de un software de aplicación de la metodología AASHTO (véase Figura 6), se determinó que el espesor es 5.04 in., sin embargo, por facilidad constructiva se toma un espesor de losa de **130 mm**.

Figura 6

Diseño basado en la metodología AASHTO 1993

W ₁₈ :	S ₀ :	Módulo de Reacción K(pci):
277000	0.34	168.28
Confiabilidad:	Módulo de rotura del concreto S' _c (psi)	Pulsa aquí:
80%	646.87	Calcular
Z _r :	Coeficiente de drenaje C _g :	Espesor de la losa de concreto (pulg.):
-0.841	1.05	5.04
Índice de Serviabilidad Inicial, P ₀ :	Factor de Transferencia de Carga J:	
4.5	3.6	
Índice de Serviabilidad Final P _f :	E _c (psi):	
2	3927250	

Nota: Extraído de Software de Ingeniería elemental.

3.1.13 Dimensionamiento de losa

3.1.13.1 Sección transversal

En base a lo establecido en la “Tabla nacional de pesos y dimensiones” del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2016), en la que establece que el ancho máximo de los transportes de carga pesada es 2.60 m., a su vez, sin exceder lo establecido en la AASHTO 93 y las dimensiones geométricas de la vía, se determina un ancho de losa de **3 m.** por carril, teniendo dos carriles con un ancho total de vía de 6 m.

3.1.13.2 Sección longitudinal

En esta sección, se hace uso de los parámetros recomendados en la AASHTO 93, apoyados en la normativa local, tomando en consideración lo siguiente;

- La distancia entre juntas transversales $L \approx [4 \text{ a } 5]$ m.
- La relación larga/ancho del paño no exceda el límite de 1.25.
- El área de los paños debe tener como máximo 20 m^2 .

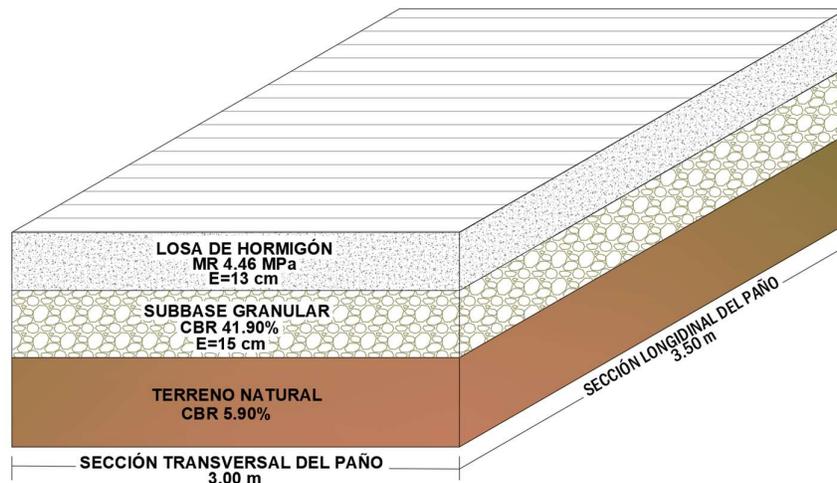
Con lo ya mencionado, se tomará una longitud de paño de losa de **3.5 m**, cumpliendo con cada recomendación dada.

3.1.13.3 Diseño geométrico del pavimento

La Figura 7 presenta de manera gráfica las dimensiones para un paño de losa, con las respectivas capas del pavimento que lo conforman.

Figura 7

Vista 3D del diseño de las capas del pavimento



3.1.14 Barras de transferencia

Los pasadores también conocidos como dowells, cumplen la función de reforzar la junta transversal del pavimento, evitando fisuraciones y agrietamientos por contracción y alabeo. La

AASHTO (1993) establece parámetros de diámetro, separación y longitud de pasadores, además, recomienda que sean ubicados en la mitad del espesor de la losa del pavimento.

$$\phi_{dowel} = \frac{1}{8} * \text{Espesor de losa} \quad (3.6)$$

Realizando una comparación entre las recomendaciones de la normativa y el mercado local; por fines constructivos, presupuestarios y disponibilidad de material dentro del país, se opta por la elección del diámetro, longitud y separación establecidas en el “Catálogo de soluciones para la construcción” de IdealAlambrec BEKAERT (2023).

Figura 8

Catálogo de barra lisa del Dowell

Selección de la barra lisa del Dowel® Ideal		
Espesor de la Losa H [cm]	Diámetro x Longitud Barra Lisa ø x L [mm]	Espaciamiento entre Barras Centro a centro [mm]
125 ≤ H ≤ 150	20 x 350	300
175 ≤ H ≤ 200	25 x 400	300
200 ≤ H ≤ 250	28 x 450	300
225 ≤ H ≤ 275	32 x 500	300

Nota. Extraído del Catálogo de soluciones para la construcción de IdealAlambrec BEKAERT (2023).

En base a la Figura 8, y considerando que la vía cuenta con un espesor dentro del rango de $125 \leq H \leq 150$, los pasadores contarán con las características establecidas en la Tabla 30, además, se colocarán en la mitad del espesor de la losa correctamente engrasados.

Tabla 30

Características del pasador seleccionado

Selección de pasador			
	Valor	Unidad	Material
Diámetro	20	[mm]	Acero liso
Longitud	350	[mm]	ASTM
Espaciamiento centro a centro	300	[mm]	A-615M

3.1.15 Barras de anclaje

En 2017, Grosek et al. realizaron un estudio de cuan importantes es reforzar las juntas de los pavimentos rígidos, dándole como resultado la tabla de la Figura 9, donde establecen el diámetro, longitud y la cantidad de barras de anclaje que necesita la losa del pavimento dependiendo la cantidad de carriles y su espesor.

Figura 9

Reforzamiento de las juntas longitudinales.

Tie bar diameter (mm)	Tie bar length (mm)	Distance (mm)	Pavement thickness (mm)
14-16	800	min. 3 pcs (single carriageway)	≤250 mm
16-18		min. 5 pcs (dual carriageway)	>250 mm

Nota: Extraído de Grosek et al. (2017).

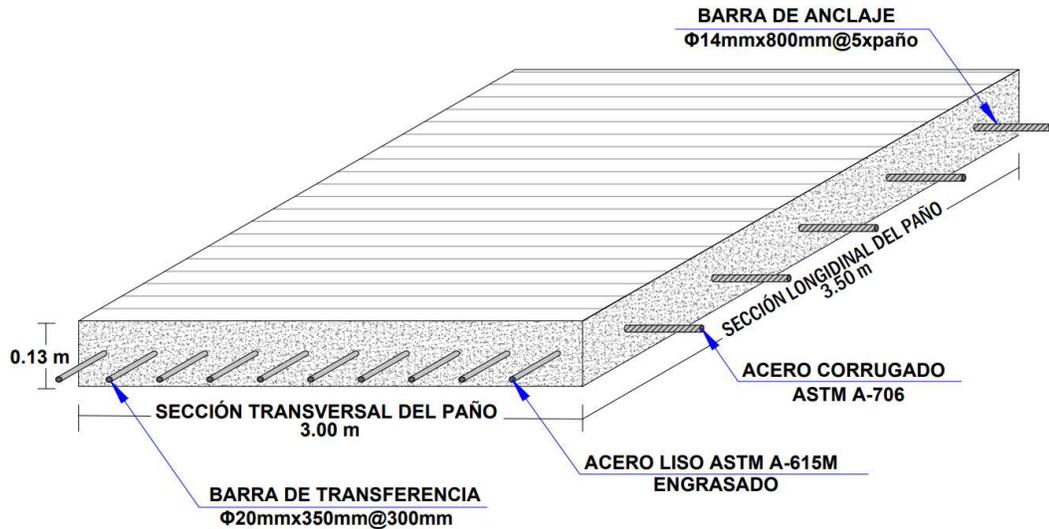
En ese contexto, para el presente proyecto se establecen 5 barras de anclaje corrugadas por paño, con diámetro de 14 mm., y longitud de 800 mm.

3.1.16 Diseño geométrico de losa con refuerzo de juntas

La Figura 10 presenta de manera gráfica las dimensiones y consideraciones establecidas en la sección 3.1.14 y 3.1.15.

Figura 10

Vista 3D de la losa del pavimento con detalles del refuerzo de juntas



3.1.17 Dimensionamiento reservorio de junta

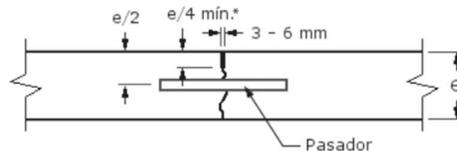
Para el diseño de este apartado se tomará en cuenta lo establecido en el “Manual de diseño y construcción de Pavimentos de Hormigón” (Calo et al., 2014).

3.1.17.1 Junta transversal

Con el espesor de losa previamente establecido y haciendo uso de los parámetros de la Figura 11, se determina las dimensiones del reservorio de junta transversal.

Figura 11

Dimensiones recomendadas para reservorio de junta transversal



Nota: Extraído del “Manual de diseño y construcción de Pavimentos de Hormigón” de Calo et al. (2014).

Con el espesor de losa previamente establecido y haciendo uso de los parámetros de la Figura 11, se determina las dimensiones del reservorio de junta transversal.

1. Ancho de ranura

Se tomará el máximo ancho recomendado, **6mm**.

2. Profundidad de ranura

$$P_{ranura} = \frac{\text{espesor losa}}{4} \quad (3.7)$$

$$P_{ranura} = \frac{13 \text{ cm}}{4} = 3.25 \text{ cm}$$

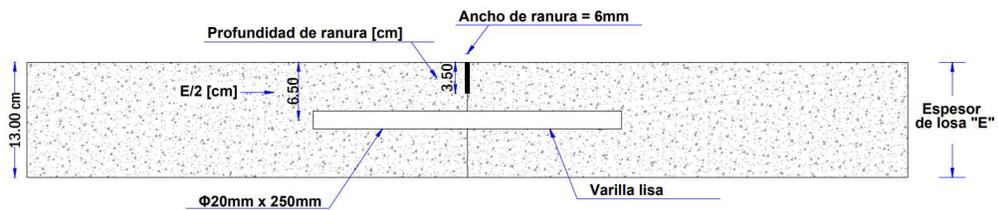
Por facilidades constructivas se tomará un ancho de ranura de **3.5 cm**.

3. Diseño geométrico junta transversal

La Figura 12 presenta de manera gráfica las dimensiones obtenidas en la sección 3.1.17.1.

Figura 12

Diseño geométrico de la junta transversal

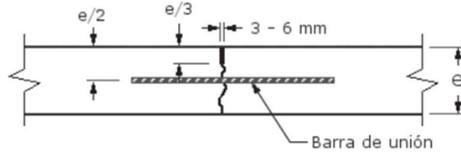


3.1.17.2 Junta longitudinal

De la misma manera que en la sección 3.1.17.1, se procede a determinar las dimensiones del reservorio de la junta longitudinal, haciendo referencia a la Figura 13.

Figura 13

Dimensiones recomendadas para reservorio de junta longitudinal



Nota: Extraído del “Manual de diseño y construcción de Pavimentos de Hormigón” de Calo et al. (2014).

1. Ancho de ranura

Se tomará el máximo ancho recomendado, **6mm**.

2. Profundidad de ranura

$$P_{ranura} = \frac{\text{espesor losa}}{3} \quad (3.8)$$

$$P_{ranura} = \frac{13\text{cm}}{3} = 4.33\text{ cm}$$

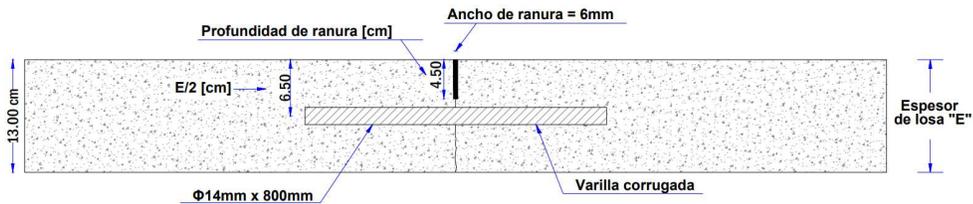
Por facilidades constructivas se tomará un ancho de ranura de **4.5 cm**.

3. Diseño geométrico junta longitudinal

La Figura 14 presenta de manera gráfica las dimensiones obtenidas en la sección 3.1.17.2.

Figura 14

Diseño de la junta longitudinal



3.1.17.3 Sello de juntas

El principal objetivo del sellado de la junta es restringir el paso del agua a través de esta, salvaguardando las barras de transferencia y anclaje de una posible corrosión, a su vez, evita la erosión y el bombeo del material fino por las juntas, por lo que, se usará un *sellante de Tipo II*: “Es un sellante de juntas y grietas capaz de mantener eficientemente el sello en la mayoría de los climas. El material es probado a -29 C° , para evaluar su comportamiento a temperaturas bajas, usando 50% en extensión” (American Society for Testing and Materials, 2007, p.1).

3.2 Especificaciones técnicas

3.2.1 Obras preliminares

3.2.1.1 Desbroce y limpieza

Descripción: El desbroce y limpieza es la primera etapa previo a empezar el levantamiento de la obra, ya que, prepara y alista el terreno para la fase constructiva. Esta actividad involucra la eliminación de maleza, arbustos, matorrales, desechos y escombros que impidan la ejecución y desarrollo del proyecto, garantizando un entorno de trabajo eficaz y altamente seguro (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Especificaciones: Realizar evaluación in situ para identificar de manera detallada las zonas y puntos con presencia de escombros, vegetación y todo tipo de obstáculo que impida el proceso constructivo del proyecto. Adicionalmente, se deberá limpiar y desbrozar 1 m. por lado del ancho de vía, haciendo uso de normativas de conservación medioambiental, para asegurar la movilidad de maquinarias y cuerpo constructivo en general. El manejo y transporte de residuos deberá seguir las correspondientes normativas y regulaciones ambientales del lugar donde se desarrolla la obra vial (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Unidad: metro cuadrado (m^2).

Equipo mínimo: herramienta menor, tractor de oruga, motosierra.

Medición y pago: este rubro se lo pagará a manera de “metro cuadrado” de área del terreno desbrozada y limpia apegándose a indicaciones de fiscalización.

limpia de acuerdo con las indicaciones del Fiscalizador.

Rubro: Desbroce y limpieza Metros cuadrados.

3.2.1.2 Trazado y replanteo

Descripción: El replanteo es el proceso de trazado y marcado de puntos importantes dentro de obra, es decir, el traslado de los puntos y datos importantes para materializar los elementos arquitectónicos y características dadas en los planos del proyecto, previo a la construcción del proyecto (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Especificaciones: Previo al inicio de la obra el equipo de construcción en conjunto con el fiscalizador definirá el trazado geométrico in situ previsto en los planos, haciendo uso de coordenadas y parámetros establecidos, apoyándose de estaciones totales, niveles, estacas y piolas de amarre. Adicionalmente, se deberá determinar puntos de control en el terreno, para corroborar el nivel de obra (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Unidad: metro cuadrado (m²).

Equipo mínimo: equipo topográfico, herramienta menor.

Medición y pago: este rubro se lo pagará a manera de “metro cuadrado”.

Rubro: Trazado y replanteo Metros cuadrados.

3.2.1.3 Rasanteo de la subrasante

Descripción: El rasanteo es la acción de nivelar y dar acabado a la superficie donde se asentará la totalidad del pavimento, de tal manera que la subrasante cumpla con los niveles,

dimensionamiento geométrico, alineamiento, y grado de compactación establecidos por el equipo de planificación y plasmados en los planos del proyecto. Su nivel se obtendrá mediante el corte y relleno del terreno natural previamente planificado, obteniendo así, una superficie de subrasante nivelada libre de material suelto, raíces, desmonte y correctamente compactado (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002)

Especificaciones: Mediante el uso de una motoniveladora, se procederá a escarificar la superficie del camino, este procedimiento debe realizárselo a una profundidad 10 cm. como mínimo. Luego, se realizará el extendido del material para posteriormente, a través de un camión cisterna se proceda a regar de manera uniforme toda la ruta trazada, esta operación deberá ser de manera constante hasta alcanzar un material homogéneo de humedad lo más cercana al ensayo de CBR (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Finalmente, con la ayuda de un rodillo liso vibratorio, se ejecuta la compactación del material previamente esparcido y humedecido, hasta alcanzar los niveles, perfiles y geometría de la rasante planificada. Para cumplir con este proceso, se deberá verificar la cota in situ respecto a la planificada, además, es necesario que se realicen los ensayos respectivos de densidad de campo, para evaluar la calidad y porcentajes de compactación alcanzados (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Unidad: metro cuadrado (m²).

Equipo mínimo: motoniveladora, rodillo vibratorio, camino cisterna.

Medición y pago: este rubro se lo pagará a manera de “metro cuadrado” de superficie.

Rubro: Rasanteo y compactación de la subrasante Metros cuadrados.

3.2.2 Movimiento de tierras

3.2.2.1 Acabado de la obra básica

Descripción: Esta operación tiene la finalidad de dar acabado a la superficie del camino a nivel de subrasante, cumpliendo con cada una de los parámetros, dimensiones y especificaciones en general: tales como pendientes, niveles de cota, secciones, alineamientos, determinadas en los planos de diseño o señaladas por el Fiscalizador (Dirección de Obras Públicas del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Manta, 2013).

Especificaciones: Para cumplir con este trabajo las tareas de excavación y relleno, alcantarillas, obras de arte y construcciones conexas deben estar previamente concluidas (Dirección de Obras Públicas del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Manta, 2013).

Unidad: metro cuadrado (m²).

Equipo mínimo: herramienta menor, rodillo vibratorio liso 142 HP, motoniveladora 135 HP.

Medición y pago: este rubro se lo medirá y pagará a manera de “metro cuadrado”

Rubro: Acabado de la obra básica Metros cuadrados.

3.2.2.2 Sub-Base (e=15cm)

Descripción: Este trabajo consiste en la construcción de capas de sub-base, misma que se posicionará sobre la subrasante previamente preparada y cumpliendo con las especificaciones dadas en los planos o por el fiscalizador. Los agregados que la conformarán serán obtenidos bajo procesos de cribado o trituración, cumpliendo con los estándares Sección 816 del Ministerios de obras públicas y comunicaciones (2002). Adicionalmente, conforme a la Dirección de Obras Públicas del cantón Quevedo Provincia los Ríos (2020) su resistencia a la deformación

dependerá de la fricción de los agregados que la conforman, esto se realiza aumentando su capacidad portante e incrementando la rigidez.

Especificaciones: Para empezar, el material seleccionado para la construcción de la sub-base tendrá que cumplir con parámetros y especificaciones de calidad; en base al ensayo de abrasión de los ángeles el coeficiente de desgaste máximo deberá ser del 50%, a su vez, el índice de plasticidad de la fracción que pase el tamiz N° 40 no deberá ser menor a 6 y su límite líquido máximo de 25. Adicionalmente, la capacidad portante de la sub-base (CBR) bajo ningún motivo deberá ser menor a 30% (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Durante el proceso de explotación, trituración o cribado, en caso de que se requiera de la selección de varias fracciones de materiales para lograr la granulometría, límites y parámetros establecidos, el contratista debe asegurar que el material seleccionado es el óptimo para la construcción, asimismo, debe garantizar la mezcla uniforme de estos en una planta aprobada por el Fiscalizador, para su posterior puesta en obra (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Posteriormente, el material deberá ser esparcido mediante distribuidoras apropiadas, en capas de grosor uniforme alrededor de toda la sección transversal especificada. Consecuentemente, se realizará la hidratación respectiva, tendido o emparejamiento, conformación y compactación, de modo que la distribución progrese a una distancia considerable de la sub-base terminada. En esta etapa el tránsito vehicular que no compete a la obra estará completamente prohibido, no obstante, la circulación de los equipos de obra podrá transitar a una velocidad máxima de 30 Km/h, evitando así, segregación y daño en la conformación de la superficie. (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

El compactado deberá ser mediante un rodillo vibratorio liso de 8 a 12 toneladas, el proceso de compactación tendrá como punto de partida el costado de la carretera dirigiéndose hacia el eje central, traslapando en cada pasada por lo menos la mitad del ancho de la pasada anterior.

Finalmente, el fiscalizador deberá asegurarse que la superficie final cumpla con los niveles, secciones y dimensionamientos establecidos en los planos del proyecto, a su vez, deberá garantizar la calidad y densidad de la capa final, mediante la realización de los ensayos correspondientes (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Unidad: metro cúbico (m³).

Equipo mínimo: herramienta menor, motoniveladora 135 HP, rodillo vibratorio liso 142 HP.

Medición y pago: este rubro se lo medirá y pagará a manera de “metro cúbico”.

Rubro: Sub-base granular espesor 15 cm Metros cúbicos.

3.2.2.3 Transporte de Sub-Base

Este trabajo tiene como función transportar de manera autorizada el material para capeo y construcción de la sub-base (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Medición: Las valores a pagar por el traslado de material serán los metros cúbicos/kilómetro, determinado a través del producto del volumen (m³) de material a necesitar por la distancia (km) de transporte (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Unidad: metro cúbico/Kilómetro (m³/Km).

Equipo mínimo: Volqueta 8 m³.

Pago: este rubro se lo pagará a manera de “metro cúbico/ Kilómetro”.

Rubro: Transporte de material sub-base..... Metros cúbicos/Kilómetro.

3.2.3 Obra vial

3.2.3.1 Losa de hormigón hidráulico mezclado en planta e=13cm

Descripción: La losa de hormigón se construye sobre la sub-base, misma que fue elaborada conforme a los documentos contractuales y las indicaciones del Fiscalizador, de acuerdo con el diseño puede incluir aire, dispositivos para transferir cargas, armaduras de refuerzo, todo depende del diseñador y las disposiciones del proyecto (Dirección de Obras del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Manta, 2013).

Especificaciones: Para su construcción la sub-base debe estar terminada, limpia de cualquier material extraño para que lo revise el fiscalizador, a su vez, el drenaje culminado y listo para su funcionamiento (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

El hormigón puede ser esparcido utilizando encofrados fijos, deslizantes o directamente desde la canaleta del mixer, a su vez, esta acción debe ser realizada uniformemente, con el mismo espesor a través de toda la superficie, mientras se realiza este proceso, el contratista debe cuidar las transferencias de cargas, prestando especial atención a las juntas. Además, deberá proteger el hormigón en estado fresco, evitando daño y segregaciones (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Una vez vertido el hormigón, se extraen los encofrados, se detallan las juntas y se procede a hacer el acabado. Los requisitos para la colocación y separación de las juntas se encuentran especificadas en los planos. Para realizar el acabado se deberá utilizar una máquina alisadora autopropulsada o con reglas alisadoras para corregir cualquier irregularidad del pavimento (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Los encofrados laterales fijos no se extraen del pavimento hasta luego de 24 horas del vertido. Por último, se debe realizar el curado humedeciéndolo con agua en toda la losa, hasta los bordes, posteriormente, se la recubrirá con láminas de papel impermeable para evitar que se evapore el agua por mínimo 72 horas, evitando fisuras por retracción. Es importante mencionar,

que al hormigón se le deberán realizar los respectivos ensayos de resistencia y calidad establecidos en el proyecto (Ministerios de obras públicas y comunicaciones, 2002).

Unidad: Metro cúbico (m³).

Equipo mínimo: herramientas menores.

Pago: este rubro se lo pagará a manera de “metro cúbico”.

Rubro: Losa de hormigón hidráulico e=13cm Metro cúbico.

3.2.3.2 Acero de refuerzo transversal (Dowell):

Descripción: Los dowells son los encargados de reforzar las juntas transversales, éstas son barras lisas que conforman un mecanismo para transferir cargas, permitiendo el desplazamiento relativo de la losa.

Especificaciones: Los dowells se deben colocar de manera transversal sobre la sub-base previamente nivelada y compactada. Su colocación será acompañada del respectivo anclaje para evitar el movimiento del refuerzo, a su vez, el distanciamiento y dimensiones para el diseño del pavimento deben regirse a lo especificado en los planos, además, el fiscalizador deberá asegurarse del cumplimiento de dichas especificaciones. La mitad del dowell deberá ser recubierta al momento de fundir un paño, para luego la mitad restante sea introducida y hormigonada en el paño de losa siguiente.

Al momento de verter el concreto se debe asegurar de que los dowells estén correctamente incorporados y estables.

Unidad: metro lineal (ml).

Equipo mínimo: herramienta menor.

Pago: este rubro se lo pagará a manera de “metro lineal”.

Rubro: Acero de refuerzo junta transversal (Dowell)..... Metro lineal.

3.2.3.3 Acero de refuerzo junta longitudinal (Varilla corrugada)

Descripción: Para la Dirección de Obras del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Manta (2013), es el proceso requerido para colocar el refuerzo que se requiere según el diseño en los paños de hormigón armado. El acero corrugado a utilizar debe cumplir con la normativa ASTM A 706.

Especificaciones: A medida que se vierte el hormigón se deberán ir colocando las varillas corrugas para refuerzo de la junta longitudinal, este proceso se lo realizará a través del encofrado lateral del paño de losa. El fiscalizador debe asegurarse de que las barras de acero corrugado antes de ser colocadas tengan las longitudes y diámetros correctos según el diseño.

Unidad: Kilogramo (kg).

Equipo mínimo: grifa de dos bocas para doblar el acero (perro).

Pago: este rubro se lo pagará a manera de “Kilogramo”.

Rubro: Acero de refuerzo junta longitudinal (acero corrugado) Kilogramo.

3.2.3.4 Corte de juntas, limpieza, colocación de cordón de resguardo y sello de junta

Descripción: En el pavimento rígido, se debe realizar el corte de juntas para evitar la retracción plástica e inducirle las fisuras de forma controlada, la ubicación de las juntas se debe establecer conforme a los planos del proyecto antes de que se descargue el concreto. El momento ideal para cortar las juntas es entre las 4 a 24 horas después que se haya hormigonado.

Posteriormente, se procede a limpiar correctamente para colocar un cordón de resguardo y, por último, el sello de juntas. Este último es un material flexible que se posiciona sobre los diversos tipos de juntas, con el objetivo de impedir el ingreso de agua y otros materiales a la misma (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2012).

Especificaciones: Al finalizar de hormigonar, entre 4 y 24 horas después, utilizando la cortadora de pavimento se deberá realizar el corte en la junta establecida previamente en los

planos del proyecto y bajo supervisión del fiscalizador. Para evitar que quede residuo de lechada en el interior de la junta, se deberá limpiar correctamente con una hidrolavadora, después, se realizará un segundo corte hasta la profundidad final de diseño; la profundidad del corte depende del diseño y requisitos del pavimento. Después del segundo corte, se lava nuevamente y se procede a secar la junta con el compresor. Una vez la actividad de lavado y corte se haya realizado con éxito, se deberá introducir el cordón de resguardo para soportar el sellante. Por último, se agrega el sello de silicona a través de una bomba aplicadora.

Unidad: metro lineal (ml).

Equipo mínimo: herramienta menor, cortadora de pavimento, compresor, hidro lavadora y bomba de silicona.

Pago: este rubro se lo pagará a manera de “metro lineal”.

Rubro: Corte de juntas, limpieza, colocación de cordón de resguardo y sello de juntas
.....Metro lineal.

Capítulo 4

4. ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL

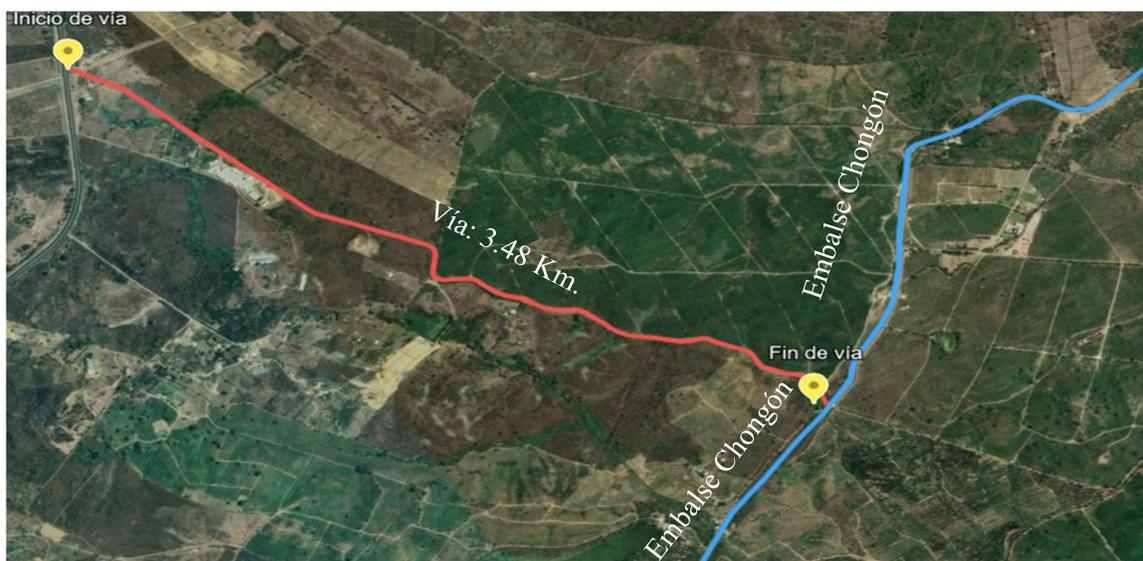
4.1 Descripción del proyecto

El proyecto de la construcción de la vía “Ruta del Cacao” tiene como objetivo diseñar un pavimento de hormigón hidráulico utilizando llantas recicladas, comparando diferentes tipos de dosificaciones para determinar la dosificación óptima de reemplazo y evaluar el impacto que tiene en el medio ambiente.

La zona de estudio se encuentra ubicada en el Km. 46.5 de Vía a la Costa, provincia del Guayas, Ecuador (véase Figura 15). La construcción del pavimento rígido utilizando residuos de llantas trituradas en reemplazo del agregado fino, no solo busca mejorar la estructura vial de la zona, sino que también aportaría a la innovación y sostenibilidad, cumpliendo el ODS 9: “Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación”. De igual manera se cumple con el ODS 11: “Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles”.

Figura 15

Mapa de la vía de estudio, extensión: 3.48 Km.



Nota: Extraído de Google Earth (2024).

La industria de la construcción es de las industrias más contaminantes, y dentro de ella, la construcción de carreteras se destaca como uno de los principales focos de atención. Los áridos son recursos minerales no renovables que juegan un papel fundamental en las bases y subbases viales, en los hormigones y en las vías de los ferrocarriles, entre otros usos, por ello, después del agua, son el recurso más utilizado (Bustillo Revuelta, 2008). El presente proyecto, reemplazará un porcentaje de agregado fino por un material de desecho, reduciendo la cantidad de recursos naturales explotados y los residuos de neumáticos fuera de uso, promoviendo así la economía circular y contribuyendo al cumplimiento del ODS 12: “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles”.

Algunas propuestas para minimizar el impacto ambiental de este tipo de pavimento:

- Buscar la compra de agregados en la zona, reduciendo el CO₂ producido al transportar los recursos necesarios desde la cantera hasta la zona de estudio, la Ruta del Cacao.
- El uso de NUF (Neumáticos Fuera de Uso) en la mezcla tiene el objetivo de disminuir el porcentaje que se utiliza de áridos, y aumentar la reutilización de desechos.
- Se debe realizar mantenimiento preventivo para prolongar la vida útil del pavimento.

4.2 Línea base Ambiental

4.2.1 Medio físico

4.2.1.1 Calidad del aire

La calidad del aire se la evalúa mediante ensayos realizados por Tobalina (2022), en la que se midió el material particulado suspendido en el aire, con características gruesas (PM 10), formado a partir de procesos mecánicos, como las obras de construcción, el viento causado por los vehículos, levantamiento y resuspensión del polvo de las carreteras, a su vez con

características finas (PM 2,5), producidos principalmente por todo tipo de combustión, quemas agrícolas e incendios forestales. Según lo evidenciado en la Tabla 31, se concluye que la calidad del aire es buena, cumpliendo con valores considerablemente por debajo de los límites máximos permisibles.

Tabla 31

Resultados de calidad del aire en Estación de Servicios “Cerecita”

Lugar de medición	Unidades	Resultados	LMP	Validación
Estación de Servicio Cerecita	PM 2.5 ug/m ³	6.9	50	Cumple
Estación de Servicio Cerecita	PM 10 ug/m ³	15.7	100	Cumple

Nota: Extraído de Mapa de puntos de muestreo de calidad del aire (Tobalina, 2022).

4.2.1.2 Tipo de suelo

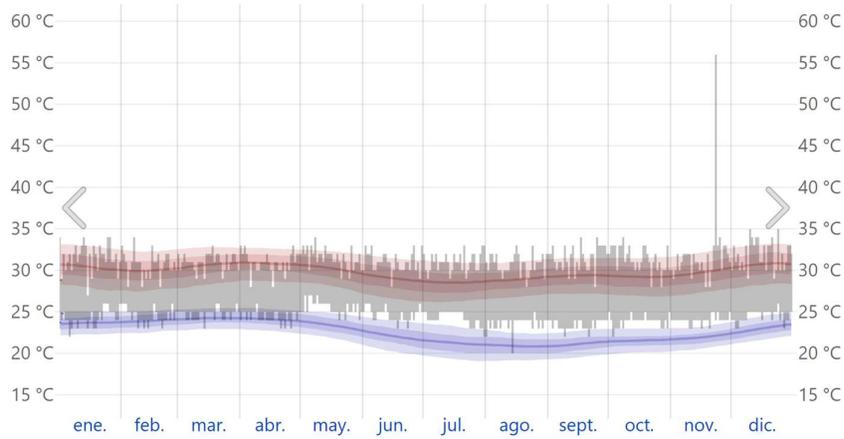
El suelo del sector en su mayoría está compuesto de areniscas blandas de color amarillento, arcillas grises y lutitas (M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2016). Adicionalmente, mediante ensayos realizados por Bucheli-Pérez et al. (2021), se caracterizó el suelo natural de la “Ruta del Cacao”, dando como resultado la presencia de canto rodado y lutita, con una capacidad portante de 5.90%. Es importante mencionar que actualmente la vía de estudio no cuenta con una capa de rodadura.

4.2.1.3 Clima

Con la finalidad de obtener datos actualizados para el desarrollo de la zona de estudio, se hará uso de la data de la estación meteorológica Aeropuerto Internacional José Joaquín de Olmedo, recopilados por Weather Spark (2023). La Figura 16 presenta las temperaturas para cada mes del año 2023, destacando una temperatura promedio máxima entre los 30 - 32 °C y temperatura promedio mínima entre los 20 - 22 °C.

Figura 16

Temperaturas tomadas por la Estación Meteorológica Aeropuerto Internacional José Joaquín de Olmedo en el año 2023

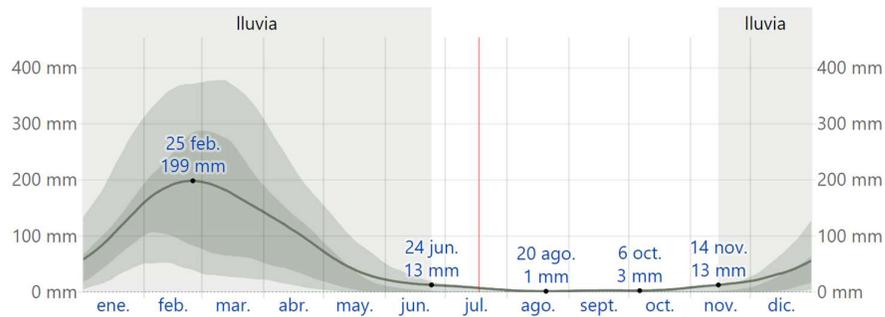


Nota: Extraído de Weather Spark (2023).

De la misma manera, la Figura 17 presenta las precipitaciones para cada mes del año 2023, destacando un promedio máximo de lluvia de 199 mm. en el mes de febrero y promedio mínimo de 1 mm. en el mes de agosto.

Figura 17

Precipitaciones tomadas por la Estación Meteorológica Aeropuerto Internacional José Joaquín de Olmedo en el año 2023



Nota: Extraído de Weather Spark (2023).

4.2.1.4 Hidrografía

El tramo final de la vía “Ruta del cacao” conecta con el embalse Chongón, como se observa en la Figura 15, mismo que posee superficie de 2 283 hectáreas y una capacidad hídrica máxima de 280 000 000 m³ (Instituto Nacional de Pesca, 2019), es importante mencionar que la falta de estaciones hidrológicas en los alrededores de la “Ruta del Cacao” limita la obtención de información hidrológica.

4.2.2 Medio biótico

La zona de estudio y sus alrededores se encuentra en un ecosistema de bosque semidecuidos de tierras bajas del Jama-Zapotillo, considerando que no se encuentra colindante o dentro de áreas protegidas, bosques protectores, o patrimonios forestales del Estado (Dirección de Ambiente - M. I. Municipalidad de Guayaquil, 2020).

4.2.2.1 Fauna

Para poder cubrir con el área de estudio se hace uso de la EIA “Estación de servicios Cerecita”, ubicada a 3 km. de la vía de estudio. Considerando que el sector posee intervención antrópica, no se identificaron especies en peligro de extinción. Entre la avifauna encontrada se identificaron alrededor de 8 familias, entre las principales identificadas comúnmente como: periquito del pacífico rodeado, gallinazo cabeza negra, soterrey criollo, tortolita ecuatoriana, negro matorralero, entre otros. Respecto a la fauna terrestre, se identificaron 4 familias comúnmente conocidas como: iguana verde sudamericana, loras falsas gigantes (especie de culebra), salamangas asiáticas, sapo gigante de Veracruz. Se resalta un mayor número de fauna de aves, debido a que, es un grupo de mejor adaptabilidad a este ecosistema, gracias a su capacidad de dispersión y preferencias alimenticias (Consultora Oro Azul CÍA. LTDA., 2022).

4.2.2.2 Flora

Para poder cubrir con la evaluación de la flora de la zona, se hace uso de la EIA “Estación de servicios Cerecita”, ubicada a 3 km. de la vía de estudio. El estudio detalla áreas colindantes con escasas de cobertura vegetal, debido a actividades antrópicas. A su vez, se observó una alta presencia de sembríos de cacao y banano, adicionalmente, se encontraron especies como: rosa china, higuerilla, mango, ceibo, ciruela, neem, guaba, cerecita, samán y niguito. Es importante acotar que la zona ha experimentado una alta intervención humana, dando como resultado el reemplazo de especies vegetales de la zona por cultivos y pastizales (Consultora Oro Azul CÍA. LTDA., 2022).

4.2.3 Medio territorial

4.2.3.1 Red vial

La “Ruta del Cacao” considerada de IV orden de acuerdo con el Ministerio del Transporte y Obras públicas, con un tráfico detallado en la Tabla 32, misma que interseca con la “vía a la Costa”, específicamente en el Km. 46.5, presenta un considerable flujo vehicular, con incremento de tránsito los fines de semana.

Tabla 32

Tráfico de la “Ruta del Cacao”

Transporte	Cantidad	Veces por semana (ida y vuelta)	Uso de vía al año
Camiones	97	668	64796
Vehículos livianos	68	130	8840
Buses	10	140	1400

Nota: Extraído de Bucheli Pérez & Sarmiento Segovia (2021).

4.3 Actividades del proyecto

Para el desarrollo de la vía a construir las acciones relevantes del proyecto que son susceptibles de causar impactos ambientales se pueden observar en la Tabla 33, las cuales están divididas en 2 fases, Obras preliminares y Operación.

Tabla 33

Actividades susceptibles a causar impactos ambientales

<i>Fase</i>	<i>Labor</i>	<i>Acción</i>
Obras preliminares	Preparación del terreno	Desbroce, limpieza, trazado, replanteo y rasanteo de la subrasante
Construcción	Preparación de la sub-base	Acabado de la obra básica, extensión y compactación de la sub-base, transporte de sub-base.
	Obra vial	Colocación de losa de hormigón hidráulico (3% NFU - e=13 cm), instalación de acero de refuerzo (transversal y longitudinal), corte, limpieza, colocación de cordón de resguardo y sello de juntas

4.3.1 Preparación del terreno

En los 3.48 km de la vía de estudio, hay vegetación y cultivos a lo largo de toda su extensión, y al final de esta, existe una salida de agua que conecta con el embalse Chongón. Se debe realizar una limpieza con maquinaria, asegurándose de que sea dentro del ancho de la carretera, para despejar el trayecto. El trabajo se llevará a cabo con alto cuidado y rigurosidad, protegiendo los cultivos en toda la zona.

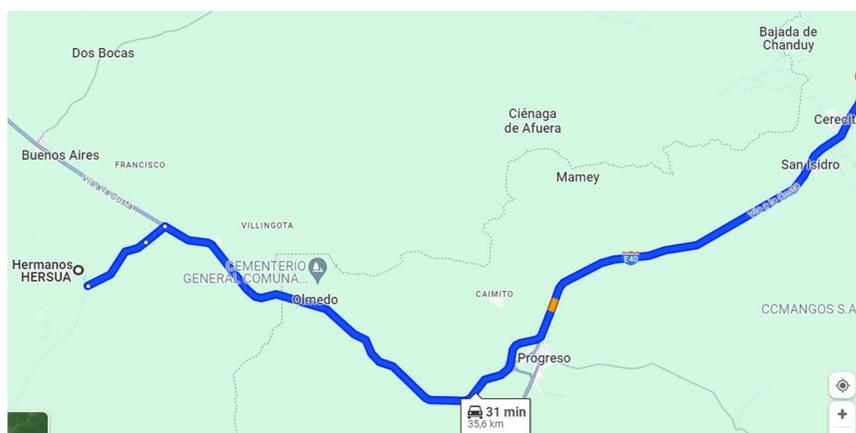
4.3.2 Preparación de la sub-base

Para transportar el material de la sub-base, la cantera más cercana a la vía se encuentra a 35 km., como se puede observar en la Figura 18, desde la Cantera Hermanos HERSUA. Esta cantera se dedica a la comercialización y transporte de materiales, además de ofrecer el alquiler

de maquinaria para construcción. El tiempo aproximado de viaje desde la cantera hasta la Ruta del Cacao es de 31 minutos.

Figura 18

Mapa de la ruta Cantera Hermano HERSUA – Ruta del Cacao



Nota: Extraído de Google Eath (2024).

4.3.3 Obra vial

En esta fase se debe tener sumo cuidado al colocar la losa de hormigón, asegurándose de mantener la temperatura y las especificaciones técnicas adecuadas al momento de su vertido, especialmente en la zona de encuentro de la vía con el Embalse Chongón, ya que, se debe evitar que el hormigón se escurra hacia este cuerpo de agua para prevenir su contaminación. Adicionalmente, es preciso calcular correctamente la cantidad de acero de refuerzo para minimizar residuos. En caso de que se generen restos de acero, se tiene que gestionar y planificar su transporte a un lugar adecuado para su procesamiento y disposición final.

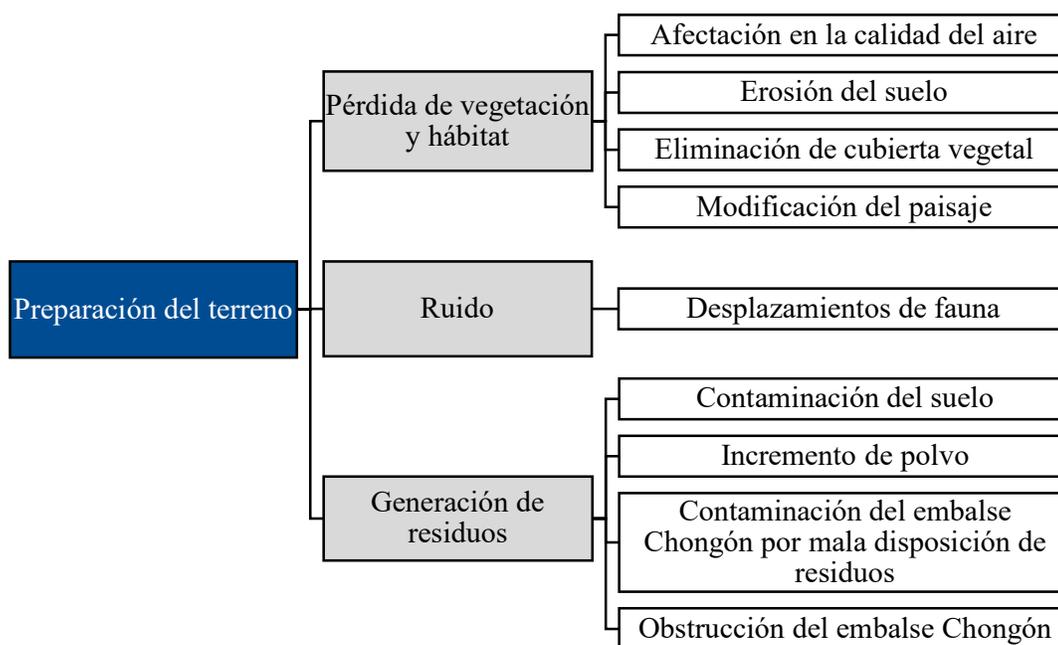
4.4 Identificación de impactos ambientales

En primera instancia, se tabularon los impactos ambientales mediante la realización de diagramas de redes, en la que se esquematizan y describen las repercusiones causadas por las actividades mencionadas en la Tabla 33.

La Figura 19 muestra de manera detallada los impactos ambientales causados por la actividad de preparación del terreno.

Figura 19

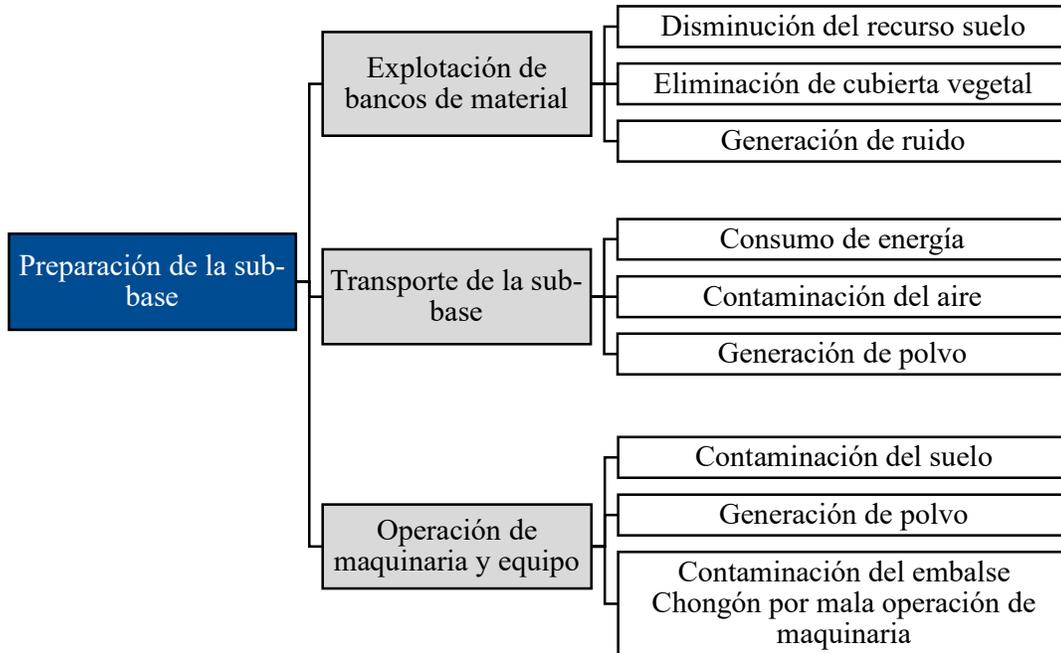
Impactos ambientales causados por la preparación del terreno



En la Figura 20 se observa la tabulación de los impactos ambientales causados por la actividad de preparación de la sub-base

Figura 20

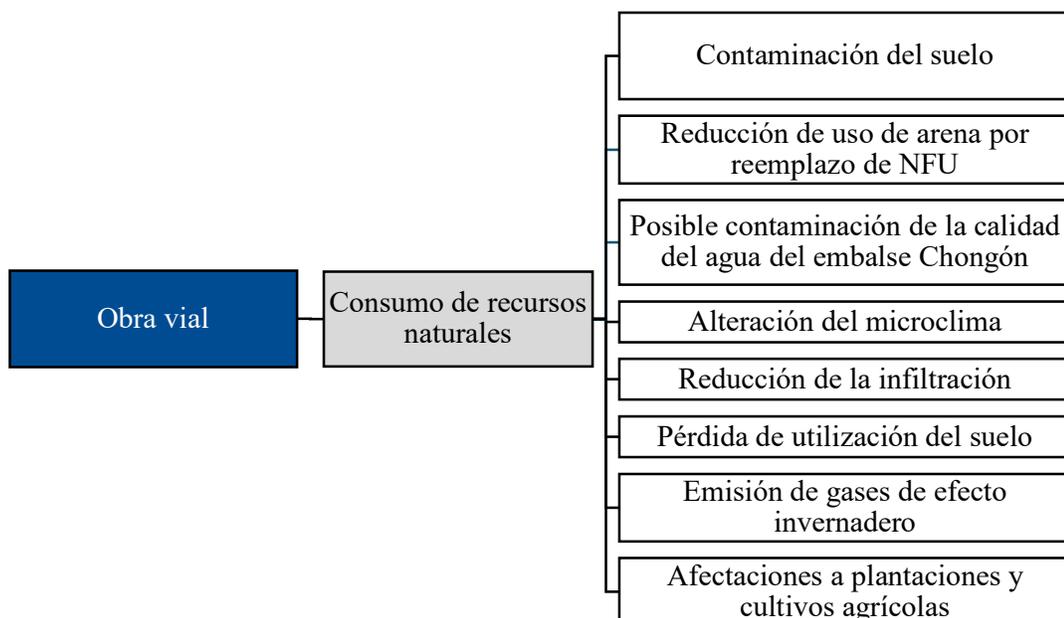
Impactos ambientales causados por la actividad de preparación de la sub-base



La Figura 21 detalla los impactos ambientales causados por la actividad de obra vial.

Figura 21

Impactos ambientales causados por la actividad de obra vial



4.5 Valoración de impactos ambientales

Para la valoración de impactos se hará uso de la expresión de valoración cualitativa del índice de importancia según Tito (2020).

$$Imp = We * E + Wd * D + Wr * R \quad (4.1)$$

Donde:

- Imp = Valor de importancia del impacto ambiental
- We = Peso de extensión
- E = Valor de extensión
- Wd = Peso de duración
- D = Valor de duración
- R = Valor de reversibilidad
- Wr = Peso de reversibilidad

$$IA = \sqrt{Imp * |Mag|} \quad (4.2)$$

Donde:

- IA = Valor de impacto ambiental (media geométrica de Imp. y Mag.).
- Mag = Valor de magnitud, (+) si es beneficioso, (-) si es perjudicial.

Para la presente EIA, las ponderaciones a considerar para los diferentes criterios a evaluar se encuentran establecidos en la Figura 22.

Figura 22

Ponderaciones seleccionadas de criterios a evaluar

<i>We criterio de extension</i>	0.4
<i>Wd criterio de duración</i>	0.3
<i>Wr criterio de reversibilidad</i>	0.3

Por otro lado, los puntajes de acuerdo con la categoría asignada para los criterios de extensión, duración, reversibilidad, magnitud, vienen dados de acuerdo con la Figura 23.

Figura 23

Criterios de valoración cualitativa del índice de importancia

<i>Extensión</i>	<i>Duración</i>	<i>Reversibilidad</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Puntaje</i>
Puntual	Esporádica	Completamente reversible	Poca incidencia	1
Particular	Temporal	Medianamente reversible		2.5
Local	Periódica	Parcialmente irreversible	Mediana incidencia	5
Generalizada	Recurrente	Medianamente irreversible	Alta incidencia	7.5
Regional	Permanente	Completamente irreversible		10

Nota: Extraído de Tito (2020).

La calificación cualitativa del impacto ambiental se determinará de acuerdo con el valor índice de impacto ambiental (IA), según lo establecido en la Figura 24.

Figura 24

Calificación del impacto ambiental de acuerdo con el valor del índice IA

<i>Calificación del impacto ambiental</i>	<i>Valor del índice de impacto ambiental (IA)</i>
Altamente significativo	$ IA \geq 6.5$
Significativo	$6.5 > IA \geq 4.5$
Despreciable	$ IA < 4.5$
Benéfico	$ IA > 0$

Nota: Extraído de Tito (2020).

La selección de la categoría en la que se encuentra cada criterio a evaluar se encuentra directamente relacionado con los conceptos establecidos en la Figura 25 .

Figura 25

Concepto de cada criterio a evaluar

Duración	Extensión	Reversibilidad
Tiempo que dura la afectación, considerando las implicaciones futuras o indirectas.	Área de influencia del impacto ambiental en relación con el entorno del proyecto.	Posibilidad de reconstruir las condiciones iniciales posterior al impacto ambiental.
Esporádica: se presenta muy intermitente	Puntual: El impacto se encuentra en el sitio de las operaciones.	Completamente reversible: Aquel en el que la alteración pueda ser asimilada por el entorno.
Temporal: se presenta en forma intermitente o continuada sólo mientras dura la actividad.	Particular: El impacto se encuentra dentro del área de influencia directa de las operaciones.	Medianamente Reversible: Aquel en el que la alteración pueda ser asimilada por el entorno, medible a corto, mediano o largo plazo.
Periódica: se presenta en forma continuada.	Local: El área de influencia del impacto no rebasa los límites del área de influencia de las operaciones.	Parcialmente Irreversible: La alteración del medio o pérdida es posible de reparar tanto por la acción natural y por la humana.
Recurrente: se presenta en forma continuada más allá de la duración de la actividad	Generalizada: El impacto ocurrido se extiende dentro del área de influencia indirecta de la operación.	Medianamente Irreversible: La alteración del medio o pérdida es imposible de reparar en su totalidad tanto por la acción natural como por la humana.
Permanente: se presenta en todo tiempo.	Regional: El impacto ocurrido se extiende fuera del área de influencia indirecta de la operación.	Completamente Irreversible: La alteración del medio o pérdida es imposible de reparar tanto por la acción natural como por la humana.

En la Figura 26 se puede observar la valoración de los impactos ambientales tomando en cuenta los criterios a evaluar en cada fase de la obra. En esta se destacan los 3 impactos negativos con mayor puntuación y alto nivel de significancia, mismos que vienen dados por la emisión de gases de efecto invernadero al momento de realizar la capa de rodadura del pavimento, la afectación de cultivos agrícolas de la zona y la contaminación del embalse Chongón por mala operación de maquinaria, teniendo valores de -9.6, -7.8, -7.7 puntos respectivamente de Impacto ambiental (IA) negativo. Adicionalmente, se resalta la actividad beneficiosa dada por la reducción de uso de arena por reemplazo de NFU, teniendo 8.7 puntos de impacto positivo.

Figura 26

Valoración de impactos ambientales

VALORACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES									
ACTIVIDADES A EVALUAR			CARACTERÍSTICA						Valoración cualitativa
Factor	Impacto	E	D	R	Imp	Mag	IA		
PREPARACIÓN DEL TERRENO	Pérdida de vegetación y habitad	Afectación de la calidad del aire	2.5	1	1	1.6	-7	-3.3	Despreciable
		Erosión del suelo	2.5	2.5	5	3.25	-6	-4.4	Despreciable
		Eliminación de cubierta vegetal	2.5	10	10	7	-6	-6.5	Significativo
		Modificación del paisaje	2.5	7.5	7.5	5.5	-6	-5.7	Significativo
	Ruido	Desplazamientos de fauna	5	10	10	8	-6	-6.9	Altamente significativo
	Generación de residuos	Contaminación del suelo	5	5	7.5	5.75	-7	-6.3	Significativo
		Incremento de polvo	1	2.5	2.5	1.9	-5	-3.1	Despreciable
		Contaminación del embalse Chongón por mala disposición de residuos	7.5	2.5	5	5.25	-10	-7.2	Altamente significativo
		Obstrucción del embalse Chongón	7.5	2.5	5	5.25	-10	-7.2	Altamente significativo
	PREPARACIÓN DE LA SUB-BASE	Explotación de bancos de material	Disminución del recurso suelo	2.5	2.5	7.5	4	-5	-4.5
Eliminación de cubierta vegetal			2.5	2.5	5	3.25	-6	-4.4	Despreciable
Generación de ruido			5	2.5	2.5	3.5	-4	-3.7	Despreciable
Transporte de la sub-base		Consumo de energía	5	2.5	2.5	3.5	-5	-4.2	Despreciable
		Contaminación del aire	5	2.5	2.5	3.5	-5	-4.2	Despreciable
		Generación de polvo	2.5	2.5	1	2.05	-5	-3.2	Despreciable
Operación de maquinaria y equipo		Contaminación del suelo	2.5	2.5	5	3.25	-6	-4.4	Despreciable
	Generación de polvo	1	2.5	1	1.45	-6	-2.9	Despreciable	
	Contaminación del embalse Chongón por mala operación de maquinaria	7.5	5	5	6	-10	-7.7	Altamente significativo	
OBRA VIAL	Consumo de recursos naturales	Contaminación del suelo	7.5	5	10	7.5	-8	-7.7	Altamente significativo
		Reducción de usos de arena por	7.5	10	5	7.5	10	8.7	Benéfico
		Posible contaminación de la calidad del agua del embalse Chongón	2.5	10	2.5	4.75	-9	-6.5	Altamente significativo
		Alteración del microclima	2.5	5	7.5	4.75	-8	-6.2	Significativo
		Reducción de infiltración	5	5	5	5	-8	-6.3	Significativo
		Pérdida de utilización del suelo	1	5	7.5	4.15	-8	-5.8	Significativo
		Emisión de gases de efecto invernadero	10	7.5	10	9.25	-10	-9.6	Altamente significativo
		Afectaciones a plantaciones y cultivos agrícolas	7.5	5	7.5	6.75	-9	-7.8	Altamente significativo

4.6 Medidas de prevención/mitigación

Las medidas de mitigación o prevención se establecen para reducir o evitar el impacto ambiental causado por cierta actividad en contacto con la naturaleza. A continuación, la Figura 27 presenta las medidas de mitigación para la actividad de preparación del terreno, detallando que todos los impactos ambientales son adversos con la naturaleza.

Figura 27

Medidas de mitigación para la preparación del terreno

PREPARACIÓN DEL TERRENO			
<i>Factor</i>	<i>Impacto</i>	<i>Medida de mitigación</i>	<i>Observación</i>
Pérdida de vegetación y hábitad	Afectación de la calidad del aire	Evitar la quema de vegetación.	Adverso
	Erosión del suelo	Elaborar un plan de plantación de vegetación en los alrededores de la construcción de la vía, para detener la erosión causada por el desbroce del camino.	Adverso
	Eliminación de cubierta vegetal	Reutilización del material para usos como la reforestación de la zona.	Adverso
	Modificación del paisaje	El impacto visual negativo podrá ser mejorado con ayuda de las labores de restitución de suelo y vegetación.	Adverso
Ruido	Desplazamientos de fauna	Realizar el desbroce de manera progresiva, para permitir el desplazamiento paulatino de las especies habitantes.	Adverso
Generación de residuos	Contaminación del suelo	Erradicar el uso de herbicidas en las acciones de desmonte del camino.	Adverso
	Incremento de polvo	Realizar el desbroce y la limpieza de manera paulatina, apoyándose del uso de agua para humedecer la capa superficial de suelo.	Adverso
	Contaminación del embalse Chongón por mala disposición de residuos	Disposición del material lejano al embalse, previo a su traslado a los centros de acopio de residuos de construcción.	Adverso
	Obstrucción del embalse Chongón	Colocación de malla protectora sobre el cuerpo del embalse.	Adverso

La Figura 28 muestra las medidas de mitigación para la actividad de preparación de la sub-base, detallando que todos los impactos ambientales son adversos con la naturaleza.

Figura 28

Medidas de mitigación para la preparación de la sub-base

PREPARACIÓN DE LA SUB-BASE			
Subactividad	Impacto	Medida de mitigación	Observación
Explotación de bancos de material	Disminución del recurso suelo	No mitigable	Adverso
	Eliminación de cubierta vegetal	Reutilización del material para usos como la reforestación de la zona.	Adverso
	Generación de ruido	No mitigable	Adverso
Transporte de la sub-base	Consumo de energía	Apagar el vehículo cuando no se encuentre en uso.	Adverso
	Contaminación del aire	Hacer uso de vehículos en buen estado y condiciones, con bajas o nulas emisiones de humo	Adverso
	Generación de polvo	Transportar los materiales en estado húmedo y recubiertos.	Adverso
Operación de maquinaria y equipo	Contaminación del suelo	Evitar derrames de combustibles o fugas por parte de las maquinarias	Adverso
	Generación de polvo	Trabajar con material humedecido.	Adverso
	Contaminación del embalse Chongón por mala operación de maquinaria	Colocación de malla protectora sobre el cuerpo del embalse. Contratación de mano de obra capacitada.	Adverso

La Figura 29 evidencia las medidas de mitigación para la actividad de obra vial, detallando que únicamente la reducción de uso de arena por reemplazo de NFU genera un impacto ambiental positivo con la naturaleza.

Figura 29

Medidas de mitigación para la obra vial

OBRA VIAL			
<i>Factor</i>	<i>Impacto</i>	<i>Medida de mitigación</i>	<i>Observación</i>
Consumo de recursos naturales	Contaminación del suelo	La disposición de sobrantes de hormigón deberá recogerse para su posterior reciclado o disposición definitiva.	Adverso
	Reducción de usos de arena por reemplazo de NFU		Benéfico
	Posible contaminación de la calidad del agua del embalse Chongón	Evitar el derramamiento de hormigón al embalse. Proteger la zona de contacto del embalse con una malla antiadherente mientras se realiza el hormigonado.	Adverso
	Alteración del microclima	No reversible	Adverso
	Reducción de infiltración	No reversible	Adverso
	Pérdida de utilización del suelo	No reversible	Adverso
	Emisión de gases de efecto invernadero	Implementación de materiales reciclados como los NFU, apagar maquinarias cuando no se encuentren en uso.	Adverso
	Afectaciones a plantaciones y cultivos agrícolas	Evitar en lo posible el tránsito de mixers en linderos con sembríos, evitar derrames de hormigón.	Adverso

4.7 Estimación de la huella de carbono

La huella de carbono es la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) liberados a la atmósfera como resultado de las actividades relacionadas con la producción o el consumo de bienes y servicios (Pandey et al., 2011). Para calcular la huella de carbono generada por la mezcla de hormigón del pavimento diseñado, es necesario obtener los datos de emisión para cada material utilizado.

Para estimar la emisión de CO₂ del proceso de trituración del caucho, se utilizó un factor de emisión de 0,0920 t CO₂eq/MWh, establecido por el Ministerio de Energías y Minas (2022). Este factor se multiplicó por el consumo de energía requerido para triturar 1 kg de neumáticos fuera

de uso, que en este caso es de 0,1 kWh, resultando en una emisión de 0,0092 kg CO₂/kg de NFU.

La huella de carbono generada por la extracción de arena y piedra, según Hossain et al. (2016) estimaron que se emiten 0,023 kg CO₂ -Eq por kilogramo de agregado fino natural procesado y 0,033 kg CO₂-Eq por kilogramo procesado de piedra triturada.

En el caso del cemento Holcim HE utilizado en el presente proyecto, se extrajo la huella de carbono directamente de su fabricante, 655 kg CO₂ -Eq por tonelada de cemento (Holcim Ecuador, 2022). Finalmente, por falta de datos del fabricante para los aditivos especificados en la Tabla 34, se procedió a promediar las emisiones de CO₂ causadas por la fabricación de aditivos similares de la misma marca, establecidas en las declaraciones ambientales de los productos (EPD), obteniendo un valor de 5.80 kg CO₂ -Eq por tonelada de aditivo (Sika USA, 2023).

Con lo ya mencionado, en la Tabla 34 se presentan las emisiones de CO₂ causados por la mezcla patrón o convencional, en la que se estiman las emisiones totales para un m³ de mezcla, con un valor de 320.34 kg CO₂ -Eq y las emisiones para el volumen total de hormigón a considerar en la construcción de la losa del pavimento, con una estimación de 936404.35 kg CO₂ -Eq.

Tabla 34

Emisiones de CO₂ caudas por la dosificación patrón de la losa del pavimento

PAVIMENTO CON DOSIFICACIÓN PATRÓN					
<i> Materiales [kg/m³]</i>	<i> Kg totales</i>	<i> Emisión de CO₂ Kg CO₂-eq/ Kg material</i>	<i> Emisiones totales de CO₂/ m³</i>	<i> Emisiones totales de CO₂/ 3.48 Km de vía</i>	
Cemento HE	408	1192665.60	0.655	267.240	781195.97
Piedra #67	700	2046240.00	0.033	23.100	67525.92
Piedra #78	311	909115.20	0.033	10.263	30000.80
Arena de Rio	854.31	2497318.99	0.023	19.649	57438.34
Agua	175	511560.00	0.0003	0.053	153.47
Sikaplast® 2001-R	1.63	4764.82	0.0058	0.009	27.64
Sikaplast® 5012	3.67	10728.14	0.0058	0.021	62.22
Emisiones totales				320.34	936404.35

La Tabla 35 presenta la estimación de las emisiones de CO₂ causados por la mezcla con 3% de reemplazo de NFU, obteniendo las emisiones totales para un m³ de mezcla, con un valor de 320.22 kg CO₂ -Eq y las emisiones para el volumen total de hormigón a considerar en la construcción de la losa del pavimento, con una estimación de 869191.69 kg CO₂ -Eq.

Tabla 35

Emisiones de CO₂ caudas por la dosificación 3% de NFU de la losa del pavimento

PAVIMENTO CON DOSIFICACIÓN 3% DE NFU					
<i>Material</i>	<i>[kg/m3]</i>	<i>Kg totales</i>	<i>Emisión de CO2 Kg CO2- Eq/ Kg material</i>	<i>Emisiones totales de CO2/ m3</i>	<i>Emisiones totales de CO2/ 3.48 Km de vía</i>
Cemento HE	408	1107475.20	0.655	267.24	725396.26
Piedra #67	700	1900080.00	0.033	23.1	62702.64
Piedra #78	311	844178.40	0.033	10.26	27857.89
Caucho	8.72	23669.57	0.0092	0.080	217.76
Arena de Rio	845.59	2295269.50	0.023	19.45	52791.20
Agua	175	475020.00	0.0003	0.0525	142.51
Sikaplast® 2001-R	1.63	4424.47	0.0058	0.00945	25.66
Sikaplast® 5012	3.67	9961.85	0.0058	0.0213	57.78
Emisiones totales				320.22	869191.69

4.8 Conclusiones y recomendaciones del EIA

- La implementación de la losa del pavimento con reemplazo del 3% de NFU por árido fino, reduce el 7.18% de emisiones de CO₂ (92.82 Kg CO₂ -Eq) en comparación a un pavimento con losa de hormigón convencional.
- En la actividad de preparación del terreno, la generación de residuos cuenta con los principales efectos ambientales indirectos, esto a causa de a la obstrucción y contaminación del embalse Chongón por mala disposición de residuos, obteniendo un valor IA igual a -7.2 en ambos casos.
- En la actividad de preparación de la sub-base uno de los impactos más preocupantes es la contaminación del embalse Chongón por mala operación de maquinaria,

generando un IA de -7.7. Además, es importante resaltar que el resto de los impactos dentro de esta actividad son despreciables.

- Se destaca la reducción de uso de arena por NFU en la Obra Vial, generando un IA de 8.7 puntos, lo cual se considera beneficioso para la sostenibilidad del proyecto. Los impactos negativos altamente significativos en esta actividad vienen dados por la emisión de gases de efecto invernadero, con un IA de -9.6 puntos y en las afectaciones a plantaciones y cultivos agrícolas, la cual posee un IA de -9.8 puntos.
- En la obra vial, se debe prestar especial atención a la posible contaminación de la calidad del agua del embalse Chongón (IA: -6.5 puntos) y a la alteración del microclima (IA: -6.2 puntos), asegurando una gestión adecuada.
- Se recomienda acatar las medidas de mitigación para cada fase en la construcción de la Ruta del Cacao para evitar inconvenientes y afectaciones al ambiente.

Capítulo 5

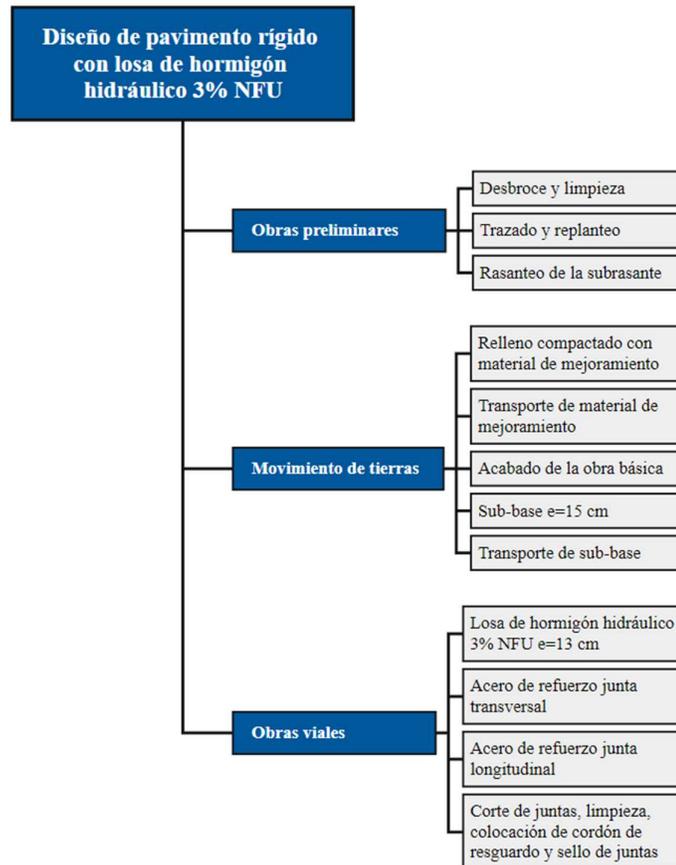
5. PRESUPUESTO

5.1 Estructura desglosada de trabajo

En esta sección se detallan los rubros relacionados al diseño del pavimento rígido con 3% de NFU para la vía "Ruta del Cacao" extensión 3.48 km. Para el desarrollo del trabajo se dividió en 3 ejes principales: obras preliminares, movimiento de tierras y obras viales, como se establece en la Figura 30.

Figura 30

Diagrama de la estructura desglosada de trabajo



5.2 Rubros y análisis de precios unitarios

La información de precios asignados para el presente análisis de precios unitarios tiene principalmente como referencia lo establecido en la versión Junio, 2024 de la "Revista de la

Cámara de Construcción de Guayaquil". A su vez, se asumirá de igual manera el 22% para costos indirectos y el 3% para otros.

5.2.1 APU 1.1: Desbroce y limpieza

La Figura 31 evidencia los rendimientos, tarifas, cantidades, costos por hora, unidad de medida del rubro, costos totales por equipos y mano de obra. El precio unitario estimado por m². para el desbroce y limpieza es de \$1.33, es importante mencionar que este valor no posee IVA.

Figura 31

Análisis de precio unitario Rubro 1.1

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
CÓDIGO	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN			
1	6/30/2024	VÍA DE CONCRETO RÍGIDO "RUTA DEL CACAO" EXTENSIÓN 3.48 KM			
CAPÍTULO	OBRAS PRELIMINARES			RUBRO	1.1
DETALLE	DESBROCE Y LIMPIEZA			UNIDAD:	m ²
FACTORES	RENDIMIENTO 1			0.005	hora/m ²
	RENDIMIENTO 2			200.00	m ² /hora
	RENDIMIENTO 3			1600.00	m ² /día
1. EQUIPOS Y MAQUINARIA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO UNITARIO D = C x R
Herramienta menor (5% M.O.)					\$ 0.01
Tractor Oruga 175 HP	2.00	\$ 75.00	\$ 150.00	0.005	\$ 0.75
Motosierra 7 HP	8.00	\$ 1.25	\$ 10.00	0.005	\$ 0.05
SUBTOTAL (M)					\$ 0.81
2. MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HORA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R
Engrasador o abastecedor responsable	2.00	\$ 4.14	\$ 8.28	0.005	\$ 0.04
OP. Tractor de oruga	2.00	\$ 4.65	\$ 9.30	0.005	\$ 0.05
Peón	8.00	\$ 4.14	\$ 33.12	0.005	\$ 0.17
SUBTOTAL (N)					\$ 0.25
3 MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	P. UNITARIO B	COSTO C = A x B	
SUBTOTAL (O)					
4. TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C = A x B	
SUBTOTAL (P)					
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA	TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				\$ 1.07
	COSTOS INDIRECTOS 22%				\$ 0.23
	OTROS INDIRECTOS 3%				\$ 0.03
	COSTO TOTAL PRESUPESTO USD.\$				\$ 1.33

5.2.2 APU 1.2: Trazado y replanteo

La Figura 32 evidencia los rendimientos, tarifas, cantidades, costos por hora, unidad de medida del rubro, costos totales por equipos, mano de obra y materiales. El precio unitario estimado por m². para el trazado y replanteo de la vía es de \$0.82, es importante mencionar que este valor no posee IVA.

Figura 32

Análisis de precio unitario Rubro 1.2

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
CÓDIGO	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN			
1	6/30/2024	VÍA DE CONCRETO RÍGIDO "RUTA DEL CACAO" EXTENSIÓN 3.48 KM			
CAPÍTULO	OBRAS PRELIMINARES			RUBRO	1.2
DETALLE	TRAZADO Y REPLANTEO			UNIDAD:	m ²
FACTORES	RENDIMIENTO 1			0.004	hora/m ²
	RENDIMIENTO 2			250.00	m ² /hora
	RENDIMIENTO 3			2000.00	m ² /día
1. EQUIPOS Y MAQUINARIA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO UNITARIO D = C x R
Herramienta menor (5% M.O.) EQ. Topográfico	3.00	\$ 4.75	\$ 14.25	0.004	\$ 0.02 \$ 0.06
SUBTOTAL (M)					\$ 0.08
2. MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HORA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R
Peón	10.00	\$ 4.14	\$ 41.40	0.004	\$ 0.17
Carpintero	5.00	\$ 4.19	\$ 20.95	0.004	\$ 0.08
Maestro mayor	2.00	\$ 4.65	\$ 9.30	0.004	\$ 0.04
Topógrafo (ESTR.OC.C1)	5.00	\$ 4.65	\$ 23.25	0.004	\$ 0.09
SUBTOTAL (N)					\$ 0.38
3 MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	P. UNITARIO B	COSTO C = A x B	
Accesorios (clavos, cuartones, piola, etc)	U	1.00	\$ 0.20	\$ 0.20	
SUBTOTAL (O)					\$ 0.20
4. TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C = A x B	
SUBTOTAL (P)					
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA	TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				\$ 0.66
	COSTOS INDIRECTOS 22%				\$ 0.14
	OTROS INDIRECTOS 3%				\$ 0.02
	COSTO TOTAL PRESUPUESTO USD.\$				\$ 0.82

5.2.3 APU 1.3: Rasanteo de la subrasante

La Figura 33 evidencia los rendimientos, tarifas, cantidades, costos por hora, unidad de medida del rubro, costos totales por equipos, mano de obra y materiales. El precio unitario estimado por m². para el rasanteo de la subrasante es de \$0.91, es importante mencionar que este valor no posee IVA.

Figura 33

Análisis de precio unitario Rubro 1.3

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
CÓDIGO	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN			
1	6/30/2024	VÍA DE CONCRETO RÍGIDO "RUTA DEL CACAO" EXTENSIÓN 3.48 KM			
CAPÍTULO	OBRAS PRELIMINARES			RUBRO	1.3
DETALLE	RASANTEO DE LA SUBRASANTE			UNIDAD:	m ²
FACTORES	RENDIMIENTO 1			0.005	hora/m ²
	RENDIMIENTO 2			200.00	m ² /hora
	RENDIMIENTO 3			1600.00	m ² /día
1. EQUIPOS Y MAQUINARIA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO UNITARIO D = C x R
Motoniveladora 135 HP	1.00	\$ 45.00	\$ 45.00	0.005	\$ 0.23
Tanquero de agua	1.00	\$ 30.00	\$ 30.00	0.005	\$ 0.15
Rodillo Vibratorio Liso 142 HP	1.00	\$ 38.00	\$ 38.00	0.005	\$ 0.19
SUBTOTAL (M)					0.565
2. MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HORA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R
OP. Motoniveladora	1.00	\$ 4.65	\$ 4.65	0.005	\$ 0.02
OP. Rodillo	1.00	\$ 4.65	\$ 4.65	0.005	\$ 0.02
Chofer de tanquero (ESTR.OC.C1)	1.00	\$ 6.08	\$ 6.08	0.005	\$ 0.03
Peón	1.00	\$ 4.14	\$ 4.14	0.005	\$ 0.02
SUBTOTAL (N)					0.098
3 MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	P. UNITARIO B	COSTO C = A x B	
Agua	m ³	0.04	\$ 1.68	\$ 0.0672	
SUBTOTAL (O)					\$ 0.0672
4. TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C = A x B	
SUBTOTAL (P)					
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA		TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)			\$ 0.73
		COSTOS INDIRECTOS 22%			\$ 0.16
		OTROS INDIRECTOS 3%			\$ 0.02
		COSTO TOTAL PRESUPESTO USD.\$			\$ 0.91

5.2.4 APU 2.1: Acabado de la obra básica

La Figura 34 evidencia los rendimientos, tarifas, cantidades, costos por hora, unidad de medida del rubro, costos totales por equipos y mano de obra. El precio unitario estimado por m² para el acabado de la obra básica es de \$0.49, es importante mencionar que este valor no posee IVA.

Figura 34

Análisis de precio unitario Rubro 2.1

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
CÓDIGO	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN			
2	6/30/2024	VÍA DE CONCRETO RÍGIDO "RUTA DEL CACAO" EXTENSIÓN 3.48 KM			
CAPÍTULO	MOVIMIENTO DE TIERRAS	RUBRO	2.1		
DETALLE	ACABADO DE LA OBRA BÁSICA	UNIDAD:	m ²		
FACTORES	RENDIMIENTO 1	0.004	hora/m ²		
	RENDIMIENTO 2	250.00	m ² /hora		
	RENDIMIENTO 3	2000.00	m ² /día		
1. EQUIPOS Y MAQUINARIA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO UNITARIO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Herramienta menor (5% M.O.)					\$ 0.003
Rodillo Vibratorio Liso 142 HP	1.00	\$ 38.00	\$ 38.00	0.004	\$ 0.15
Motoniveladora 135 HP	1.00	\$ 45.00	\$ 45.00	0.004	\$ 0.18
SUBTOTAL (M)					\$ 0.33
2. MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL/HORA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
OP. Motoniveladora	1.00	\$ 4.65	\$ 4.65	0.004	\$ 0.02
OP. Rodillo	1.00	\$ 4.65	\$ 4.65	0.004	\$ 0.02
Peón	1.00	\$ 4.14	\$ 4.14	0.004	\$ 0.02
SUBTOTAL (N)					\$ 0.05
3 MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL (O)					
4. TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL (P)					
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA	TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				\$ 0.39
	COSTOS INDIRECTOS 22%				\$ 0.09
	OTROS INDIRECTOS 3%				\$ 0.01
	COSTO TOTAL PRESUPESTO USD.\$				\$ 0.49

5.2.5 APU 2.2: Sub-base e=15 cm

La Figura 35 evidencia los rendimientos, tarifas, cantidades, costos por hora, unidad de medida del rubro, costos totales por equipos, mano de obra y materiales. El precio unitario estimado por m³. para la colocación de la sub-base es de \$14.85, es importante mencionar que este valor no posee IVA.

Figura 35

Análisis de precio unitario Rubro 2.2

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
CÓDIGO	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN				
2	6/30/2024	VÍA DE CONCRETO RÍGIDO "RUTA DEL CACAO" EXTENSIÓN 3.48 KM				
CAPÍTULO	MOVIMIENTO DE TIERRAS	RUBRO	2.2			
DETALLE	SUB-BASE e=15 cm	UNIDAD:	m ³			
FACTORES	RENDIMIENTO 1	0.025	hora/m ³			
	RENDIMIENTO 2	40.00	m ³ /hora			
	RENDIMIENTO 3	320.00	m ³ /día			
1. EQUIPOS Y MAQUINARIA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO UNITARIO D = C x R	
Herramienta menor (5% M.O.)					\$ 0.043	
Rodillo Vibratorio Liso 142 HP	1.00	\$ 38.00	\$ 38.00	0.03	\$ 0.95	
Motoniveladora 135 HP	1.00	\$ 45.00	\$ 45.00	0.03	\$ 1.13	
SUBTOTAL (M)					2.118	
2. MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HORA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R	
OP. Motoniveladora	1.00	\$ 4.65	\$ 4.65	0.025	\$ 0.12	
OP. Rodillo	1.00	\$ 4.65	\$ 4.65	0.025	\$ 0.12	
Peón	6.00	\$ 4.14	\$ 24.84	0.025	\$ 0.62	
SUBTOTAL (N)					\$ 0.85	
3 MATERIALES						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	P. UNITARIO B	COSTO C = A x B		
Material Granular (Explotación y carga)	m ³	0.875	\$ 4.50	\$ 3.94		
Material uniforme grueso triturado /sub-base)	m ³	0.375	\$ 13.25	\$ 4.97		
SUBTOTAL (O)					\$ 8.91	
4. TRANSPORTE						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C = A x B		
SUBTOTAL (P)						
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA					TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	\$ 11.88
					COSTOS INDIRECTOS 22%	\$ 2.61
					OTROS INDIRECTOS 3%	\$ 0.36
					COSTO TOTAL PRESUPESTO USD.\$	\$ 14.85

5.2.6 APU 2.3: Transporte de sub-base (35 km)

La Figura 36 evidencia los rendimientos, tarifas, cantidades, costos por hora, unidad de medida del rubro, costos totales de transporte. El precio unitario estimado por m³-km. Para el transporte de la sub-base es de \$0.20, es importante mencionar que este valor no posee IVA.

Figura 36

Análisis de precio unitario Rubro 2.3

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
CÓDIGO	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN			
2	6/30/2024	VÍA DE CONCRETO RÍGIDO "RUTA DEL CACAO" EXTENSIÓN 3.48 KM			
CAPÍTULO	MOVIMIENTO DE TIERRAS	RUBRO	2.3		
DETALLE	TRANSPORTE DE SUB-BASE	UNIDAD:	m ³ -km		
FACTORES	RENDIMIENTO 1	0.005	hora/m ³ -km		
	RENDIMIENTO 2	217.39	m ³ -km/hora		
	RENDIMIENTO 3	1739.13	m ³ -km/día		
1. EQUIPOS Y MAQUINARIA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO UNITARIO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Volqueta 8 m ³	1.00	\$ 35.00	\$ 35.00	0.005	\$ 0.16
SUBTOTAL (M)					\$ 0.16
2. MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL/HORA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
SUBTOTAL (N)					
3 MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL (O)					
4. TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL (P)					
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA	TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				\$ 0.16
	COSTOS INDIRECTOS 22%				\$ 0.04
	OTROS INDIRECTOS 3%				\$ 0.005
	COSTO TOTAL PRESUPESTO USD.\$				\$ 0.20

5.2.7 APU 3.1: Losa de hormigón hidráulico 3%NFU e=13cm

La Figura 37 evidencia los rendimientos, tarifas, cantidades, costos por hora, unidad de medida del rubro, costos totales por equipos, mano de obra y materiales. El precio unitario estimado por m³. para la construcción de la losa de hormigón hidráulico con 3% de NFU es de \$130.52, es importante mencionar que este valor no posee IVA.

Figura 37

Análisis de precio unitario Rubro 3.1

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
CÓDIGO	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN			
3	6/30/2024	VÍA DE CONCRETO RÍGIDO "RUTA DEL CACAO" EXTENSIÓN 3.48 KM			
CAPÍTULO	OBRA VIAL	RUBRO	3.1		
DETALLE	LOSA DE HORMIGÓN HIDRULICO MEZCLADO EN PLANTA e=13 cm		UNIDAD:	m ³	
FACTORES	RENDIMIENTO 1		0.081	hora/m ³	
	RENDIMIENTO 2		12.35	m ³ /hora	
	RENDIMIENTO 3		98.77	m ³ /día	
1. EQUIPOS Y MAQUINARIA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO UNITARIO D = C x R
Herramienta menor (5% M.O.)					\$ 0.17
Vibrador de manguera	1.00	\$ 5.00	\$ 5.00	0.081	\$ 0.41
Regla vibratoria	1.00	\$ 12.00	\$ 12.00	0.081	\$ 0.97
SUBTOTAL (M)					\$ 1.55
2. MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HORA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R
Peón	5.00	\$ 4.14	\$ 20.70	0.081	\$ 1.68
Maestro mayor	2.00	\$ 4.65	\$ 9.30	0.081	\$ 0.75
Albañil	2.00	\$ 4.19	\$ 8.38	0.081	\$ 0.68
Ferrero	1.00	\$ 4.19	\$ 4.19	0.081	\$ 0.34
SUBTOTAL (N)					\$ 3.45
3 MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	P. UNITARIO B	COSTO C = A x B	
Cemento HOLCIM tipo HE	kg	408.00	\$ 0.153	\$ 62.22	
Agua	kg	175.00	\$ 0.005	\$ 0.86	
Piedra #67	kg	700.0	\$ 0.017	\$ 11.78	
Piedra #78	kg	311.00	\$ 0.017	\$ 5.20	
Arena de Río	kg	845.59	\$ 0.014	\$ 11.48	
Caucho granulado (0 – 1 mm.)	kg	8.72	\$ 0.250	\$ 2.18	
Aditivo Sikaplast® 2001-R	kg	1.63	\$ 1.080	\$ 1.76	
Aditivo Sikaplast® 5012	kg	3.67	\$ 0.800	\$ 2.94	
Curador	GLN	0.15	\$ 6.600	\$ 0.99	
SUBTOTAL (O)					\$ 99.42
4. TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C = A x B	
SUBTOTAL (P)					
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA	TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				\$ 104.41
	COSTOS INDIRECTOS 22%				\$ 22.97
	OTROS INDIRECTOS 3%				\$ 3.13
	COSTO TOTAL PRESUPUESTO USD.\$				\$ 130.52

5.2.8 APU 3.2: Acero de refuerzo junta transversal

La Figura 38 evidencia los rendimientos, tarifas, cantidades, costos por hora, unidad de medida del rubro, costos totales por equipos, mano de obra y materiales. El precio unitario estimado por ml. para el acero de refuerzo de las juntas transversales es de \$19.47, es importante mencionar que este valor no posee IVA.

Figura 38

Análisis de precio unitario Rubro 3.2

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
CÓDIGO	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN			
3	6/30/2024	VÍA DE CONCRETO RÍGIDO "RUTA DEL CACAO" EXTENSIÓN 3.48 KM			
CAPÍTULO	OBRA VIAL	RUBRO	3.2		
DETALLE	ACERO DE REFUERZO JUNTA TRANSVERSAL (DOWELL)	UNIDAD:	ml		
FACTORES	RENDIMIENTO 1	0.066	hora/ml		
	RENDIMIENTO 2	15.15	ml/hora		
	RENDIMIENTO 3	121.21	ml/día		
1. EQUIPOS Y MAQUINARIA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO UNITARIO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Herramienta menor (5% M.O.)					\$ 0.03
SUBTOTAL (M)					\$ 0.03
2. MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL/HORA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Peón	1.00	\$ 4.14	\$ 4.14	0.066	\$ 0.27
Fierro	1.00	\$ 4.19	\$ 4.19	0.066	\$ 0.28
SUBTOTAL (N)					\$ 0.55
3 MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Dowel Φ 20 mm. x 350 mm. (Inc. canastilla electrosoldada)	ml	1.00	\$ 15.00	\$ 15.00	
SUBTOTAL (O)					\$ 15.00
4. TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL (P)					
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA	TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				\$ 15.58
	COSTOS INDIRECTOS 22%				\$ 3.43
	OTROS INDIRECTOS 3%				\$ 0.47
	COSTO TOTAL PRESUPUESTO USD.\$				\$ 19.47

5.2.9 APU 3.3: Acero de refuerzo junta longitudinal

La Figura 39 evidencia los rendimientos, tarifas, cantidades, costos por hora, unidad de medida del rubro, costos totales por equipos, mano de obra y materiales. El precio unitario estimado por kg. para el acero de refuerzo de las juntas longitudinales es de \$1.82, es importante mencionar que este valor no posee IVA.

Figura 39

Análisis de precio unitario Rubro 3.3

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
CÓDIGO	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN			
3	6/30/2024	VÍA DE CONCRETO RÍGIDO "RUTA DEL CACAO" EXTENSIÓN 3.48 KM			
CAPÍTULO	OBRA VIAL	RUBRO	3.3		
DETALLE	ACERO DE REFUERZO JUNTA LOGITUDINAL (VARILLA CORUGADA)	UNIDAD:	kg		
FACTORES	RENDIMIENTO 1	0.017	hora/kg		
	RENDIMIENTO 2	59.88	kg/hora		
	RENDIMIENTO 3	479.04	kg/día		
1. EQUIPOS Y MAQUINARIA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO UNITARIO D = C x R
Herramienta menor (5% M.O.)	1.00				\$ 0.01
Cortadora	1.00	\$ 1.68	\$ 1.68	0.017	\$ 0.03
SUBTOTAL (M)					\$ 0.04
2. MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HORA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R
Peón	1.00	\$ 4.14	\$ 4.14	0.017	\$ 0.07
Fierrero	1.00	\$ 4.19	\$ 4.19	0.017	\$ 0.07
SUBTOTAL (N)					0.139
3 MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	P. UNITARIO B	COSTO C = A x B	
Acero de refuerzo $f_c=4200\text{kg/cm}^2$ -14mm X 12m ANDEC (Incl. Transporte)	kg	1.05	\$ 1.22	\$ 1.28	
SUBTOTAL (O)					\$ 1.28
4. TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C = A x B	
SUBTOTAL (P)					
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA	TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				\$ 1.46
	COSTOS INDIRECTOS 22%				\$ 0.32
	OTROS INDIRECTOS 3%				\$ 0.04
	COSTO TOTAL PRESUPUESTO USD.\$				\$ 1.82

5.2.10 APU 3.4: Corte de juntas, limpieza, colocación de cordón de resguardo y sello de junta.

La Figura 40 evidencia los rendimientos, tarifas, cantidades, costos por hora, unidad de medida del rubro, costos totales por equipos, mano de obra y materiales. El precio unitario estimado por ml. para el corte, limpieza, colocación de cordón de resguardo y sello de junta. De es de \$7.70, es importante mencionar que este valor no posee IVA.

Figura 40

Análisis de precio unitario Rubro 3.4

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
CÓDIGO	FECHA DE CREACIÓN	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN				
3	6/30/2024	VÍA DE CONCRETO RÍGIDO "RUTA DEL CACAO" EXTENSIÓN 3.48 KM				
CAPÍTULO	OBRA VIAL	RUBRO	3.4			
DETALLE	CORTE DE JUNTAS, LIMPIEZA, COLOCACIÓN DE CORDÓN DE RESGUARDO Y SELLO DE JUNTA		UNIDAD:	ml		
FACTORES	RENDIMIENTO 1		0.011	hora/ml		
	RENDIMIENTO 2		93.46	ml/hora		
	RENDIMIENTO 3		747.66	ml/día		
1. EQUIPOS Y MAQUINARIA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO UNITARIO D = C x R	
Herramienta menor (5% M.O.)	1.00	\$7.50	\$ 7.50	0.011	\$0.01	
Cortadora de pavimento	1.00	\$2.38	\$ 2.38	0.011	\$0.08	
Compresor	1.00	\$5.00	\$ 5.00	0.011	\$0.03	
Hidrolavadora	1.00	\$1.20	\$ 1.20	0.011	\$0.05	
Bomba de silicona	1.00	\$1.20	\$ 1.20	0.011	\$0.01	
SUBTOTAL (M)					\$ 0.18	
2. MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HORA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R	
Peón	4.00	\$ 4.14	\$ 16.56	0.011	\$0.18	
Maestro mayor	1.00	\$ 4.65	\$ 4.65	0.011	\$0.05	
SUBTOTAL (N)					\$ 0.23	
3 MATERIALES						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	P. UNITARIO B	COSTO C = A x B		
Disco de concretor 350 mm.	U	0.003	\$ 77.28	\$0.23		
Cordón de polipropileno	m	1.00	\$ 0.55	\$0.55		
Sello Sikaflex®-401 Pavement SL	ml	1.02	\$ 4.87	\$4.97		
SUBTOTAL (O)					\$ 5.75	
4. TRANSPORTE						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C = A x B		
SUBTOTAL (P)						
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA		TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)			\$ 6.16	
		COSTOS INDIRECTOS			22%	\$ 1.36
		OTROS INDIRECTOS			3%	\$ 0.18
		COSTO TOTAL PRESUPUESTO			USD.\$	\$ 7.70

5.3 Descripción de cantidades de obra

En esta sección se establecerán la cuantificación de cantidades de cada rubro establecido en el presente proyecto. La Figura 41 presenta la cuantificación de material requerido para la construcción del proyecto.

Figura 41

Cuantificación de materiales en obra

CUANTIFICACIÓN DE MATERIAL EN OBRA			
CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTO RÍGIDO CON HORMIGÓN 3% NFU EN LA "RUTA DEL CACAO"		Fecha: 7/2/2024	
		Ubicación: Km. 46.5 vía la costa - Guayas	
		Responsable: Ing. Javier Zuña Quezada Ing. Julianny Torres Cano	
		Asunto: Construcción de pavimento rígido con hormigón 3% NUF en la vía	
CÓDIGO	RUBRO	CANTIDAD	UNIDAD
1 OBRAS PRELIMINARES			
1.1	Desbroce y limpieza	m ²	27840
1.2	Trazado y replanteo	m ²	20880
1.3	Rasanteo de la subrasante	m ²	24360
2 MOVIMIENTO DE TIERRAS			
2.1	Acabado de la obra básica	m ²	24360
2.2	Sub-base e=15 cm	m ³	3132
2.3	Transporte de sub-base (35km)	m ³ -km	109620
3 OBRAS VIALES			
3.1	Losa de hormigón hidráulico 3%NFU e=13 cm	m ³	2714.4
3.2	Acero de refuerzo junta transversal (dowel)	ml	5966
3.3	Acero de refuerzo junta logitudinal (varilla corugada)	kg	4092
3.4	Corte de juntas, limpieza, colocación de cordón de resguardo y sello de junta	ml	9446

5.3.1 Desbroce y limpieza

Se lo determinó mediante la multiplicación de la longitud del terreno de 3.48 km. y el ancho total a limpiar y desbrozar de 8m., es importante mencionar que se considera un metro por cada lado adicional al ancho de la vía, para la correcta circulación y confort en obra, obteniendo una superficie a trabajar de 27840 m².

5.3.2 Trazado y replanteo

Para determinar el área de la vía a trazar y replantear se procede a multiplicar la longitud de la carretera de 3.48 km. y el ancho de 6 m., obteniendo un total de 20880 m².

5.3.3 Rasanteo de la subrasante

Para el cálculo de la superficie de rasanteo se considera en cada lado 0.5 m. adicional al ancho de la vía, obteniendo el resultado mediante la multiplicación de la longitud de 3.48 km. por el ancho total de 7 m., resultando un área de 24360 m².

5.3.4 Acabado de la obra básica

Este rubro considera el acabado de la subrasante, para la posterior colocación de la sub-base, la superficie a considerar es de 7 m. de ancho por la longitud de la vía 3.48 km., obteniendo 24360m².

5.3.5 Sub-base e=15cm

Para realizar el cálculo de la cantidad de material granulado para la sub-base, se multiplicó su espesor de 15cm. por la longitud 3.48 km. por 6 m. de ancho de la vía, derivando un volumen total 3132 m³.

5.3.6 Transporte de sub-base (35km)

Para este rubro se considera la distancia de donde se extrae el material importado (35 km.), en multiplicación con el volumen de sub-base 3132m³. A transportar, obteniendo 109620 m³-km.

5.3.7 Losa de hormigón hidráulico e=13cm

El volumen de losa para la conformación del pavimento rígido viene dado por la multiplicación del espesor de capa de rodadura 0.13 m. por longitud 3.48 km. por el ancho 6 m. de la carretera, requiriendo un total de 2714.4 m³.

5.3.8 Acero de refuerzo junta transversal (Dowells)

Para el cálculo de este rubro se considera la longitud total de la vía que es de 3.48 km. dividida para la longitud de un paño de 3.50 m., obteniendo un total de 994.28 secciones transversales, considerando que el ancho total de la junta transversal de la vía es de 6m. se necesitan 5966 ml. de dowells, para reforzar en su totalidad las juntas de transferencia.

5.3.9 Acero de refuerzo junta longitudinal (varilla corrugada)

De acuerdo con los cálculos previamente realizados, se requieren 5 barras de acero de 14mm. x 80cm. por sección longitudinal de paño, dividiendo la longitud total de la vía 3.48km. para la longitud de un paño de losa de 3.5m., se tiene un total de 995 paños. A su vez, considerando que se requieren 5 aceros de refuerzo por cada uno de estos, se obtiene un total de 4975 barras. Además, tomando en cuenta que cada refuerzo tiene una longitud de 80cm, se requiere un total de 3980 m. de varilla.

Para el cálculo final, se utilizan las varillas de acero [Adelca](#), con características $f_c=4200\text{kg/cm}^2$ - $\phi 14\text{mm}$ x 12 m. con un peso de 1.028 kg/m, determinando mediante la multiplicación del peso y total de metros de varilla a necesitar, se requiere un total de 4092 kg. de acero de refuerzo.

5.3.10 Corte de juntas, limpieza, colocación de cordón de resguardo y sello de junta

Corte longitudinal: La vía está compuesta de dos carriles, teniendo una única junta longitudinal entre paño de losa, por lo que, se considera 3480 ml. de corte para juntas longitudinales.

Corte transversal: Para determinar este apartado, se considera la longitud total de la vía 3.48 km. dividido para la longitud de un paño de 3.50 m., teniendo un total de 994.28 juntas, a su vez, tomando en cuenta que el ancho de vía es 6m., se obtiene como producto de estas un total de 5966 ml. de corte transversal.

La cantidad de metro lineales a cortar son 9446 ml., dados por la sumatoria del corte longitudinal y transversal.

5.4 Valoración integral del costo del proyecto

El presupuesto para la construcción de pavimento rígido con hormigón hidráulico 3% de NFU tiene un costo total de \$813.558,51. Esta cifra se la determinó en base a las tareas establecidas y de acuerdo con el alcance del proyecto. En la Figura 42 se observa de manera detallada las cantidades, unidades, precios unitarios y costo total por actividad consideradas para dicho cálculo.

Figura 42

Presupuesto total del proyecto: Pavimento rígido con hormigón 3% de NFU

PRESUPUESTO DE OBRA					
Fecha: 7/2/2024					
Ubicación: Km. 46.5 vía la costa - Guayas					
Responsable: Ing. Javier Zuña Quezada					
Ing. Julianny Torres Cano					
Asunto: Construcción de pavimento rígido con hormigón 3% NUF en la vía "Ruta del Cacao", extensión 3.48 km.					
CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTO RÍGIDO CON HORMIGÓN 3% NFU EN LA "RUTA DEL CACAO"					
CÓDIGO	DETALLE	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIOS UNITARIOS	COSTO TOTAL
1	OBRAS PRELIMINARES				\$ 76,435.94
1.1	Desbroce y limpieza	m ²	27840	\$1.33	\$ 37,102.89
1.2	Trazado y replanteo	m ²	20880	\$0.82	\$ 17,110.64
1.3	Rasanteo de la subrasante	m ²	24360	\$0.91	\$ 22,222.41
2	MOVIMIENTO DE TIERRAS				\$ 80,389.39
2.1	Acabado de la obra básica	m ²	24360	\$0.49	\$ 11,828.24
2.2	Sub-base e=15 cm	m ³	3132	\$14.85	\$ 46,500.12
2.3	Transporte de sub-base (35km)	m ³ -km	109620	\$0.20	\$ 22,061.03
3	OBRA VIAL				\$ 550,616.86
3.1	Losa de hormigón hidráulico 3%NFU e=13 cm	m ³	2714.4	\$130.52	\$ 354,277.06
3.2	Acero de refuerzo junta transversal (dowel)	ml	5966	\$19.47	\$ 116,167.48
3.3	Acero de refuerzo junta logitudinal (varilla corugada)	kg	4092	\$1.82	\$ 7,442.95
3.4	Corte de juntas, limpieza, colocación de cordón de resguardo y sello de junta	ml	9446	\$7.70	\$ 72,729.36
Subtotal sin IVA					\$ 707,442.18
IVA 15%					\$ 106,116.33
TOTAL PRESUPUESTADO					\$ 813,558.51

A continuación, se desarrolla una cuantificación monetaria por metro cúbico de hormigón, realizando una comparación entre el hormigón 3% NFU utilizado en el proyecto, respecto a un hormigón convencional (dosificación patrón), con la finalidad de optimizar costos o mejoras.

La Figura 43, presenta a detalle los costos por metro cúbico de hormigón con 3% NFU incorporado, teniendo un valor de \$98.43.

Figura 43

Costo por metro cúbico de la dosificación 3% NFU

DOSIFICACIÓN 1 M³ - 3%NFU				
Hormigón MR 4.46 MPa				
Materiales	Masa	Unidades	P. Unitario	Costo total
	Kg	[Kg/m³]	[\$/Kg]	
Cemento HOLCIM tipo HE	408.00	2990	\$ 0.153	\$ 62.220
Agua	175.00	1000	\$ 0.005	\$ 0.863
Piedra #67	700.00	2920	\$ 0.017	\$ 11.784
Piedra #78	311.00	2900	\$ 0.017	\$ 5.200
Arena de Rio	845.59	2636	\$ 0.014	\$ 11.483
Caucho granulado (0 – 1 mm.)	8.72	913	\$ 0.250	\$ 2.180
Aditivo Sikaplast® 2001-R	1.63	1200	\$ 1.080	\$ 1.760
Aditivo Sikaplast® 5012	3.67	1200	\$ 0.800	\$ 2.936
PRECIO FINAL				\$ 98.43

La Figura 44, presenta a detalle los costos por metro cúbico de hormigón convencional (dosificación patrón), teniendo un valor de \$96.36.

Figura 44

Costo por metro cúbico de la dosificación patrón

DOSIFICACIÓN 1 M³ - PATRON				
Hormigón MR 4.30 MPa				
Materiales	Masa	Unidades	P. Unitario	Costo total
	Kg	[Kg/m³]	[\$/Kg]	
Cemento HOLCIM tipo HE	408.00	2990	\$ 0.153	\$ 62.220
Agua	175.00	1000	\$ 0.005	\$ 0.863
Piedra #67	700.00	2920	\$ 0.017	\$ 11.784
Piedra #78	311.00	2900	\$ 0.017	\$ 5.200
Arena de Rio	854.00	2636	\$ 0.014	\$ 11.597
Aditivo Sikaplast® 2001-R	1.63	1200	\$ 1.080	\$ 1.760
Aditivo Sikaplast® 5012	3.67	1200	\$ 0.800	\$ 2.936
PRECIO FINAL				\$ 96.36

Antes de realizar la comparación, se procede a calcular el espesor de losa necesario para la dosificación patrón, la cual cuenta con un módulo de ruptura de 4.30 MPa., para la

determinación de su espesor, se tomarán en cuenta las mismas características, consideraciones y condiciones de tráfico del diseño 3% NFU, obteniendo un espesor de losa de 14 cm. (véase Figura 45). El aumento de la capa de rodadura se debe a que el hormigón convencional posee un menor módulo de ruptura en comparación al diseño propuesto en el proyecto.

Figura 45

Diseño de la losa en el pavimento utilizando la AASHTO 93

Nota: Extraído de Software de Ingeniería elemental.

Realizando un análisis exhaustivo de los precios y de cada una de las consideraciones de la Figura 46, se determina que, si bien el precio del hormigón con 3% de NFU es \$2.07 más costoso, su módulo de ruptura es mayor, lo cual ayuda a la disminución de espesor de la losa. Esto permite reducir 1 cm el espesor de la capa de rodadura con respecto al diseño patrón (14cm). Por lo tanto, el precio total del diseño patrón, considerando su aumento de volumen de construcción, es de \$281,681.70. Al compararlo con el diseño implementado con 3% de NFU, se genera un ahorro para el presente proyecto de \$14,512,74.

Figura 46

Comparación entre el precio final de la dosificación patrón y 3% de NFU

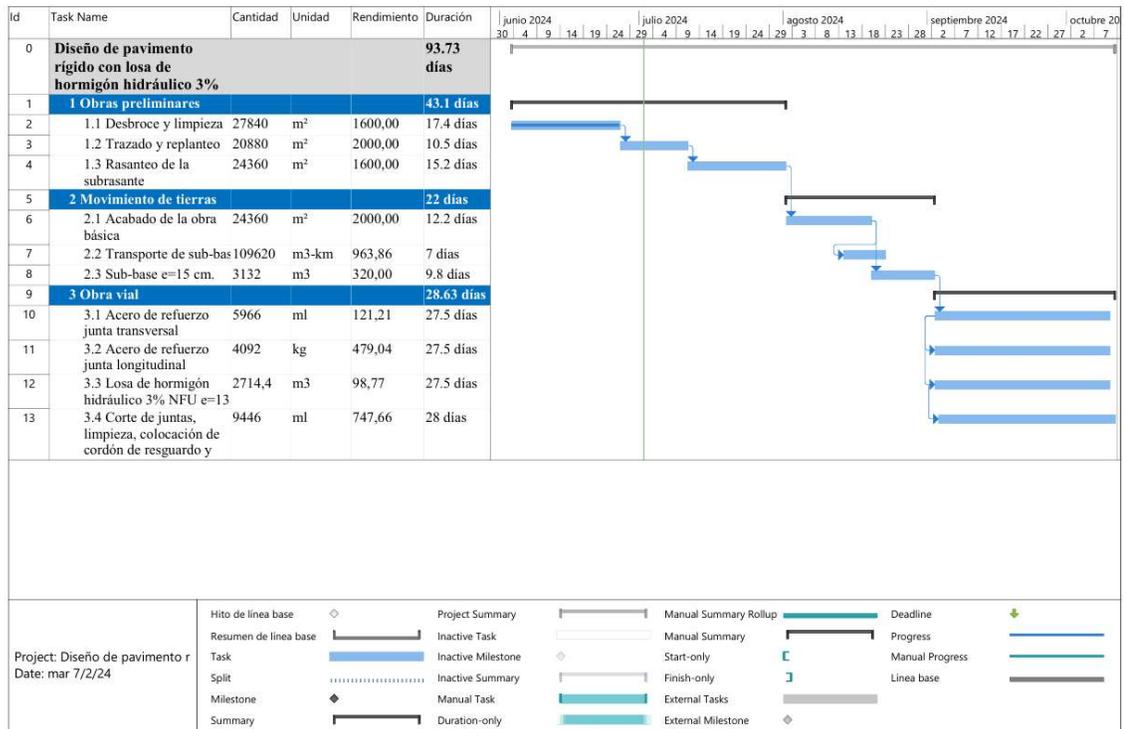
Dosificación	MR [Mpa]	Espesor losa [cm]	Volumen de construcción [m ³]	Precio hormigón [m ³]	Precio total losa	Ahorro
PATRÓN	4.3	14	2923.2	\$ 96.36	\$ 281,681.70	\$ 14,512.74
3% NFU	4.46	13	2714.4	\$ 98.43	\$ 267,168.96	

5.5 Cronograma de obra

La Figura 47 muestra el cronograma basado en las actividades preestablecidas para la construcción del pavimento rígido con losa de hormigón hidráulico con 3% de NFU, el cual presenta una duración de 94 días laborables para la finalización de la obra. La primera columna contiene los nombres de cada tarea, con casillas destacadas de color azul y sus respectivas subtareas con casillas de color blanco. La segunda columna contiene las cantidades calculadas para cada uno de los rubros, la tercera especifica las unidades de dichas cantidades, la cuarta presenta el rendimiento en unidad/día, y, por último, se muestra la duración de cada actividad, con su respectiva fecha de inicio.

Figura 47

Cronograma de actividades para la construcción del pavimento con 3% de NFU



Capítulo 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En este proyecto se llevó a cabo el diseño de un pavimento rígido para una carretera de IV orden, ubicado en la “Ruta del Cacao”, provincia del Guayas, Ecuador. Su diseño se basó en la incorporación óptima de 3% de caucho de llantas recicladas en reemplazo del agregado fino en la mezcla de hormigón hidráulico de la capa de rodadura, proporcionando una solución sostenible, con un impacto ambiental positivo y salvaguardando las propiedades mecánicas del pavimento.

En primera instancia, se evaluó la integración del NFU, a través de reemplazo de masa directo o considerando las densidades de los materiales (Ecuación 2.1), esto se lo realizó mediante la comparación de las propiedades mecánicas de especímenes con diseños de reemplazo de 3 y 5% de caucho reciclado, ensayados a edades de 1 y 3 días, dando como resultado un mejor desempeño las probetas que consideran las densidades de los materiales.

Con el método de reemplazo establecido, se elaboró la fundición de especímenes cilíndricos de ocho dosificaciones diferentes, partiendo desde el diseño patrón, y con porcentajes de reemplazo del 3, 5, 7, 10, 20, 50 y 100% de NFU. En esta ocasión, el desempeño mecánico se lo valoró mediante la resistencia a la compresión a los 28 días, dando como resultado 55.27 MPa para la dosificación patrón, 54.91 MPa para la 3% de NFU y 53.05 MPa para la de 5% de NFU, estas tres de resistencias similares y buen desempeño mecánico, en contraste, los resultados a partir de la dosificación con 7% de NFU las resistencias decrecen en un 42.86%, incrementando este porcentaje a medida que la sustitución de NFU aumenta. Con la evaluación de las propiedades mecánicas de las dosificaciones previamente mencionadas, y su respectiva valoración mediante Escala de Likert, se determinó el porcentaje óptimo de reemplazo, siendo la sustitución del 3% de NFU la alternativa elegida para el diseño del pavimento rígido.

Seguidamente, se elaboró la última fundición de especímenes en masa, con la finalidad de comparar condiciones de sostenibilidad y propiedades mecánicas mediante ensayos destructivos

y no destructivos entre la dosificación patrón y el porcentaje óptimo de reemplazo 3% de NFU. Los resultados experimentales fueron alentadores para la presente investigación, resultando una resistencia a la compresión a los 28 días de 39.40 MPa y 32.73 MPa para la dosificación patrón y 3% de NFU respectivamente, representando una disminución de resistencia del 16.93%.

Por otro lado, mediante los resultados presentados se evidencia un aumento en la resistencia a los esfuerzos de flexión, propiedad directamente relacionada con el espesor de la capa de rodadura, dando como resultado 4.46 MPa para la dosificación seleccionada, 0.16 MPa más que la dosificación patrón, concluyendo que la incorporación de caucho de llantas recicladas en la mezcla de la losa del pavimento de manera óptima mejora la capacidad de carga, incrementa la durabilidad y prolonga su vida útil, bajo iguales condiciones de tráfico.

Adicionalmente, con los resultados de permeabilidad al aire del hormigón presentados en la Tabla 19, la dosificación de 3% de NFU posee una calidad “muy buena”, de igual manera, bajo los ensayos de ultrasonido, se define a la dosificación seleccionada como “Buena”, ya que, sus velocidades de onda se encuentran en el rango de 3660 m/s a 4575 m/s.

Con lo que respecta al diseño del pavimento, utilizando la metodología de la AASHTO 93 se obtuvo un espesor de losa del pavimento y subbase granular de 13 cm y 15 cm. respectivamente (vease Figura 7), evidenciando la reducción de 1cm. en el espesor de la capa de rodadura respecto al pavimento convencional con dosificación patrón (14 cm.).

Realizando un análisis exhaustivo de los precios por m³ de hormigón, se obtuvo un valor de \$98.43 para el hormigón con 3% de NFU, \$2.07 más costoso que el hormigón patrón, sin embargo, tomando en consideración la reducción que existe en el espesor de losa del pavimento, este genera un ahorro de \$14.512 ,74 del costo total del proyecto, cuyo valor es de \$813.558,51.

A partir del análisis de impacto ambiental, se identificaron impactos con un nivel de significancia alto, entre estos: la contaminación del embalse Chongón por mala disposición de residuos, emisiones de gases de efecto invernador por la mezcla y realización de la losa del

pavimento, entre otros, mientras que, la utilización de NFU en reemplazo de árido fino se la identificó como un impacto benéfico. Además, el presente proyecto logra reducir las emisiones del 7.18% de CO₂ (92.82 Kg CO₂ -Eq) al ambiente. Finalmente, la fase constructiva del pavimento con 3% de NFU tendrá una duración de 94 días laborales.

6.2 Recomendaciones

Entre las recomendaciones sería beneficioso realizar la comparación y diseño del pavimento para la dosificación con 5% de reemplazo de NFU, la cual presenta valores y propiedades similares a las evidenciadas en el presente proyecto, logrando contribuir de manera más significativa a la sostenibilidad, manteniendo las propiedades de capacidad de carga del pavimento.

Una vez definido el o los porcentajes de reemplazo de NFU a comparar con la dosificación patrón, para la obtención definitiva de las propiedades mecánicas a utilizar para el diseño del pavimento, es aconsejable realizar una misma fundición en masa para todas las dosificaciones a evaluar, esto quiere decir, la realización de todos los especímenes bajo condiciones iguales de temperatura, clima y estado de los materiales, esto garantizará resultados con mayor significancia, realidad y con un menor sesgo o dispersión al obtener los valores de las propiedades mecánicas de las dosificaciones mediante los respectivos ensayos de laboratorio.

Se recomienda llevar un control exhaustivo de la calidad del hormigón al momento de la realización de especímenes, esto evitará la obtención de falsos resultados durante los ensayos destructivos y no destructivos del hormigón, a su vez, se deberá mantener las condiciones óptimas de temperatura y humedad del curado, permitiéndole al hormigón alcanzar sus máximas resistencias y durabilidad.

Se propone evaluar la implementación de caucho de llantas recicladas con un granulado de tamaño máximo nominal diferente al utilizado en este proyecto, con el fin de determinar las

ventajas o desventajas causadas por la variabilidad de sus tamaños en las propiedades mecánicas y de calidad del hormigón.

Como queda en evidencia, no es beneficio utilizar reemplazos de NFU superiores al 5%, por lo que se recomienda realizar estudios más a profundidad una vez excedido el porcentaje mencionado.

Se sugiere que en la fase constructiva del proyecto se tome un alto nivel de importancia a los impactos ambientales identificados, a su vez, implementar las medidas de mitigación para cada una de estas, logrando salvaguardar la integridad ambiental de la zona.

REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for design of pavement structures, 1993* (Vol. 1). The Association.

<https://habib00ugm.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/05/aashto1993.pdf>

American Concrete Institute. (2019). *ACI CODE-318-19(22): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*.

https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U19&Language=English&Units=US_Units

American Concrete Pavement Association. (2006). *Design of Concrete Pavements for Streets and Roads*. <https://cf.specifyconcrete.org/doc/Design-of-Concrete-Pavement-for-Streets.pdf>

American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM C138/C138M-23 Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*.

Recuperado el 5 de agosto de 2024, de https://www.astm.org/c0138_c0138m-23.html

American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C496/C496M-17 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.

https://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-17

American Society for Testing and Materials. (2007). *ASTM D6690—Designación:*

Especificación estándar para Selladores de juntas y grietas (Versión D6690 – 07).

<https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-especializado-en-computacion-y-administracion-gauss-jordan-ac/fisica-moderna/d6690-astm/62994142>

American Society for Testing and Materials. (2009). *ASTM C78-09: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*.

<https://doi.org/10.1520/C0078-09>

- American Society for Testing and Materials. (2012). *ASTM C143/C143M-12 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-12
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C172/C172M-17 Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete*. https://doi.org/10.1520/C0172_C0172M-17
- American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C805/C805M-18 Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. https://doi.org/10.1520/C0805_C0805M-18
- American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C136/C136M-19 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- American Society for Testing and Materials. (2022a). *ASTM C597-22 Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete*. <https://www.astm.org/c0597-22.html>
- American Society for Testing and Materials. (2022b). *ASTM C1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. <https://doi.org/10.1520/C1202-22>
- American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM C1064/C1064M-23 Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete*. https://doi.org/10.1520/C1064_C1064M-23
- American Society for Testing and Materials. (2024a). *ASTM C31/C31M-23 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. https://doi.org/10.1520/C0031_C0031M-23
- American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM C192 "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory"*.
doi:10.1520/C0192_C0192M-15

American Society for Testing and Materials. (2024b). *ASTM C39/C39M: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.

https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-24

Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. (2018). *Anuario 2018*.

<https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2019/03/Anuario%202018.pdf>

Bucheli Pérez, D. J., & Sarmiento Segovia, H. J. (2021). *Estabilización suelo—Cemento para una carretera de IV orden “Ruta del Cacao”—Guayas*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Bucheli-Pérez, D., Sarmiento-Segovia, H., & García Troncoso, N. (2021, septiembre 8).

Stabilised Base with Soil-Cement for Unpaved Roads “Ruta Del Cacao” (Guayas, Ecuador). <https://doi.org/10.11159/icsect22.110>

Calo, D., Marcolini, E., & Souza, E. (2014). *Manual de diseño y construcción de Pavimentos de Hormigón*. <https://icpa.org.ar/wp-content/uploads/2019/04/MDCPH.pdf>

Cámara de la Construcción de Guayaquil. (2024). *Revistas Digital Construcción y Desarrollo*.

<https://camaraconstrucciongye.org/revista-digital/>

Chiquito Ortega, P. (2019). *Estudios de factibilidad y diseños definitivos de la vía Laurel-*

Junquillal con una longitud de 10,30 km. En el Cantón Salitre de la Provincia del Guayas (p. 19).

https://www.academia.edu/35191104/estudios_de_factibilidad_y_dise%cc3%91os_definitivos_de_la_via_laurel_junquillal_con_una_longitud_de_10_30_km_en_el_canton_salitre_de_la_provincia_del_guayas

Consultora Oro Azul CÍA. LTDA. (2022). *Construcción, operación, mantenimiento, cierre y abandono de las actividades de almacenamiento, venta y comercialización de combustibles líquidos (derivados de los hidrocarburos) al parque automotor de la estación de servicio “Cerecita”* (Estudio de Impacto Ambiental MAAE-SUIA-RA-DZDG-2022-00397; p. 558).

Korolkov, D., Mordvinov, A., & Trebukhin, A. (2020). Determination of the density of concrete by ultrasonic velocity. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1001(1), 012088. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012088>

Dirección de Ambiente - M. I. Municipalidad de Guayaquil. (2020). *Memoria de la biodiversidad de Guayaquil* (1a ed.). <https://www.guayaquil.gob.ec/wp-content/uploads/2021/01/2020-Memoria-Biodiversidad-Guayaquil.pdf>

Dirección de Obras del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Manta. (2013). *Construcción de pavimento rígido $e=0.15m.$, pavimento asfáltico 2" y acera $e=0.07$ en calles S/N tras cancha de usos múltiples y primera transversal, barrio Bellavista de la parroquia Tarqui* (COTO-GADMANTA-39-13). <https://www.compraspublicas.gob.ec/ProcesoContratacion/compras/PC/informacionProcesoContratacion2.cpe?idSoliCompra=zxWhVr7wixaZbCwXhcvcf8FzspEWn9SfQtf8zXQu2g>

2

Dirección de Obras Públicas del cantón Quevedo Provincia los Ríos. (2020). *Construcción de la repotenciación UE Nicolás Infante Díaz en la parroquia San Camilo Cantón Quevedo Provincia de los Ríos* (p. 653). <https://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/12/ESPECIFICACIONES-TECNICAS-CONSOLIDADAS-NID.pdf>

European Standard. (2001). *Testing Hardened Concrete—Part 2: Making and Curing Specimens for Strength Tests.T* (EN 12390-2). <https://nazhco.com/wp-content/uploads/2020/09/nazhco-12390-2-33256787.pdf>

Flores Tandaypán, O. M., & Valverde Rodríguez, G. S. (2019). *Análisis comparativo entre el diseño del pavimento rígido y pavimento flexible para mejoramiento del camino vecinal, desvío de markahuamachuco—Sanagorán—Provincia de Sánchez Carrión—La libertad*

[Universidad Privada Antenor Orrego].

<https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/5891>

García-Troncoso, N., Acosta-Calderón, S., Flores-Rada, J., Baykara, H., Cornejo, M. H., Riofrio, A., & Vargas-Moreno, K. (2023). Effects of Recycled Rubber Particles Incorporated as Partial Sand Replacement on Fresh and Hardened Properties of Cement-Based Concrete: Mechanical, Microstructural and Life Cycle Analyses. *Materials*, 16(1), Article 1.

<https://doi.org/10.3390/ma16010063>

Google Earth. (2024). *Mapa Mundial*. Google Earth. <https://www.google.com/intl/es/earth/>

Grosek, J., Chupik, V., Brezina, I., & Stryk, J. (2017). *Importance of dowels in transversal joints in concrete pavements*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/236/1/012032>

Holcim Ecuador. (2022). *Environmental Product Declaration for cement produced by Holcim Ecuador at their plant in Guayaquil, Ecuador*.

https://www.labelingsustainability.com/_files/ugd/5fea69_f96c0c4460624f87ac0d2bce92bc4da4.pdf

Hossain, Md. U., Poon, C. S., Lo, I. M. C., & Cheng, J. C. P. (2016). Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 67–77.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009>

IdealAlambrec BEKAERT. (2023). *Soluciones para la construcción*.

<https://idealalambrec.bekaert.com/content/dam/bekaert-idealalambrec/catalogos/soluciones-para-la-construccion-v02-baja.pdf>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011a). *INEN 2380-2 Requisitos de Desempeño para Cementos Hidráulicos* (Versión 2). [https://es.scribd.com/document/649128282/NORMA-](https://es.scribd.com/document/649128282/NORMA-2380-2-Requisitos-de-Desempeno)

[2380-2-Requisitos-de-Desempeno](https://es.scribd.com/document/649128282/NORMA-2380-2-Requisitos-de-Desempeno)

- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011b). *NTE INEN 2554: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (Utilizando una viga simple con carga en los tercios)*.
<https://archive.org/details/ec.nte.2554.2011/page/n3/mode/2up?view=theater>
- Instituto Nacional de meteorología e hidrología INAMHI. (2013). *Anuario Meteorológico* (53–2013; p. 165).
- Instituto Nacional de Pesca del Ecuador. (2019). *Aspectos biológicos y pesqueros de las principales especies capturadas en el Embalse Chongón, durante 2019*.
<https://www.institutopesca.gob.ec/wp-content/uploads/2019/05/INFORME-CHONGON-2019.pdf>
- Ivanchev, I. (2022). Investigation with Non-Destructive and Destructive Methods for Assessment of Concrete Compressive Strength. *Applied Sciences*, 12(23), Article 23.
<https://doi.org/10.3390/app122312172>
- Luna, S. M. M. (2007). Manual Práctico Para El Diseño De La Escala Likert. *Xihmai*, 2(4), Article 4. <https://doi.org/10.37646/xihmai.v2i4.101>
- Mbereyaho, L., Manzi, L., & Nizeyimana, B. (2020). Use and Influence of Tire Rubber Waste Powder in Bitumen Product. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 11(2), 82–88. <https://doi.org/10.2478/jepm-2021-0009>
- M.I. Municipalidad de Guayaquil. (2016). *Plan especial del Recinto Cerecita de la parroquia rural Juan Gómez Rendón del cantón Guayaquil*. <https://www.guayaquil.gob.ec/wp-content/uploads/Documentos/Ordenes%20Dia/Periodo-2014-2019/2016/%C3%93rdenes%20del%20d%C3%ADa%20mes%20de%20Mayo%202016/2016-05-26%20Orden%20del%20d%C3%ADa%20sesi%C3%B3n%20ordinaria/2016-05-26%20Punto%207.pdf>

Ministerio de Energías y Minas del Ecuador. (2022). *Informe del Factor de emisión de CO2 del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador*. <https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/wp-1692720103183.pdf>

Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2012). *Manual de construcción de pavimentos rígidos—Tomo 2*. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/LOTAIP2015_tomo_2_normas.pdf

Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2013). *Volumen N°2-LIBRO A Norma para estudios y diseños viales (Vol. 2)*. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_2A.pdf

Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2018). *Ley Orgánica del Sistema Nacional de Infraestructura Vial del Transporte Terrestre*.

https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/09/lotaip_8_reglamento-ley-organica-sistema-infraestructura-vial-del-transporte.pdf

Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador y obras públicas. (2016). *Tabla nacional de pesos y dimensiones*.

https://www.aduana.gob.ec/archivos/Boletines/tabla_nacional_de_pesos_y_dimensiones.pdf

Ministerios de obras públicas y comunicaciones del Ecuador. (2002). *MOP - 001-F 2002:*

Generales para la Construcción de Caminos y Puentes. (p. 772).

https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf

Monsalve, E. T. (2020). *Efecto de la incorporación de caucho reciclado en el comportamiento del concreto para un pavimento rígido* [Universidad César Vallejo].

https://www.academia.edu/79139367/Efecto_de_la_incorporaci%C3%B3n_de_caucho_reciclado_en_el_comportamiento_del_concreto_para_un_pavimento_r%C3%ADgido

Pandey, D., Agrawal, M., & Pandey, J. S. (2011). Carbon footprint: Current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 178(1), 135–160.

<https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>

Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2024). *Pavement Design and Materials* (2a ed.). John Wiley & Sons.

Peñaloza Lopez, V., & Cisneros Razo, M. (2022). Análisis económico de productos a partir de reciclados. Caso: Recicladora verde neumático: Economic analysis of products from recycled. Case: green pneumatic recycler. *RES NON VERBA REVISTA CIENTÍFICA*, 12(1),

Article 1. <https://doi.org/10.21855/resnonverba.v12i1.618>

Revuelta, M. B. (2008). Los recursos minerales y los materiales de construcción. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16(3), 248–255.

Othman, R., Putra Jaya, R., Muthusamy, K., Sulaiman, M., Duraisamy, Y., Abdullah, M. M. A. B., Przybył, A., Sochacki, W., Skrzypczak, T., & Vizureanu, P. (2021). Relation between Density and Compressive Strength of Foamed Concrete. *Materials*, 14, 2967.

<https://doi.org/10.3390/ma14112967>

Rubber Pavements Association. (s/f). *Rubber Pavements Association – Asphalt Rubber Technologies Engineered to Perform*. Recuperado el 8 de junio de 2024, de

<https://rubberpavements.org/RPA/>

Setyawan, A., Kusdiantoro, I., & Syafi'i. (2015). The Effect of Pavement Condition on Vehicle Speeds and Motor Vehicles Emissions. *Procedia Engineering*, 125, 424–430.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.111>

- SIKA USA. (2023). *Environmental Product Declarations (EPDs)*.
<https://usa.sika.com/en/construction/concrete/resource-center/concrete-sustainability/environmental-product-declarations--epds-.html>
- Silva, L. S., Mouta, J. de R., Barata da Costa, M. C., & Gomes Gouvêa, L. (2019). Concreto com borracha de recauchutagem de pneu para uso em pavimentação de baixo tráfego. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24(2), 14. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0676>
- Tasalloti, A., Chiaro, G., Murali, A., & Banasiak, L. (2021). Physical and Mechanical Properties of Granulated Rubber Mixed with Granular Soils—A Literature Review. *Sustainability*, 13(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/su13084309>
- Tileuberdi, Y., Ongarbayev, Y., & Mansurov, Z. (2015). *Physical and Mechanical Characteristics of Rubber-Bitumen Compounds*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1843.6960>
- Tito, B. (2020). *Cómo hace una Matriz de Leopold modificada en Excel*.
<https://ingenieriaambiental.net/matriz-de-leopold/>
- Tobalina, D. (2022). *Mapa de puntos de muestreo de calidad del aire* [Map].
https://www.guayaquil.gob.ec/wp-content/uploads/documentos/participacion%20social/decreto%20ejecutivo%20n%20c%20b0%20754/operacion,%20mantenimiento,%20cierre%20y%20o%20abandono%20de%20la%20estacion%20de%20servicio%20cercita/anexo%206_cartografia/m19%20puntos%20de%20muestreo%20de%20calidad%20de%20aire.pdf
- TORRENT, R. J. (1998). Un método rápido y no-destructivo para medir la permeabilidad al aire del hormigón. *Materiales de construcción*, 49(254), 51–56.
- Unión Europea. (2023). *Menos emisiones de CO2 en la industria del cemento*. CORDIS - Resultados de investigaciones de la UE. <https://cordis.europa.eu/article/id/406925-lower-co2-emissions-on-the-horizon-for-cement/es>

Vélez Moreira, E. J., & Alonso Aenlle, A. (2022). Análisis del hormigón hidráulico aplicando polvo de neumáticos reciclado para el uso en pavimentos rígidos. *Polo del Conocimiento*, 7(9), Article 9. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i9.4709>

Weather Spark. (2023). *The Weather Year-Round Anywhere on Earth*. <https://weatherspark.com/>

Yanqui Miranda, L. F. (2021). *Análisis del impacto del tráfico vehicular sobre las emisiones contaminantes* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16039>

Zapata Ferrero, I., Rivera, J., & Botasso, G. (2021). Análisis del ciclo de vida en pavimentos: Actualidad y perspectiva. *Ingenio Tecnológico*, 3. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2662024009/>

Zuraida, S., Dewancker, B., & Margono, R. B. (2023). Application of non-degradable waste as building material for low-cost housing. *Scientific Reports*, 13(1), 6390. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32981-y>

ANEXOS

Figura 48

Caucho de llanta reciclada: granulado TMN 1 mm.



Figura 49

Mezcla de hormigón con 3% de NFU



Figura 50

Control de calidad del hormigón: Asentamiento



Figura 51

Control de calidad del hormigón: Densidad en estado fresco



Figura 52

Especímenes cilíndricos codificados, edad 1 día



Figura 53

Vigas, edad 1 día



Figura 54

Fundición en masa en concretera de 1m³



Figura 55

Fundición de cubos 15x15x15 cm. y vigas 15x15x50 cm.



Figura 56

Registro de resistencia de ensayos realizados

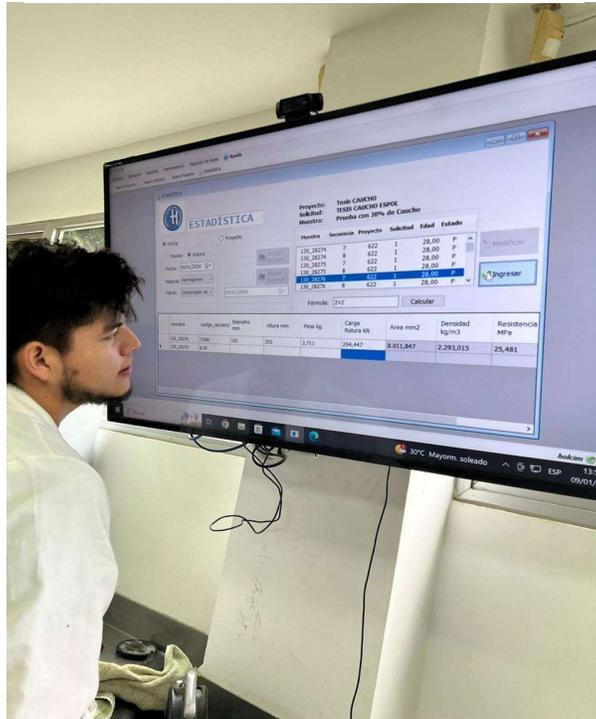


Figura 57

Ensayo de resistencia a la compresión



Figura 58

Ensayo de Ultrasonido



Figura 59

Preparación de cilindro para ensayo de ultrasonido



Figura 60

Aparato de medición de la permeabilidad al aire del hormigón TORRENT



Figura 61

Ensayo de la permeabilidad al aire del hormigón TORRENT



Figura 62

Ensayo de resistencia a la flexión



Figura 63

Ensayo de Tracción Indirecta



Figura 64

Ensayo de resistencia mediante esclerómetro dosificación patrón



Figura 65

Ensayo de resistencia mediante esclerómetro dosificación 3% de NFU



Pavimentando el futuro: Diseño de pavimento rígido utilizando llantas recicladas en una carretera de IV orden en la Ruta del Cacao – Guayas.

PROBLEMA

La inadecuada disposición final de los neumáticos fuera de uso (NFU), en conjunto con la carencia de infraestructura vial de la “Ruta del Cacao”, ubicada en la provincia del Guayas, promueve el diseño de un pavimento rígido basado en la incorporación de NFU como reemplazo parcial del árido fino en la capa de rodadura, surgiendo como una solución sostenible e innovadora, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de llantas recicladas en pavimentos de hormigón, mediante el desarrollo de un diseño de pavimento que incorpore llantas recicladas de manera óptima.

PROPUESTA

MATERIALES Y MÉTODO

- Obtención del caucho: TMN 1mm.
- Agregados ASTM-C 136 y cemento NTE INEN 2380.
- Reemplazo de arena por volumen o densidad (Zuraida et al., 2023).

$$m_w = \frac{\rho_w}{\rho_{fa}} * m_{fa}$$

Fase 1

DOSIFICACIONES PRELIMINARES

Fase 2

- Fundición de especímenes preliminares: 3 y 5% de NFU, ensayos a edad de 1 y 3 días.
- Selección método de reemplazo.

DOSIFICACIONES DEFINITIVAS

- Fundición de especímenes: patrón, 3, 5, 7, 10, 20, 50 y 100% de reemplazo de NFU.
- Ensayos destructivos: 3,7,14,28 días.
- Selección dosificación óptima.

Fase 3

DOSIFICACIÓN ÓPTIMA

Fase 4

- Fundición en masa especímenes patrón y 3%.
- Ensayos destructivos y no destructivos: 3,7,14,28 días.
- Diseño del pavimento

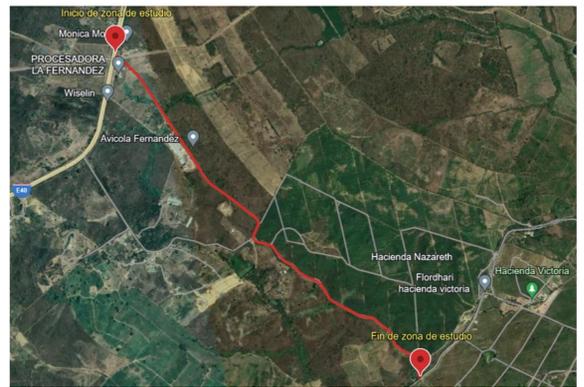


Figura 1. Vía “Ruta del Cacao”, longitud 3.48 Km.

RESULTADOS

Curva de resistencias a la compresión de los modelos de estudio

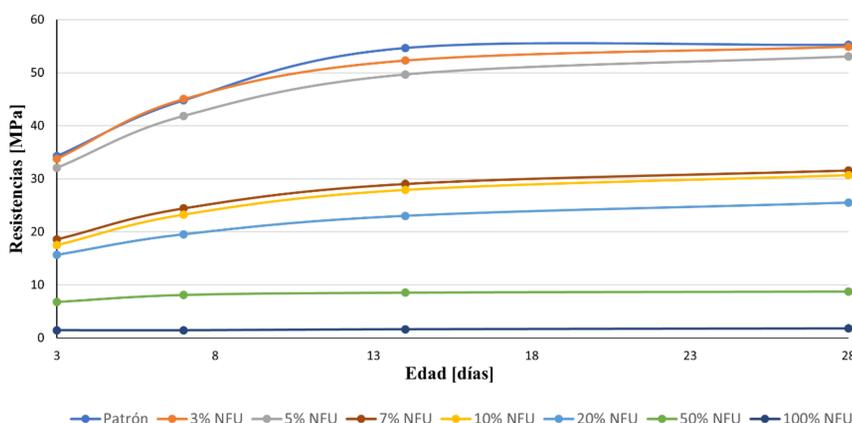


Figura 2. Resultados ensayos a la compresión, Fase 3

Resultados de ensayos a 28 días		
Ensayos	Patrón	3% de NFU
Resistencia a la compresión [MPa]	39.39	32.73
TCD [MPa]	4.31	3.82
Módulo de rotura [MPa]	4.30	4.46
Ultrasonido [m/s]	4426.5	4345
Permeabilidad al aire del hormigón Kt [10 ⁻¹⁶ m ²]	0.069	0.033
Promedio de rebotes Esclerómetro	31	26

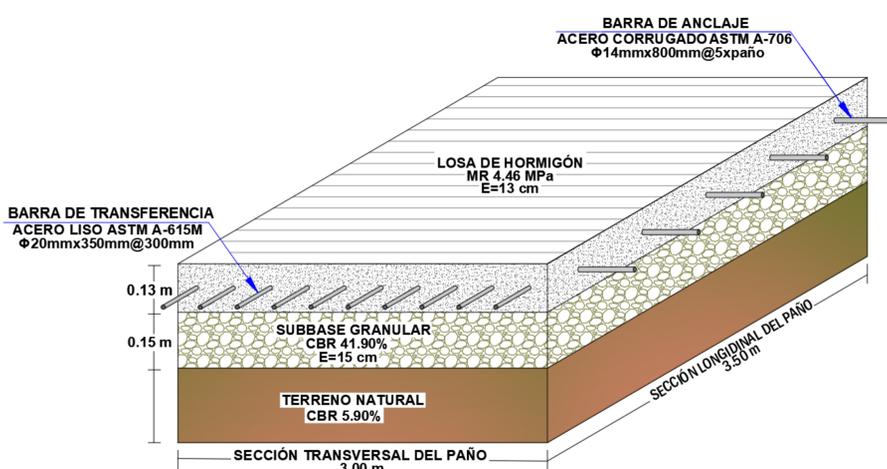


Figura 3. Diseño definitivo del pavimento

Duración del proyecto: 98 días

Precio m3 de hormigón 3% NFU: \$98,43

Presupuesto \$813.558,51

CONCLUSIONES

- La mezcla con **3%** de reemplazo de NFU es la **dosificación óptima** para mantener la durabilidad, sostenibilidad y propiedades mecánicas del pavimento.
- Reduce el **7.18%** (92.82 Kg CO₂ -Eq) de emisiones de CO₂ al ambiente.
- Se genera un ahorro de **\$14.512,74** del costo total del proyecto, realizando una comparativa con el precio por m³ del hormigón patrón, cuyo precio es **\$96.36**.
- La implementación de NFU mejora la resistencia a la flexión, logrando reducir la capa de rodadura en **1 cm.**, en comparación a un hormigón convencional, bajo mismas condiciones de tráfico.

