Optimization Model For Road Structures

Autores

Jairo David Vásquez Vargas[1], Yudy Patricia Medina Sánchez[2], Carlos Eugenio Sánchez Mendieta[3], Leyden Oswaldo Carrión Romero[4].

[1]Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, jairo_v10@hotmail.com
[2]Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Pasaje, ymedina@utmachala.edu.ec
[3]Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, csanchez@utmachala.edu.ec
[4]Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, locarrion@utmachala.edu.ec

RESUMEN

Las carreteras de la Provincia de El Oro presentan deficiencias en su estructura, lo que conlleva a una mejora para un mayor tiempo de vida y reducción en costos de construcción. Por ello se desarrolló un modelo de optimización de espesores de pavimento, estabilizando la subrasante con cemento para mejorar las propiedades mecánicas del suelo y la resistencia a las condiciones climáticas en las vías. El método utilizado consta de dos partes: El análisis y diseño con el método ASSTHO 93 y el análisis del método analítico por fatiga y deformación. El método propone una condición inicial mediante el cálculo de espesores en base al Método ASSHTO 93. Posteriormente se realiza las simulaciones donde se analizan los valores de fatiga y deformación, los cuales indican la falla de la capa de rodadura y deformación vertical admisible de la subrasante. En este proceso se realizaron varias iteraciones, en base a los espesores obtenidos con la subrasante mejorada hasta obtener deformaciones admisibles dentro de los rangos permitidos. Como resultado se aplicó el modelo de optimización en el caso de estudio de la vía Chilla - Quera de 15 km, obteniendo un CBR de 2,7% y un tráfico con un ESAL's de 86078 ejes equivalentes. El modelo obtuvo características mínimas con un espesor de carpeta asfáltica que deberá ser mayor a 9 cm y Mr de 3000 MPa, una base entre 10 y 15 cm, con un Mr entre 195 y 365 MPa, una subbase mayor a 20 cm con un Mr mayor a 120 MPa y una base suelo-cemento de 15 cm de Mr mayor a 1000 MPa.

Palabras claves: *cemento hidráulico, estabilización de suelos, optimización de estructuras viales, pavimentos flexibles, suelo - cemento.*

ABSTRACT

The roads of the Province of El Oro present deficiencies in their structure, which leads to an improvement for a longer life time and reduction in construction costs. For this reason, a pavement thickness optimization model was developed, stabilizing the subgrade with cement to improve the mechanical properties of the soil and the resistance to weather conditions on the roads. The method used consists of two parts: the analysis and design with the ASSTHO 93 method and the analysis of the analytical method for fatigue and deformation. The method proposes an initial condition by calculating thicknesses based on the ASSHTO 93 Method. Subsequently, simulations are carried out where the fatigue and deformation values are analyzed, which indicate the failure of the wearing course and allowable vertical deformation of the subgrade. . In this process several iterations were carried out, based on the thicknesses obtained with the improved subgrade until obtaining admissible deformations within the allowed ranges. As a result, the optimization model was applied in the case study of the Chilla - Quera road of 15 km, obtaining a CBR of 2.7% and a traffic with an ESAL's of 86078 equivalent axes. The model obtained minimum characteristics with a thickness of asphalt layer that must be greater than 9 cm and Mr of 3000 MPa, a base between 10 and 15 cm, with a Mr between 195 and 365 MPa, a subbase greater than 20 cm with a Mr greater than 120 MPa and a soil-cement base of 15 cm of Mr greater than 1000 MPa.

Keywords*: hydraulic cement, soil stabilization, optimization of road structures, flexible pavements, soil - cement.*

Nota Editorial: Recibido: Diciembre 2022 Aceptado: Marzo 2023

1. INTRODUCCIÓN

Mantener una vía en condiciones óptimas parte de un buen diseño y planificación, el cual deberá otorgar seguridad y mantener un costo de operación óptimo acorde al tipo y funcionalidad de la vía. El estudio de las vías se realiza muchas veces debido a que las estructuras viales no cumplen con los requisitos mínimos de construcción, además existen sobredimensionamientos en los espesores de la estructura, todo esto conlleva a que se reduzca la vida útil del proyecto y aumenten los costos de construcción y/o mantenimiento. Por ello diseñar un modelo de optimización será de gran importancia para cumplir con los aspectos mínimos de construcción y así reducir las posibles fallas por malos diseños [1].

En las carreteras de segundo orden de la Provincia de El Oro existe un déficit muy alto con el recubrimiento y mejoramiento de las vías en el sector rural, además de la falta de canteras que doten de materiales adecuados para la producción de agregados como subbase, base, etc. Esto crea una necesidad imperiosa de aplicar la técnica de estabilización de suelos naturales con cemento, para mejorar las condiciones mecánicas del mismo, ahorrando transporte de materiales, explotación de canteras y teniendo como una alternativa más económica y amigable con el ecosistema. Esto lleva a cuestionar la manera en la que influye la estabilización de suelo con cemento en la optimización de espesores en los costos de construcción.

La presente investigación es de gran importancia debido a que el estudio de optimización de los espesores de pavimentos es de utilidad para los GAD's municipales y/o Gobiernos Provinciales en la planificación de vías de segundo orden.

Se define como suelo estabilizado con cemento, al producto elaborado a partir de la mezcla de suelos finos y/o granulares, con cemento y agua, la cual se compacta y se cura para formar un nuevo material con mejores propiedades mecánicas, que garantizan la durabilidad necesaria para satisfacer grandes periodos de diseño. Una estabilización del suelo se realiza para aumentar su durabilidad y resistencia, a fin de evitar desgastes prematuros, la estabilización con cemento es muy utilizada sobre todo en suelo arcillosos, se debe tener mucho cuidado con las cantidades empleadas, ya que un exceso puede dar paso a la aparición de grietas en donde el agua podrá penetrar fácilmente en él produciéndose daños prematuros [2], [3].

En Ecuador existen varias vías donde se han utilizado bases estabilizadas y luego de muchos años de operación no presentan fallas por fatiga tan comunes. Algunas de ellas son las vías en la ciudadela Velasco Ibarra de Machala, vía al PAN desde el Puente Alterno Norte hasta la vía Durán–Yaguachi y la ampliación de la vía de 10 carriles de ingreso a Durán, la vía Nazón Playa de Fátima del cantón Biblian o la vía Santa Isabel, reflejando ahorros significativos para la entidad ejecutora. La infraestructura vial juega un papel muy importante gracias a su conexión con diferentes regiones del país sean lejanas o cercanas. Debido a esto es importante tener un correcto mantenimiento de la estructura vial que ayude a reducir los costos de operación. Dicho de otra manera, la infraestructura vial es fundamental para el desarrollo de una ciudad y/o país, una red de infraestructura vial en excelente estado permitirá una integración no solo con la nación, región o ciudad, sino también con países cercanos contribuyendo aún más a la economía de sus habitantes, puesto que la infraestructura vial permite acceso a mercados internacionales. Es importante mencionar que las vías terrestres influyen en los procesos de producción, distribución y consumo de mercancías [4].

Las vías en mal estado disminuyen la calidad de servicio de las mismas, a consecuencia de ello se presentan un aumento en los costos de transporte y sobre todo afecta en la seguridad vial. Una evaluación de la condición del pavimento constante, ayudara a intervenir oportunamente sobre las fallas presentes. Una evaluación oportuna de la condición de una vía es fundamental para mantener la infraestructura vial en óptimas condiciones, a fin de brindar al usuario comodidad, rapidez, seguridad y cuidar su economía. Los pavimentos presentan deterioros típicos, por ello se hace necesario buscar criterios y procedimientos para cuantificar y reparar los daños pues, el deterioro de la vía repercute negativamente en el confort de los usuarios [5].

1. 1. Alcances Y Objetivos

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, en base a la Constitución del 2008 elaboró un plan estratégico para el mejoramiento y excelencia en cuanto a planificación, diseño, construcción y mantenimiento de proyectos viales. Con el objetivo de realizar revisión, actualización y complementación de normas específicas técnicas del sector de transporte vial para contribuir con el buen desarrollo nacional [6]. Por ello el objetivo del estudio fue desarrollar un modelo de optimización de espesores de pavimento partiendo de la estabilización de suelos con cemento en estructuras viales que mejoren las propiedades mecánicas del suelo y la resistencia a las condiciones climáticas de vías de segundo orden. La investigación se realizó en la vía Chilla – Quera de 15 km, perteneciente al Cantón Zaruma de la Provincia de El Oro evaluando las estructuras viales mediante criterios de optimización de espesores del pavimento que permitan la reducción de los costos de construcción en vías de segundo orden.

2. METODOLOGÍA

De acuerdo a las necesidades de este trabajo, se emplean métodos de investigación teóricos como la revisión de artículos científicos, tesis, estudios, normativas y métodos de campo donde se realizó la toma de muestra de suelos existentes para ser analizados y realizar los ensayos pertinentes, además de la obtención de datos necesarios para los diseños requeridos por el método ASSHTO 93.

Con los datos recopilados se procedió a la descripción de la información acuerdo a las variables propuestas en la investigación que fueron relacionadas con los trabajos de tipo documental y de campo, determinando los resultados que servirán para concluir con el trabajo de investigación. Posterior al análisis se concluye con la alternativa más económica para el diseño de espesores utilizando un mejoramiento de suelo con la utilización del cemento como estabilizador para vías de segundo orden.

Para proceder con el diseño de pavimentos mediante AASTHO 93 se obtienen valores de serviciabilidad, desviación standard y confiabilidad a través de rangos establecidos por el mismo método. Además del módulo resiliente (Mr) el cual parte del CBR de la subrasante, sub-base y base. Oro valor obtenido es el coeficiente de drenaje delimitado por rangos, finalmente se realiza el cálculo de espesor estructural del pavimento que se determinan por medio de ábacos en los que encontraremos las variables ya obtenidas. Los cálculos indicarán espesores mínimos donde el colocar capas de un espesor menores al requerido no es práctico ni económico. El espesor de una capa tiene gran efecto en la base y sub-base ya que reduce la entrada de agua en la estructura del pavimento.

El resultado del diseño se tomará como condición inicial, y se procede con el método analítico mediante el uso de software que obtiene los valores de fatiga y deformación de cada capa. Estos cálculos se realizarán a medida que cambien los espesores propuestos, además de la implementación de estabilización de suelos los cuales demuestran que los aglutinantes poliméricos modifican los suelos de la subrasante, lo que da como resultado propiedades de ingeniería más favorables como mayor resistencia a la compresión y demuestran aún más los beneficios de usar suelos estabilizados para mejorar el desempeño del pavimento [7].

2.1. Modelo operativo

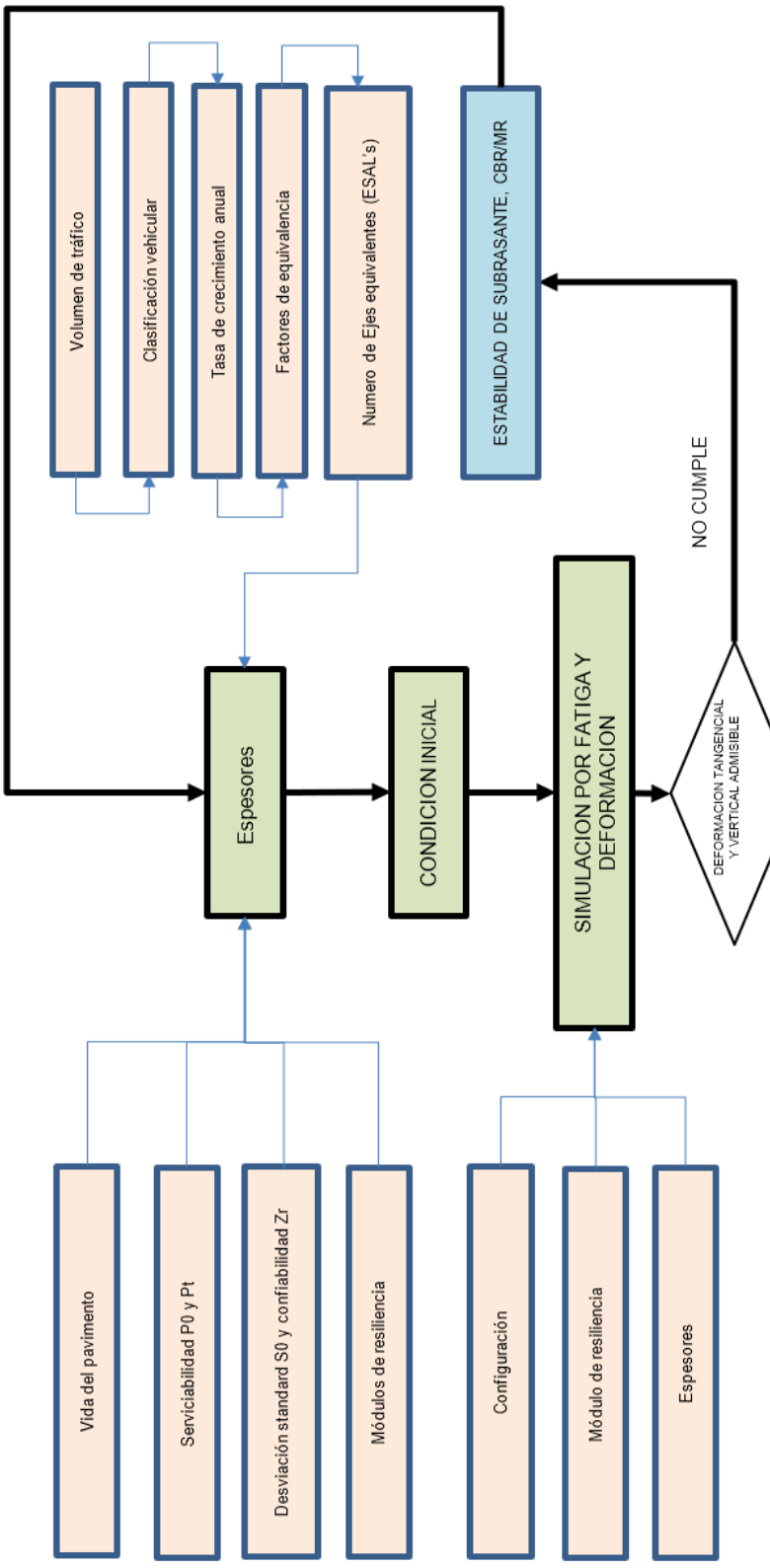


Figura 1 *Modelo de optimización de estructuras viales*

3. RESULTADOS

3. 1. Espesor Estructural Del Pavimento

Se realizó el cálculo de los espesores de las capas de pavimento mediante el método AASTHO 1993. Para facilitar el cálculo de los espesores de la estructura de pavimento se optó por el uso de un programa de diseño, el cual requiere datos de campo tales como: número de ejes equivalentes, servicialidad, confiabilidad, coeficientes de drenaje y módulos de elasticidad, para finalizar con el número estructural y los espesores mínimos.

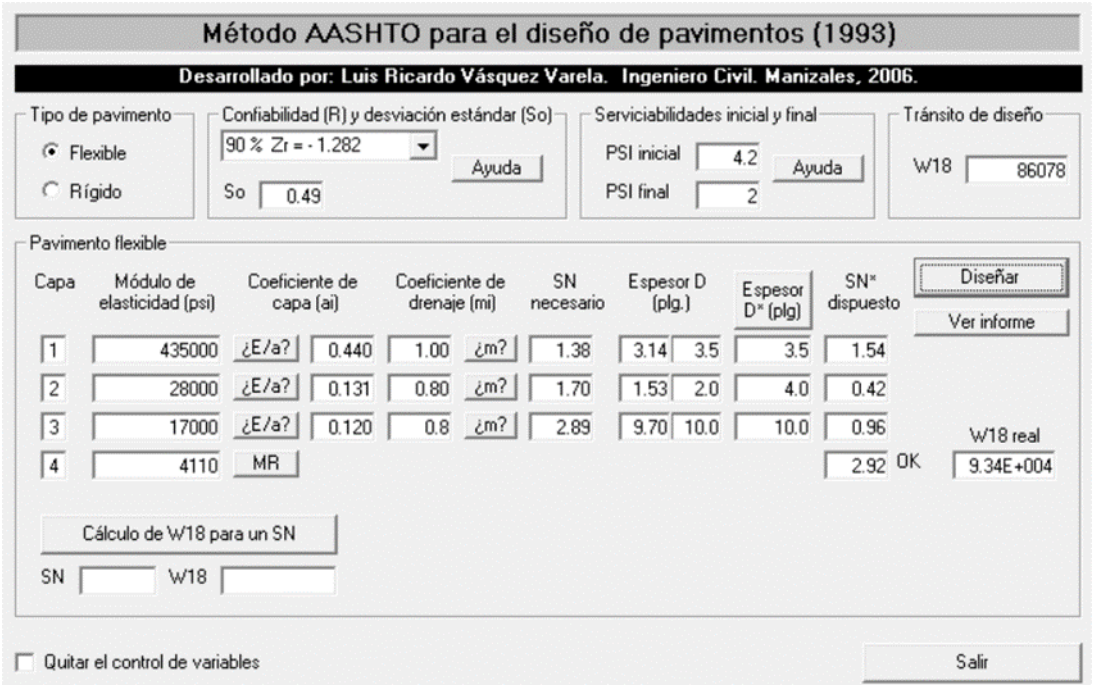


***Figura 2**: Cálculo de espesores*

Es así que con el método AASHTO se diseñó la estructura del pavimento obteniendo los espesores que servirán como condición inicial en el modelo.

***Tabla 2**: Espesores de condición inicial calculados*

CAPA	ESPESOR (PLG)
	CONDICION INICIAL
CARPETA ASFALTICA	3,5
BASE	4
SUB-BASE	10

A continuación, se obtuvieron los valores de deformación utilizando el programa ALIZE, el cual mediante los espesores y módulos de resiliencia permiten simular el comportamiento de la estructura frente a una carga de diseño. El programa se basa en el cálculo analítico de la resistencia mediante el módulo de elasticidad medido en superficie, el cual utiliza los métodos de placa de carga estática y dinámica en modelos multicapa. En esta investigación se utilizó el modelo de carga estática.

Para el cálculo de las deformaciones del estado inicial se ingresaron los datos de entrada, los cuales son los espesores de la condición inicial, junto al módulo de resiliencia de cada material como se observa a continuación:

Basis structure

	thick. (m)	modulus (MPa)	Nu	material type
bonded	0.088	3000	0.35	other
bonded	0.10	193	0.35	other
bonded	0.26	117	0.35	other
	infinite	28	0.35	other

Figura 3: *Datos de ingreso en ALIZE*

Una vez realizada la simulación se obtienen los valores de deformación y esfuerzo tangencial, además de la deformación y esfuerzo vertical de cada capa (figura 4).

C:\...\...\DEFORMACIONES\DEF.dat

thick. (m)	modulus (MPa)	Poisson coefficient	Zcalcul (m)	EpsT (µdef)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdef)	SigmaZ (MPa)
0.088	3000.0	0.350	0.000	-1.9	0.422	-186.7	0.720
	bonded		0.088	-371.3	-1.496	388.9	0.193
0.100	193.0	0.350	0.088	-371.3	-0.002	972.0	0.193
	bonded		0.188	-401.4	-0.058	648.9	0.091
0.260	117.0	0.350	0.188	-401.4	-0.017	840.6	0.091
	bonded		0.448	-429.9	-0.058	553.1	0.027
infinite	28.0	0.350	0.448	-429.9	-0.003	1006.2	0.027

Figura 4: *Deformaciones condición inicial*

En los resultados se obtiene como deformación tangencial dentro de la capa de asfalto un valor de -371,3, el cual mediante el cálculo de fatiga indica un tráfico admisible de 36 598 ejes, siendo inferior al tráfico de diseño lo que revela que la carpeta asfáltica fallará antes de lo calculado. En cuanto a la deformación vertical en la capa de la subrasante se tiene un valor de 1000 μdef, de acuerdo a las fórmulas estipuladas en Orobio & Gil, 2015; se calcula que la deformación vertical admisible es de 1373 μdef, el cual está muy cerca de lo obtenido en la estructura.

Este proceso se repitió con las iteraciones realizadas en los diseños, obteniendo los resultados de la tabla 3.

Tabla 3: *Valores de fatiga y deformación*

FATIGA		DEFORMACION	
TRAFICO ADMISIBLE		DEFORMACIÓN VERTICAL DE SUBRASANTE	
36598	FALLA	1006	OK
55901	OK	439	OK
115764	OK	411	OK
133037	OK	406	OK
168127	OK	399	OK

3. 2. Modelo Optimizado

Para la estabilidad del suelo, se estableció que la mezcla de suelo estabilizado con cemento tipo SC3 con módulo resiliente de 1000 MPa será el óptimo para el diseño, con un espesor de 15 cm. En la tabla 4 se muestran los datos del mejoramiento aplicado al suelo natural con un CBR de 2.7%.

Tabla 4: *Material de mejoramiento*

SUELO NATURAL		MEJORAMIENTO			
CBR (%)	CBR (MPa)	MODULO RESILIENTE MEJORAMIENTO (MPa)	ESPESOR (m)	DEFLECCION (mm/100)	NUEVO MODULO RESILIENTE (MPa)
2.7	28	0	0	470	28.0
		1000	0.15	152	86.78

Tabla 5: *Características del Modelo optimizado*

CARACTERISTICAS MINIMAS		
CBR	$< 2.7\%$	
ESAL's (W18= 8.2 ton)	$50000\ A\ 170000$	
CAPA	ESPESOR	MÓDULO DE ELASTICIDAD
CAPA DE RODADURA	$e >= 9\ cm\ (3.5plg)$	$E > 3000\ MPa$
BASE	$15cm > e >= 10\ cm$	$365\ Mpa > E >= 195\ MPa$
SUB-BASE	$e >= 20\ cm$	$E >= 120\ MPa$
BASE ESTABILIZADA (SUELO CEMENTO)	$e = 15\ cm$	$E = 1000\ MPa$

En la figura 5 se muestra como quedan las capas y las características que tendrán para este tipo de tráfico.

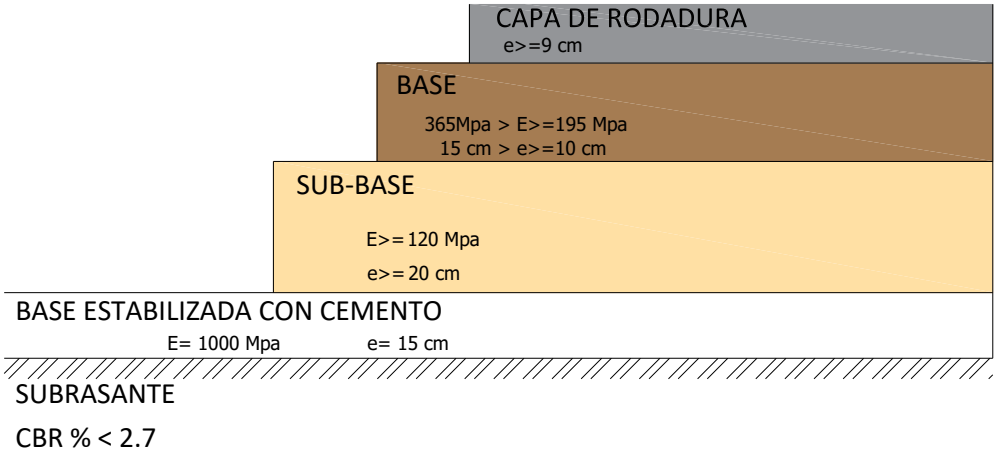


Figura 5: *Modelo optimizado*

Con los resultados obtenidos se establece una relación matemática mediante la correlación entre el número de ejes equivalentes y la deformación tangencial provocada en la capa de rodadura como indica la gráfica de la figura 6 y la correlación entre el número de ejes equivalentes y la deformación vertical provocada en la subrasante como se muestra en la ilustración 7.

Con estas relaciones podemos indicar que nos encontramos dentro del rango admisible con un valor de $1373\ \mu def$, según el artículo de Orobio & Gil [8]. Por lo tanto, los diseños de pavimentos optimizados estarán debajo de las correlaciones determinadas en las gráficas de las figuras 6 y 7, como se describen a continuación:

Con la línea de tendencia de la relación $ESAL's - Deformación\ tangencial$ se obtiene la ecuación (1)

$$EpsT\ (10^{-6}) = 6442.7 ESAL's^{^{-0.272}} \quad (1)$$

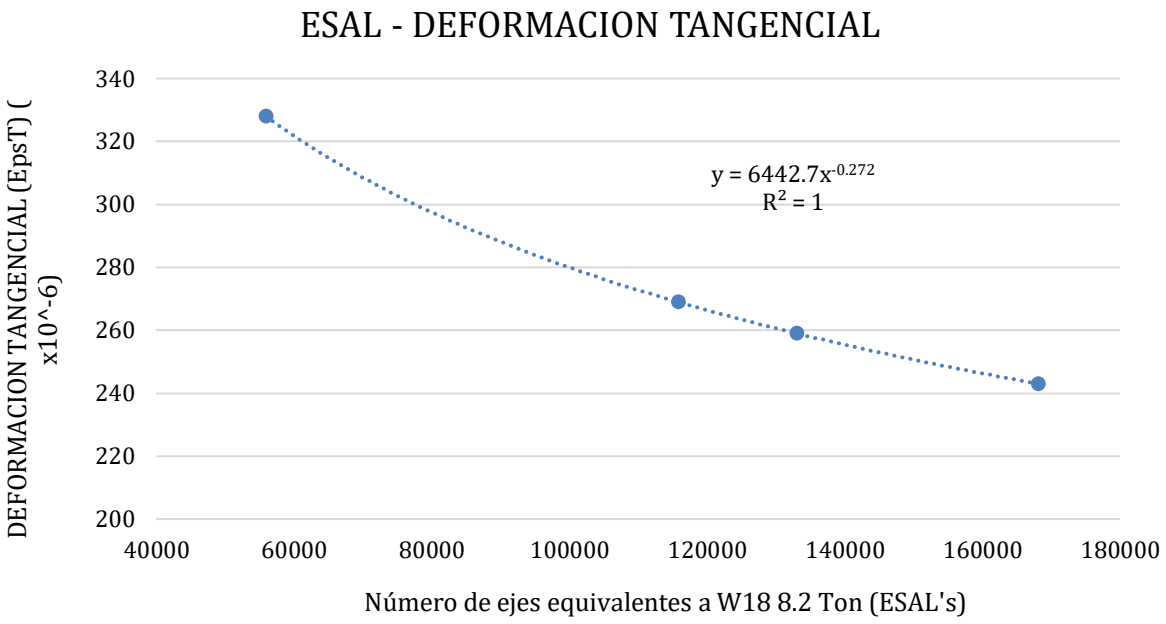


Figura 6: *Gráfica ESAL's – Deformación Tangencial*

Para la relación: $ESAL's\ -\ Deformacion\ vertical$ de la línea de tendencia se obtiene la Ecuación (2)

$$EpsZ\ (10^{-6}) =\ 1145.6ESAL's^{\ -0.088} \qquad (2)$$

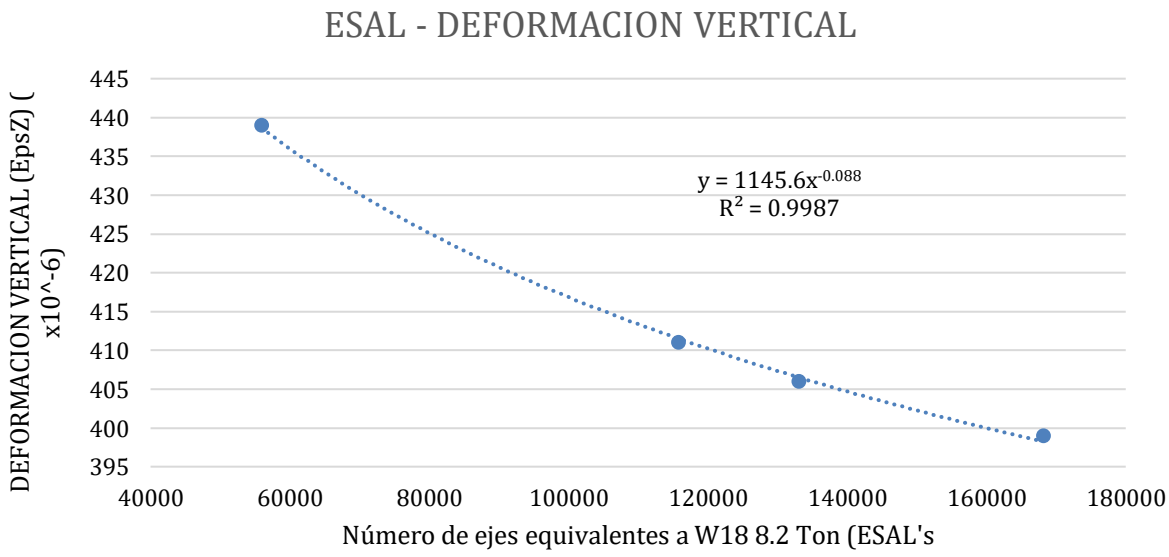
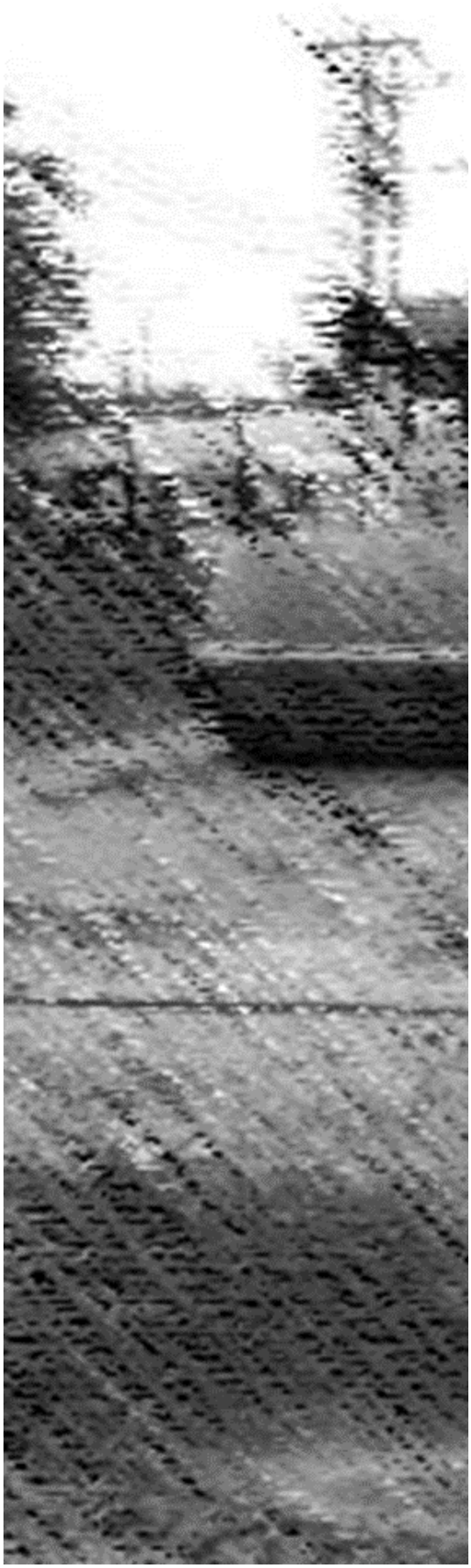


Figura 7: *Gráfica ESAL's – Deformación Vertical*

4. CONCLUSIONES



Se obtuvieron los fundamentos teóricos y relacionados a la optimización de los espesores de pavimentos en estructuras viales, donde se encontraron diversos criterios como el mantenimiento, la mezcla de materiales para la estabilización de suelos, la aplicación de normas internacionales en el diseño, entre otros, los cuales sirvieron como base para la elaboración del modelo que permita la reducción de los costos de construcción. Se propone un modelo de optimización de estructuras viales como el observado en la figura 1 para el estudio de caso de la vía Chilla-Quera, el cual es de gran importancia debido a que por la condición actual de la vía deberá ser intervenida en los próximos años.

Se analizaron los espesores de pavimento mediante criterios de evaluación como fueron los cálculos de fatiga y deformación, donde se establecen rangos máximos admisibles, los cuales mediante la configuración correcta de espesores y módulos de resiliencia permitirá una reducción de los costos de construcción.

Se obtuvieron valores de falla de la capa de rodadura y deformación vertical admisible de la subrasante mediante el programa ALIZE, que emplea un enfoque empírico – mecanicista, permitiendo agilizar, simplificar el proceso de cálculo y optimizar el diseño de la estructura.

Con estos resultados se propone un modelo de optimización con las características de la tabla 5, donde indica que la capa de rodadura será de espesor mayor a 9 cm, la base entre 10 y 15 cm, y la subbase mayor a 20 cm, con una capa estabilizada de suelo-cemento de 15 cm.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. K. A. Monsalve Tabares, A. C. Rodríguez Villamizar, F. J. Torrado Barreto, and J. E. Vergara Cala, “Patologías de la estructura vial del pavimento rígido,” *Revista formación estratégica*, p. 542, 2022.
2. F. Quevedo, M. Ávila, and C. Calle, “Análisis de costos entre estabilización suelo cemento y el mantenimiento periódico de vías rurales en la Provincia del Cañar - Dialnet,” *DIALNET*, Cañar, 2021. Accessed: Jul. 26, 2022. [Online]. Available: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8231656
3. J. T. Corral, “Ciencia y Sociedad,” 2008, Accessed: Oct. 02, 2022. [Online]. Available: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87012672003
4. López, E. Campo; Parra, and A. Montañez, “Análisis comparativo de la infraestructura vial entre Colombia y Ecuador en el siglo XXI Comparative analysis of road infrastructure between Colombia and Ecuador in the 21st century Contenido,” *Revista Espacios*, vol. 40, p. 42, 2019.
5. N. X. Ríos Cotazo, B. Bacca Cortés, E. Caicedo Bravo, and A. Orobio Quiñónez, “Revisión de métodos para la clasificación de fallas superficiales en pavimentos flexibles,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 30, no. 2, pp. 109–127, Dec. 2020, doi: 10.18359/RCIN.4385.
6. MTOP, “VOLUMEN Nº 2: NORMA PARA ESTUDIOS Y DISEÑOS VIALES,” Quito, 2013.
7. S. R. Iyengar, E. Masad, A. K. Rodriguez, H. S. Bazzi, D. Little, and H. J. M. Hanley, “Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization and Performance,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 4, pp. 472–483, Aug. 2012, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000612.
8. A. Orobio and J. Gil, “Análisis de costos de construcción asociados al diseño racional de pavimentos con diferentes modelos de fatiga,” *Revista ingeniería de construcción*, vol. 30, no. 3, pp. 177–188, Dec. 2015, doi: 10.4067/S0718-50732015000300003.