

# Espesores De Mejoramiento Para Incrementar La Resistencia De Subrasantes En Pavimentos Flexibles De Carreteras

## Improvement Thicknesses To Increase Subgrade Strength In Flexible Road Pavements

### Autores

**Shirley Elizabeth Andrade Aguilar<sup>1</sup>, María Lisbeth Erazo Bueno<sup>2</sup>, Eduardo Tejeda Piusseaut<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí. email: [sandrade0749@utm.edu.ec](mailto:sandrade0749@utm.edu.ec)

<sup>2</sup>Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí. email: [merazo6611@utm.edu.ec](mailto:merazo6611@utm.edu.ec)

<sup>3</sup>Profesor de la Universidad Técnica de Manabí. email: [eduardo.tejeda@utm.edu.ec](mailto:eduardo.tejeda@utm.edu.ec)

### RESUMEN

La técnica de situar un material granular de mejoramiento, procedimiento habitual en Ecuador, permite un incremento de la resistencia del suelo de subrasante logrando una mayor capacidad de soporte. Se presenta en el artículo un procedimiento teórico para determinar estos espesores mínimos, obtenidos mediante la modelación de las estructuras de suelos mediante el software ALIZE. El procedimiento aplicado se basa en el método incluido en la Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía (ICAFIR), con algunas modificaciones para adaptarlo a la norma de diseño AASTHO 93. Se modela el ensayo de placa de carga aplicando una carga de 0,5 MPa sobre un modelo multicapa, formado por el suelo natural y el material de mejoramiento, calculándose la deflexión superficial y el módulo de elasticidad en la superficie. Se han establecido categorías exigidas para la subrasante en función del CBR de diseño, baja (5%), media (10%) y alta (15%), según los tráficos de diseño ligero, medio y pesado, respectivamente. En función del tipo de tráfico y de la calidad de la subrasante natural se proporcionan los espesores mínimos de mejoramiento que deben utilizarse para garantizar los módulos exigidos en el cimiento de un pavimento flexible.

**Palabras claves:** índice de CBR, mejoramiento de subrasante, módulo equivalente, pavimento flexible.

### ABSTRACT

The technique of placing a granular improvement material, a common procedure in Ecuador, allows an increase in the resistance of the subgrade soil, achieving greater support capacity. A theoretical procedure is presented in the article to determine these minimum thicknesses, obtained by modeling soil structures using the ALIZE software. The applied procedure is based on the method included in the Instruction for the Design of Road Surfaces of the Andalusian Road Network (ICAFIR), with some modifications to adapt it to the AASTHO 93 design standard. The load plate test is modeled by applying a load of 0.5 MPa on a multilayer model, formed by the natural soil and the improvement material, calculating the surface deflection and the elastic modulus on the surface. Required categories have been established for the subgrade based on the design CBR, low (5%), medium (10%) and high (15%), according to the light, medium and heavy design traffic, respectively. Depending on the type of traffic and the quality of the natural subgrade, the minimum improvement thicknesses that must be used to guarantee the modules required in the foundation of a flexible pavement are provided.

**Keywords:** California support index, subgrade improvement, equivalent modulus, flexible pavement.

Nota Editorial: Recibido: Mayo 2024 Aceptado: Junio 2024

# 1. INTRODUCCIÓN

Al referirse a la subrasante Fonseca Montejo menciona que: “De la calidad de esta capa depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea este flexible o rígido. Como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas del tránsito” [1].

Los suelos no aptos para ser utilizados como subrasante de carreteras requieren del mejoramiento para su empleo, debido a que pueden influir en el incremento de los espesores del pavimento o en su mal comportamiento, ya que en la subrasante se apoyan las cargas producidas por las capas estructurales del pavimento y las vehiculares. Este problema se presenta frecuentemente en suelos naturales limo- arcillosos que poseen una baja capacidad de soporte o de CBR, cuyas características hacen que estos tipos de suelos se presenten como inadecuados para brindar un cimiento aceptable en proyectos de construcción de carreteras.

Jácome y Ortiz [2] mencionan que en la provincia de Manabí (Ecuador) se observa un deterioro de ciertas vías debido al tipo de suelo arcilloso muy comprensible y expansivo de la subrasante lo que conlleva a problemas de fisuras o deformaciones en las carreteras; volviendo necesario la implementación de métodos que incrementen la resistencia de la subrasante.

Entre las soluciones para corregir los suelos inadecuados como subrasantes se encuentran las estabilizaciones de suelos que pueden ser físicas y químicas; dentro de las estabilizaciones químicas las más comunes son el uso de aditivos químicos, como: cemento, cal, emulsiones asfálticas, terrasil [3], así como también existen otros métodos como el uso de un material granular colocado encima o como sustitución de parte del suelo natural, al cual se le denomina mejoramiento. En el estudio de Rivera y sus colaboradores [4] mencionan que: “la estabilización de un suelo es un proceso que permite mejorar la calidad del suelo natural para obtener unas características físicas, químicas y mecánicas estables en relación con las condiciones medioambientales de servicio”. Estos procedimientos persiguen el aumento de la resistencia, la reducción de la plasticidad y la reducción de las características de contracción-hinchamiento, volviéndose apto para la construcción a largo plazo [3].

Entre las soluciones de estabilización la bibliografía muestra el uso de lodos aceitosos, donde, con la adición de un bajo porcentaje se mejoraron la resistencia y plasticidad de un material granular, además de mejorar la subrasante del pavimento, permitiendo, además, aprovechar los residuos de la extracción del petróleo, mitigando los impactos negativos al medio ambiente [5]. La adición de escoria de acero es otra forma de estabilizar los suelos, pero de forma mecánica; se ha mezclado escoria de acería con arcilla caolinita [6].

Cuando no se dispone de suelos aptos, es necesario que el diseñador de pavimentos someta a los suelos a cierta manipulación o tratamiento que permita aprovechar sus mejores cualidades, con el tipo de tratamiento más adecuado capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas [5].

En general, los criterios para decidir sobre un tipo o no de estabilización química se basan generalmente en los límites de Atterberg, los cuales permiten caracterizar el comportamiento de los suelos finos, además del porcentaje pasado por el tamiz 200. El cemento como agente estabilizador se recomienda en los suelos con menos del 50% de material pasado el tamiz 200 y con menos de 12% de IP. Con una mayor plasticidad se recomienda una estabilización combinada de cal-cemento. La cal puede ser efectiva en casos de que el suelo tenga mas del 50% pasado el tamiz 200, mientras que los productos asfálticos deben usarse con un IP inferior al 10% [7].

En Ecuador el procedimiento tradicional de mejorar el cimiento del pavimento es colocando un material granular, llamado mejoramiento, sobre el suelo natural, creando así un conjunto con una mayor capacidad de soporte. En este trabajo se realiza una modelación de las capas de suelos conformados por la subrasante natural y el mejoramiento, con el objetivo de determinar el espesor de material granular de mejoramiento que debe colocarse para lograr una resistencia en el cimiento de acuerdo a determinadas exigencias impuestas en el proyecto. La capacidad de soporte de la subrasante se cuantifica por medio del módulo resiliente ( $M_r$ ), que se puede estimar por correlación con ensayos de rutina como el CBR (Índice de Soporte de California) [8].

En el diseño de pavimentos se emplean actualmente los llamados métodos empíricos mecanicistas, que son procedimientos de cálculo que constan, por una parte, de un modelo de respuesta, con el que se determina la respuesta de la estructura al ser sometida a una carga en la superficie y de un modelo de comportamiento para verificar si las tensiones o deformaciones que se obtienen en la respuesta, son menores que las admisibles [9], dentro de los métodos empíricos mecanicistas se encuentra la Guía de Diseño 2008 que se presenta como uno de los métodos actualmente más avanzados [10]. En este trabajo se utiliza el software del Laboratorio de Carreteras y Puentes de Francia (ALIZE) para modelar la estructura de suelos conformada por el suelo natural y el material de mejoramiento.

Con este fin se establecieron diferentes categorías de cimiento, tomados de la Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía (ICAFIR) [11], clasificados como baja, media y alta, con valores de CBR de 5%, 10% y 15%, respectivamente, los que se corresponden con los tipos de tráfico del proyecto. Se consideró, el material granular de mejoramiento con un 20%, según las características que establece el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOP) [12] para estos materiales. Para modelar mediante el programa ALIZE las diferentes estructuras de suelos y determinar la deflexión superficial en cada caso, cuando se someten a una carga determinada, obteniendo con ello el espesor mínimo de mejoramiento que garantice el Módulo de Elasticidad (módulo de superficie), exigido en el proyecto según sea el caso.

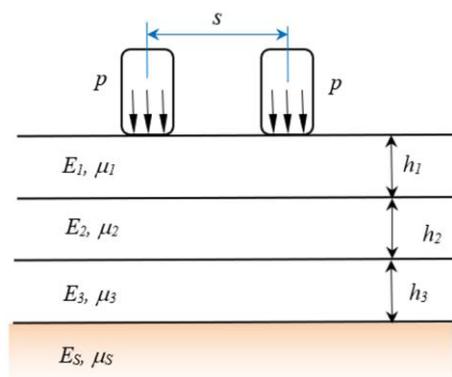
## 2. MODELOS MULTICAPAS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Regularmente un pavimento flexible está formado por la capa de rodadura, la base y subbase, apoyados sobre la subrasante, que influye tanto en el espesor del pavimento como en su comportamiento. La calidad de los materiales que componen la estructura está en función de las características requeridas de cada capa y de la intensidad de tránsito, especificada en términos del número de ejes equivalentes acumulados durante la vida útil del pavimento [7].

El dimensionamiento empírico, tal como se realiza en la Guía de diseño AASHTO 1993 (American Association of State Highway and Transportation Official) [13], se desarrolló a partir del estudio del comportamiento de los pavimentos de las carreteras abiertas al tráfico. En este método se especifica un criterio de fallo que define la vida de servicio del pavimento y este criterio se relaciona estadísticamente con las propiedades de la estructura.

El dimensionamiento mecanicista comenzó en 1943 con Burmister, quien propuso primero un análisis basado solamente en dos capas, y después fue extendida a múltiples capas. Huang, señala que en esta hipótesis cada capa debe ser homogénea, isotrópica y linealmente elástica, además que la capa más baja es infinita, la relación de Poisson y el Módulo de Elasticidad son las dos propiedades de los materiales de la cual se basa la solución del esfuerzo [14]. Debido a que los pavimentos están conformados por una serie de capas, de materiales diferentes, se considera este modelo como multicapas [15].

En los métodos mecanicistas se determina la respuesta estructural del pavimento mediante la distribución de esfuerzos ( $\sigma$ ), deformaciones unitarias ( $\varepsilon$ ), y deflexiones ( $\delta$ ), donde el comportamiento de los materiales se basa en la teoría de la elasticidad. Se utilizan como solicitaciones las condiciones de tránsito, por medio de espectros de cargas y los factores climáticos, ya que estos tienen gran influencia en el comportamiento de los pavimentos flexibles [16]. En el modelo multicapas se toman en cuenta los espesores y características de los materiales que componen la estructura del pavimento (módulo de elasticidad y Coeficiente de Poisson), además de las condiciones de la subrasante, considerada como de espesor infinito (Figura 1).



- $E_1, E_2, E_3$ : Módulos de elasticidad de los materiales del pavimento.
- $E_S$ : Módulo de elasticidad del cimentado.
- $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ : Coeficientes de Poisson de los materiales del pavimento.
- $\mu_S$ : Coeficiente de Poisson del cimentado.
- $p$ : Presión de contacto.
- $h_1, h_2, h_3$ : Espesores de capas
- $s$ : separación entre cargas

Figura 1. Modelo multicapas para los diseños mecanicistas.

Por otra parte, en el diseño, la respuesta obtenida del modelo se compara con las condiciones de fallo de la estructura o de los materiales que la componen (modelos de fallo). Las leyes de fallo ayudan a evitar que la estructura del pavimento tenga daños estructurales, debido a las deflexiones y deformaciones excesivas que se puedan presentar.

## 3. PRUEBA DE CARGA CON PLACA ESTÁTICA

La prueba de carga con placa estática consiste en la aplicación de una carga sobre una placa metálica circular por medio de un gato hidráulico que está en el centro y en ángulo recto de la misma, el cual está a su vez conectado a una bomba hidráulica por medio de una manguera de alta presión, siendo capaz este sistema de aplicar una serie de incrementos de cargas. Con respecto a una posición de referencia inicial se miden las deflexiones en cada punto de prueba [17], tal y como se muestra en la figura 2.



Figura 2. Imagen del Ensayo de carga con Placa Estática [13].

En la prueba se especifica que, para placas con un diámetro de 30 cm, utilizada en pavimentos flexibles, el espesor mínimo es de 25 mm, utilizándose refuerzos en la cara superior para evitar la deformación de la placa. Conociendo las deflexiones que presenta el suelo, obtenidas mediante un dispositivo electrónico de lectura, y las correspondientes cargas aplicadas mediante la placa, se puede calcular el módulo de deformación del suelo in situ.

Según la norma NLT-357/98, el ensayo permite determinar las curvas cargas-asientos y, a partir de ellas, la deformabilidad y la capacidad portante del suelo. De estas curvas se pueden calcular el módulo de compresibilidad ( $E_v$ ) y el módulo de reacción ( $K_s$ ) [18]. La deflexión obtenida es un parámetro que representa la capacidad portante de la estructura de un pavimento, así como del conjunto de capas de suelos que conforman un cimiento, pudiéndose determinar el módulo de deformación (en superficie) con la siguiente ecuación:

$$E_v = \frac{P \cdot D}{\delta / 1000} * (1 - \mu^2) \quad (1)$$

Donde  $p$  es la presión de contacto (MPa),  $D$  es el diámetro de la placa (cm),  $\mu$  es el coeficiente de Poisson y  $\delta$  es la deflexión (cm) en superficie.

El ensayo de placa de carga es algo lento, complejo y caro. Puede realizarse en suelos de tipo cohesivos o granulares, siempre que no se encuentre material granular con un diámetro mayor al de la placa directamente por debajo de la misma. Además, debe tenerse en cuenta que los resultados que se obtengan en la realización del ensayo pueden verse afectados por la humedad del suelo.

#### 4. MODELACIÓN DE SUBRASANTES PROCEDIMIENTO DE ICAFIR

En la Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía (ICAFIR) [11], como parte del proyecto del pavimento, se revisa la calidad del cimiento, para lo cual se realiza una modelación del ensayo de placa aplicando un modelo elástico multicapas. En la figura 3 se representa el modelo de ICAFIR para el diseño del cimiento, donde  $E_1$  representa el Módulo de Elasticidad del suelo natural y  $\mu_1$  el coeficiente de Poisson, con espesor infinito, mientras que el material de mejoramiento, con un espesor  $h_2$  sobrepuesto sobre el suelo natural se simboliza con  $E_2$  y  $\mu_2$ , para el Módulo de Elasticidad y el coeficiente de Poisson respectivamente.

En el modelo se emplea una carga de 0,5 MPa, diámetro de placa de 30 cm, y los materiales son representados por el coeficiente de Poisson de 0,35 y los módulos de elasticidad. Sustituyendo estos valores como constantes en la ecuación 1, del ensayo de placa, se calcula el módulo de superficie ( $E_s$ ) mediante la siguiente expresión:

$$E_s = \frac{13.150}{\delta(mm/100)} \quad (2)$$

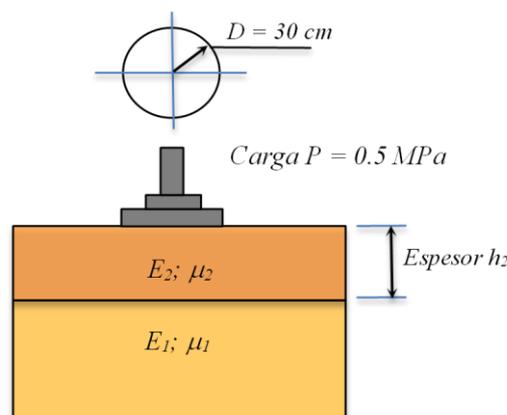


Figura 3. Modelo de ICAFIR para el diseño del cimiento.

#### 5. METODOLOGÍA EMPLEADA

La investigación tiene el propósito de determinar los espesores mínimos de mejoramiento que deben colocarse encima del suelo natural para alcanzar el módulo de superficie necesario en el cimiento, según sea la categoría requerida por el tráfico del proyecto. Se han seguido los siguientes pasos:

La investigación tiene el propósito de determinar los espesores mínimos de mejoramiento que deben colocarse encima del suelo natural para alcanzar el módulo de superficie necesario en el cimientado, según sea la categoría requerida por el tráfico del proyecto. Se han seguido los siguientes pasos:

- 1) Establecimiento de categorías de subrasante de acuerdo al tráfico de proyecto, definido como el Número de Ejes Simples Equivalentes (ESALs) para la carga de cálculo de 18 kips (80 kN).
- 2) Especificación del módulo mínimo de superficie en el cimientado (suelo natural + mejoramiento) para cada categoría de tráfico de proyecto.
- 3) Calcular los espesores mínimos de mejoramiento, que comprende:
  - a) Modelación de las diferentes estructuras de materiales conformadas por el suelo natural y el mejoramiento, utilizando el software ALIZE para la obtención de la deflexión en superficie.
  - b) Cálculo del módulo de superficie requerido según la categoría del cimientado, variando el espesor de mejoramiento.
  - c) Obtención del espesor mínimo de mejoramiento con el que se garantice el módulo mínimo de superficie, según la categoría de tráfico.

## 5.1. Categorías De Subrasantes Propuestas Según Tráfico De Proyecto (ESALS)

El tráfico es un factor significativo en el procedimiento de ICAFIR, ya que de este depende la categoría que se debe exigir en el cimientado. Para su determinación se toma en cuenta el número de ejes equivalentes que van a circular por la vía durante el período de diseño.

Para obtener el ESALs (Equivalent Standar Axle Load) se aplica la ecuación 3 de la norma AASTHO 93 [13], que representa el número de repeticiones de ejes equivalentes de 18 kips (80 kN), que circularán por el carril de diseño, durante el período de diseño.

$$ESALs = ADT * TKS * GF * DD * LD * TF * 365 \quad (3)$$

Donde *ADT* es el Tránsito Promedio Diario en el año inicial, *TKS* es el Porcentaje de camiones, *GF* es el factor de crecimiento, *DD* es el factor de distribución direccional, *LD* es el factor de distribución por el carril de diseño y *TF* es el factor de camiones. Para hallar el factor de crecimiento se aplicó la ecuación 4, con una tasa de crecimiento anual del 3%, considerando los periodos de diseño de 15 y 20 años.

$$GF = \frac{(1+r)^n - 1}{\ln(1+r)} \quad (4)$$

El Factor de Distribución Direccional es de 0,5, al considerar el tráfico balanceado y el Factor de Distribución por Carril, para vías de dos carriles es igual a 1.

En la tabla 1 se muestran las categorías de cimientado, nombradas como Baja, Media y Alta, de acuerdo al CBR o el Módulo de Elasticidad que se requiera en el proyecto, como establece ICAFIR. La categoría de cimientado se debe seleccionar según el tráfico de proyecto. Para tráfico Ligero el cimientado debe ser como mínimo de CBR= 5% (50 MPa), para tráfico Medio de 10% (100 MPa) y para el tráfico Pesado, de 15% (150 MPa)

**Tabla 1.** Categorías de subrasante establecidas por ICAFIR para cada Tráfico de Proyecto [11]

CATEGORÍAS DE SUBRASANTE	MÓDULO EQUIVALENTE (MPa)	CATEGORÍAS DEL TRÁFICO DEL PROYECTO
BAJA	≥ 50	T4
MEDIA	≥100	T3 y T4
ALTA	≥ 150	T00 a T2

Sin embargo, en la Instrucción ICAFIR las categorías de tráfico están definidas para una carga de cálculo de 130 kN, mientras que en la AASHTO 93, la carga es de 80 kN, por tanto, no es posible considerar los mismos valores de tráficos para iguales categorías, sino que deben modificarse para establecer nuevos valores para la carga de 80 kN [11]. Para ello se ha utilizado la ecuación 4, de dicha Instrucción, para calcular el factor de conversión entre las repeticiones de ambas cargas simples con ruedas duales, para convertir las repeticiones de cargas de 130 kN a repeticiones de 80 kN.

$$F_c = \left(\frac{13}{8,2}\right)^4 \quad (5)$$

Por consiguiente, las categorías de tráfico: ligero, medio y pesado, quedan como se muestran en la tabla 2, donde son definidos para una carga de 80 kN. Se han considerado dos períodos de diseño diferentes, que comúnmente se emplean en los diseños de pavimentos flexibles (15 y 20 años). En los cálculos se ha tenido en cuenta que el tráfico de camiones en el año inicial y por el carril de diseño es de: menos de 50 camiones diarios para el tráfico ligero (T3), entre 50 y 800 cam/día para el tráfico medio (T2) y más de 800 cam/día (T1) para el tráfico pesado. En la tabla se incluyen las categorías de calidad de subrasante según el módulo equivalente y para las categorías de tráfico definidas.

**Tabla 2.** Categorías de tráfico de proyecto propuestas, según ESALs.

TRÁFICO DE DISEÑO	TPD camiones (ADT *TKS)	Tráfico de diseño (ESALs)				CATEGORÍA SUBRASANTE	CBR (%)	MÓDULO SUPERFICIE (MPa)
		15 años		20 años				
LIGERO T3	menos de 50	menos de $5,4 \times 10^5$		menos de $7,9 \times 10^5$		BAJA	5	$\geq 50$
MEDIO T2	50-800	$5,4 \times 10^5$	$8,7 \times 10^6$	$7,9 \times 10^5$	$1,3 \times 10^7$	MEDIA	10	$\geq 100$
PESADO T1	más de 800	$8,7 \times 10^6$		$1,3 \times 10^7$		ALTA	15	$\geq 150$

## 5.2. Determinación De La Deflexión En Superficie Mediante La Modelación De Las Estructuras De Materiales Conformadas Por El Suelo Natural Y El Mejoramiento.

El propósito de la modelación es determinar el espesor de material de mejoramiento que debe colocarse encima del suelo natural para lograr un cimiento con la resistencia exigida de acuerdo al tráfico de proyecto y de la categoría de subrasante conformada por el suelo natural. La modelación se realizó mediante el programa ALIZE, que constituye un software profesional empleado para el análisis y diseño de pavimentos.

Para la caracterización de los suelos se necesitan diferentes ensayos que permitan describir su composición física y mecánica, entre los más usuales para un estudio de una subrasante está la granulometría, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, contenido de humedad, Proctor y CBR [19].

El mejoramiento, según las normas de Ecuador, MOP-001-F-2002 [12], es un material granular que tiene como exigencias, el 100% pasando por el tamiz de 100 mm, menos del 20% pasado por el tamiz N° 200 (0,075 mm), Índice de plasticidad no mayor al 9% y Límite líquido hasta el 35%, para garantizar un CBR mayor o igual al 20%. De acuerdo a estas características se puede considerar que el material de mejoramiento puede tener un módulo de elasticidad mínimo aproximado de 200 MPa, de acuerdo a la ecuación 2.

### 5.2.1. Cálculo Del Módulo De Superficie Requerido

El módulo de superficie se calcula utilizando la ecuación 1 del ensayo de placa. Donde la deflexión (cm) en superficie, se obtiene de la modelación con el programa ALIZE, debido a la aplicación de la carga. El modelo constitutivo es lineal elástico por lo cual el contacto entre capas se configuró como adherencia total. Los módulos de elasticidad de cada capa se pueden estimar a partir del CBR del suelo, considerando la ecuación empírica de la AASTHO:

$$E = 10 * CBR \quad (2)$$

En el programa ALIZE se emplea el modelo de ICAFIR (figura 3), en la cual se aplica una carga de 0,5 MPa sobre una placa cuyo diámetro (D) es de 30 cm, que ejerce presión sobre la estructura de materiales, conformada por el mejoramiento de espesor (h) y el suelo natural de espesor infinito, ambos caracterizados por el coeficiente de Poisson de 0,35 y el módulo de elasticidad, El espesor de mejoramiento se va modificando hasta alcanzar el módulo de superficie exigido en función de la categoría de subrasante deseada,

De cada estructura formada por el suelo natural y el mejoramiento se obtiene el espesor de mejoramiento que origina la deflexión con la que se calcula el módulo de superficie, verificando que cumpla con la calidad deseada de cimiento,

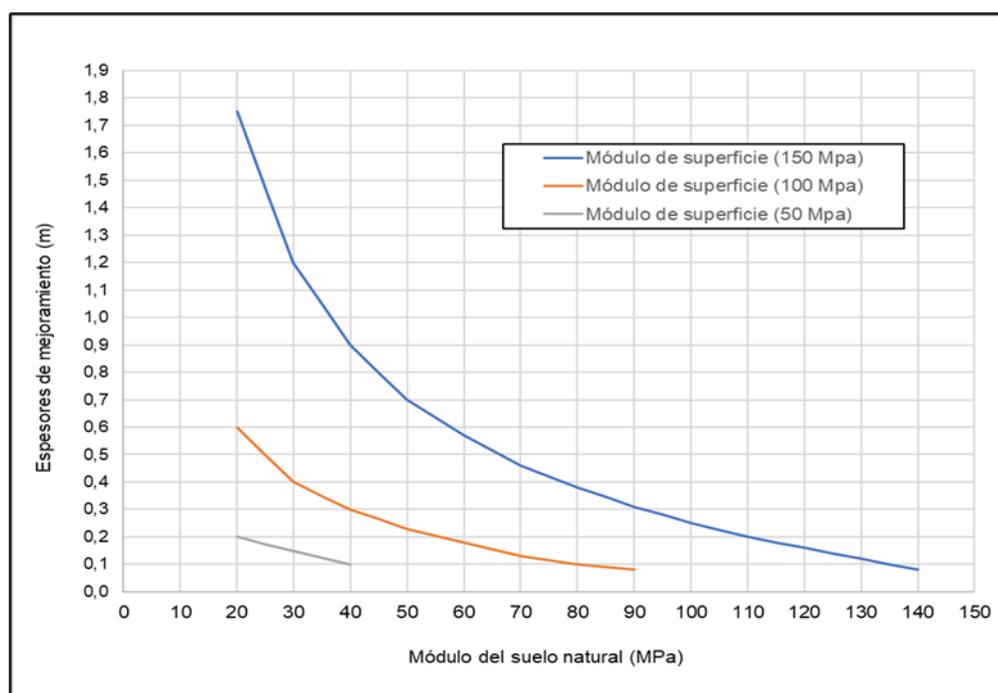
## 5,2,2, Espesores Mínimos De Mejoramiento Según Módulo Mínimo De Superficie

En la tabla 3 se muestran los espesores mínimos de material de mejoramiento (h) calculados para diferentes Módulos de Elasticidad del suelo natural de la subrasante (20 MPa – 140 MPa), y según sea la resistencia exigida para el cimiento del pavimento flexible (50 MPa, 100 MPa o 150 MPa). Asimismo, se han incluido los valores de deflexión y módulos de superficie para cada condición de diseño, de acuerdo a la categoría de subrasante que se desee obtener.

**Tabla 3.** Espesores de mejoramiento (h) que se deben utilizar para conformar la calidad de cimiento (50 MPa, 100 MPa, 150 MPa) según los requerimientos del tráfico de diseño.

SUELO NATURA L (MPa)	MÓDULOS DE SUPERFICIE								
	50 MPa			100 MPa			150 MPa		
	Deflexió n (m)	h (m)	Es (MPa)	Deflexió n (m)	h (m)	Es (MPa)	Deflexió n (m)	h (m)	Es (MPa)
20	244,6	0,20	53,8	128,3	0,60	102,6	71,6	1,75	183,8
30	222,6	0,15	59,1	130,1	0,40	101,2	87,5	1,20	150,4
40	221,8	0,10	59,3	129,2	0,30	101,9	87,5	0,90	150,4
50				129,0	0,23	102,0	87,7	0,70	150,1
60				128,4	0,18	102,5	87,3	0,57	150,8
70				131,2	0,13	100,3	87,5	0,46	150,4
80				129,2	0,10	101,9	87,3	0,38	150,8
90				124,2	0,08	106,0	87,4	0,31	150,6
100							87,6	0,25	150,3
110							87,6	0,2	150,3
120							87,3	0,16	150,8
130							87,1	0,12	151,1
140							86,8	0,08	151,6

La figura 4 muestra gráficamente los resultados, donde el eje de las abscisas (X) representa los módulos del suelo natural y en las ordenadas (Y) los espesores de mejoramiento que se deben emplear sobre el suelo natural para incrementar la capacidad portante del conjunto de capas (suelo natural-mejoramiento), hasta los valores requeridos en el diseño. Cada gráfico representa el módulo de superficie deseado en el proyecto.



**Figura 4.** Espesores mínimos de mejoramiento según la calidad del cimiento requerido en el proyecto.

### 5.2.3. Aplicación De Los Resultados De Este Trabajo

Para ilustrar cómo se pueden emplear los resultados previamente descritos, consideremos un proyecto de pavimento con un período de diseño de 15 años, basado en los siguientes datos obtenidos de los estudios de tráfico:

- Tráfico Promedio Anual (ADT) de 1800 Veh/día.
- Porcentaje de vehículos pesados (TKS) igual al 20%.
- Factor de crecimiento (GF)
- Tráfico balanceado, por lo que la Distribución por sentido (DD) se considera del 50%.
- Porcentaje de pesados en el Carril de diseño (LD) del 100% para una vía de dos carriles.
- Factor de camión (TF) es de 0,75.

Al sustituir los valores de los parámetros de tránsito en la ecuación 3, se estima que el número de ejes de 18 kips (80 kN) que circularán por el carril de diseño durante 15 años es igual a  $9,3 \times 10^5$  ejes equivalentes. Según la clasificación propuesta en la Tabla 2, este nivel de tráfico se clasifica como MEDIO (T2).

El procedimiento propuesto demanda la caracterización del suelo natural del sitio, evaluando la granulometría, los límites de consistencia, la clasificación según el método AASHTO y el CBR de diseño bajo condiciones de saturación. Como ejemplo, se tiene un suelo natural clasificado como limo-arcilloso del subgrupo A-7-6 según la AASHTO. Además, después de saturado, el Índice de CBR es de 2,5%. Conforme a la clasificación de subrasantes establecida en el "Manual de diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito" (Tabla 6), esta subrasante se considera muy pobre, ya que el CBR de diseño es inferior al 3%. Por lo tanto, es necesario colocar un material de mejoramiento que permita alcanzar un módulo de superficie superior a 100 MPa, requerido según el nivel de tráfico.

Utilizando la ecuación 2, se estima que el módulo resiliente para este suelo es:

$$E_r = 10 \text{ CBR} = 10 * 2,5 = 25 \text{ MPa}$$

Para alcanzar el valor de resistencia especificado, según la Tabla 4, se aproxima el módulo del suelo natural, cuyo valor es de 27,75 MPa, a 30 MPa. De esta manera, el espesor de mejoramiento que se necesita es de 0,40 m. Este mismo valor se puede obtener del gráfico en la figura 4, ingresando con 30 MPa en el eje de las abscisas y obteniendo un espesor de 0,40 m en las ordenadas.

**Tabla 4.** Categorías de subrasante, según el CBR.  
Manual de diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito [20].

	Clasificación	CBR de diseño
S <sub>0</sub>	Subrasante muy pobre	< 3%
S <sub>1</sub>	Subrasante pobre	3% - 5%
S <sub>2</sub>	Subrasante regular	6% - 10%
S <sub>3</sub>	Subrasante buena	11 %- 19%
S <sub>4</sub>	Subrasante muy buena	> 20%

## 6. CONCLUSIONES

El método empleado en esta investigación, adaptado del procedimiento ICAFIR, que determina teóricamente el espesor mínimo de material de mejoramiento sobre el suelo natural para garantizar la resistencia exigida en un cimiento, es viable para su aplicación en Ecuador. Este método permite estimar los espesores necesarios de mejoramiento en las obras de construcción de carreteras con pavimentos flexibles. Fue necesario realizar ajustes en algunos criterios debido a que el procedimiento original utiliza una carga de cálculo de 130 kN, mientras que en Ecuador se usa emplea una carga de 80 kN, conforme a la norma AASTHO 93.

Modelando las estructuras de suelos a través del programa ALIZE y aplicando los criterios derivados de ICAFIR, se calcularon los espesores de material de mejoramiento en función de la calidad de la subrasante natural (baja, media, alta) y del tipo de tráfico (ligero, medio, pesado). Se determinaron los espesores mínimos requeridos según los módulos de superficie deseados, que son de 50 MPa, 100 MPa y 150 MPa.

La calidad del suelo natural contemplada varía desde 20 MPa hasta 140 MPa. Cuanto mayor sea el módulo del suelo natural, menor será el espesor de mejoramiento requerido para alcanzar el mismo módulo de superficie. Sin embargo, para un mismo módulo del suelo natural, se necesitará un espesor de mejoramiento mayor conforme aumente la exigencia del proyecto.

Se presenta un ejemplo de cálculo para ilustrar el uso de este procedimiento. En primer lugar, se define el tráfico previsto en el proyecto para determinar la calidad deseada en el cimiento. Luego, se caracteriza el suelo natural para determinar la categoría de subrasante. Por último, se calcula el espesor mínimo de mejoramiento utilizando el gráfico de la figura 4 o la tabla 4.

1. Montejo Fonseca, "Ingeniería de pavimentos para carreteras", 2da edición ed., Santa Fe de Bogotá, DC. Colombia, 2001.
2. G. Jácome Macías and E. Ortiz Hernández, "Estabilización de un suelo de subrasante de carretera con el sistema Consolid," Ingeniería, Tecnología e Investigación, vol. 5(10 Ed. esp.), pp. 2-13, 2022.
3. T. Zambrano Bravo and M. Zambrano Meza, "Estabilización de suelo con cal y cemento para el mejoramiento de subrasante," Revista científica multidisciplinaria arbitrada Yachasun, vol. 7, no. 13, pp. 112-124, 2023.
4. J. Rivera, A. Aguirre Guerrero, R. Mejía de Gutiérrez and A. Orobio, "Estabilización química de suelos-Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión)," Informador Técnico, vol. 84, no. 2, pp. 202-226, 2020.
5. J. Alarcon , M. Jiménez and R. Benítez, "Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitoso," Revista ingeniería de construcción, vol. 35, no. 1, pp. 5-20, 2020.
6. M. Ospina García, S. Chaves Pabón and L. Jiménez Sicachá, "Mejoramiento de subrasantes de tipo arcilloso mediante la adición de escoria de acero," Revista de investigación, desarrollo e innovación, vol. 11, no. 1, pp. 185-196, 2020.
7. A. Celi Macías, J. Mendoza Alcívar and E. Tejeda Piusseaut, "Mejoramiento de subrasante mediante la estabilización con cemento en obras viales del cantón Portoviejo," Dominio de las Ciencias, vol. 9, no. 2, pp. 55-69, 2023.
8. F. Hernández López and E. Tejeda Piusseaut, "Fundamentos de la propuesta de norma de pavimentos de hormigón simple para Cuba," Revista ciencia y construcción, vol. 1, no. 1, pp. 55-66, 2020.
9. M. Sánchez Morales, D. Pavón Marrero and E. Tejeda Piusseaut, "Propuesta de espesores mínimos de superficie y coeficientes de equivalencia de espesores para el diseño de pavimentos flexibles," Revista de Arquitectura e Ingeniería, vol. 14, no. 1, pp. 1-10, 2020.
10. AASHTO, "Guide for Mechanistic-Empirical Design in Rigid Pavement Structures," Washington, DC. Estados Unidos, 2008.
11. ICAFIR, "Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía". Consejería de Obras Públicas y Transportes, España, Andalucía, 2007.
12. MOP, "Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP - 001-F", 2002.
13. AASHTO-93, "Guide for design of pavement structures," Washington D. C, Estados Unidos, 2001.
14. Coria, C. Chávez, J. Alarcón and E. Arreygue, "Elaboración de un programa de diseño de pavimentos flexibles," 2012.
15. Castillo Rivera, "Revisión de los métodos de diseño de pavimentos flexibles "AASHTO93" y el "Modelo Elástico Lineal (KENLAYER)", mediante el modelo viscoelástico propuesto por la ME PDG NCHRP 1-37A (3D-MOVE)," PhD Tesis, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, 2014. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/51792/8164454.2014.pdf?sequence=1>.
16. P. Garnica and A. Correa, "Conceptos mecanicistas en pavimento," Publicación técnica, 2004.
17. DIN-18134, Procedimiento y equipos de ensayo. Ensayo de carga de placas, Instituto Alemán de Normas, 2001.
18. NLT-357/98, "Ensayo de Placa con Carga", CEDEX. Madrid, España, 1998.
19. J. Santa Cruz Marín , "Determinación del espesor de mejoramiento de subrasante con presencia de suelos blandos," PhD Tesis, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2223>.
20. Ministerio de transportes y Comunicaciones, "Manual de diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito," Lima, Perú, 2008.