

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Diseño de Pavimentos aplicando la Metodología AASHTO 93 mediante
la Programación de un Software Interactivo**

Alisson Maribel Bedón Barreno

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para obtener el título de
Ingeniero Civil

Quito, 17 de diciembre de 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Diseño de Pavimentos aplicando la Metodología AASHTO 93 mediante la
Programación de un Software Interactivo**

Alisson Maribel Bedón Barreno

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Luis Gustavo Boada Parra, Máster en Sistemas de Ingeniería Civil

Firma del profesor:

Quito, 17 de diciembre de 2021

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Alisson Maribel Bedón Barreno

Código: 00203252

Cédula de identidad: 1600524175

Lugar y fecha: Quito, 17 de diciembre de 2021

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico a mi familia, especialmente a mis padres. Ellos han sido mi pilar fundamental durante toda mi carrera universitaria y gracias a su amor y confianza he llegado al final de esta maravillosa etapa. De mis padres aprendí que la humildad, dedicación y responsabilidad son claves para conseguir todo lo que uno se propone, porque no hay sueños/metast demasiado grandes, sino personas que no quieren soñar.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a mi familia por su apoyo incondicional y sus sabios consejos que me han permitido llegar al final de este camino. Les doy las gracias también a mis amigos Samantha y Tomás por enseñarme la lógica detrás de la programación efectiva en Matlab y sobre todo por creer y confiar en mí. Asimismo, quiero agradecer a mi profesor Juan José Recalde, quien ha sido una gran inspiración y me ha enseñado el valor de la perseverancia y la organización. Finalmente, agradezco el compromiso y soporte en este trabajo final de mi tutor Gustavo Boada Parra. Gracias Gustavo por haber sido un gran mentor en esta investigación que me permitirá obtener el título de Ingeniero Civil en la USFQ.

RESUMEN

La metodología AASHTO 93 permite diseñar pavimentos flexibles y rígidos por medio de la resolución de ecuaciones no lineales en las cuales intervienen varios parámetros de diseño que dependen del tipo de carretera, su ubicación y el suelo donde se va a construir. La solución de estas ecuaciones se obtiene por medio de monogramas, que pueden devolver valores inexactos, si no se los aplica correctamente. Para evitar esta problemática, surge la idea de crear un software interactivo de autoría totalmente ecuatoriana, que resuelva las ecuaciones AASHTO 93, a través de la extensión App Designer del programa MATLAB.

Para comprobar su funcionalidad se diseñó un pavimento flexible en la vía CERCOPAMBA ubicada en la parroquia Guayllabamba, en la provincia de Pichincha – Ecuador. Se obtuvieron los mismos resultados con el uso del monograma y la aplicación creada, lo cual verifica su correcta ejecución.

La estructura de pavimento flexible propuesta para esta carretera local – rural de bajo volumen de tránsito está compuesta de tres capas: una capa de rodadura asfáltica de 5 cm, una base clase 4 de 10 cm y una subbase clase 3 de 20 cm. Finalmente, este diseño se realizó por medio de la metodología AASHTO 93 considerando la variación del método por criterio posibilidad de construcción y multicapa. Concluyendo que el diseño es adecuado para la vía porque cumple con su demanda estructural ajustándose a los espesores mínimos especificados.

Palabras clave:

Pavimento flexible, pavimento rígido, interfaz gráfica, métodos numéricos, AASHTO93, California Bearing Ratio (CBR), Número Estructural (SN), Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA), criterio posibilidad de construcción, criterio multicapa, capa asfáltica, base, subbase.

ABSTRACT

The AASHTO 93 methodology allows the design of flexible and rigid pavements by solving non-linear equations that involve various design parameters that depend on the type of road, its location, and the soil where it will be built. The solution of these equations is obtained by monograms, which can return inaccurate values, if they are not applied correctly. To avoid this issue, the idea of creating an interactive software of totally Ecuadorian authorship, that solves the AASHTO 93 equations, through the App Designer extension of the MATLAB program arises.

To verify its functionality, a flexible pavement was designed on the CERCOPAMBA road located in the Guayllabamba parish, in the province of Pichincha - Ecuador. The same results were obtained with the use of the monogram and the application created, which verifies its correct execution. The flexible pavement structure proposed for this low-volume local-rural highway is composed of three layers: a 5 cm asphalt tread layer, a 10 cm class 4 base and a 20 cm class 3 sub-base. Finally, this design was carried out using the AASHTO 93 methodology, considering the variation of the method by the possibility of construction and multilayer criteria. Concluding that the design is suitable for the road because it meets its structural demand by adjusting to the minimum specified thicknesses.

Key words:

Flexible pavement, rigid pavement, graphical interface, numerical methods, AASHTO 93, California Bearing Ratio (CBR), Structural Number (SN), Annual Average Daily Traffic (AADT), construction possibility criteria, multilayer criteria, asphalt layer, base, sub-base.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	14
1.1.	ANTECEDENTES	14
1.2.	DESCRIPCIÓN Y ALCANCE DEL PROYECTO PRINCIPAL.....	15
2.	OBJETIVOS.....	16
2.1.	OBJETIVO GENERAL	16
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3.	MARCO TEÓRICO	17
3.1.	PAVIMENTOS.....	17
3.1.1.	<i>Definición</i>	17
3.1.2.	<i>Función y características</i>	18
3.1.3.	<i>Clasificación</i>	18
3.2.	DISEÑO ESTRUCTURAL AASHTO 93	19
3.2.1.	<i>Pavimentos Flexibles</i>	19
3.2.1.1.	Variables de diseño	19
a)	Restricciones de tiempo.....	20
b)	El tránsito	20
c)	Confianza/Confiabilidad	22
3.2.1.2.	Criterios de comportamiento.....	22
3.2.1.3.	Propiedades de los materiales y características estructurales	23
a)	Módulo resiliente de la subrasante.....	23
b)	Coefficiente de capas	24
c)	Drenaje.....	24
3.2.2.	<i>Pavimentos Rígidos</i>	25
3.2.2.1.	Variables de diseño adicionales	25
a)	Módulo de reacción de la subrasante	25
b)	Módulo de ruptura del concreto.....	26
c)	Módulo de Elasticidad del Concreto	27
d)	Coefficiente de transferencia de Carga	28
1.2.3.	<i>Ecuaciones de comportamiento</i>	29
1.2.3.1.	Parámetros de diseño	30
3.2.2.2.	Determinación del número estructural y/o espesor de la losa	31
3.3.	CRITERIOS DE DISEÑO.....	31
3.3.1.	<i>Criterio Multicapa</i>	32
3.3.2.	<i>Criterio Posibilidad de Construcción</i>	33
3.4.	PROGRAMACIÓN EN MATLAB	35
3.4.1.	<i>Métodos Numéricos</i>	35
3.4.2.	<i>Interfaz Gráfica</i>	37
4.	METODOLOGÍA	41
4.1.	CASO DE ESTUDIO: VÍA CERCOPAMBA.....	41
4.1.1.	<i>Ubicación</i>	41
4.1.2.	<i>Geometría</i>	42
4.1.3.	<i>Estado Actual del Pavimento</i>	42
4.1.4.	<i>Clima</i>	43
4.1.5.	<i>Estudio de Tráfico</i>	44
4.1.6.	<i>Estudio de Suelo</i>	47
4.1.7.	<i>Fuentes de Material</i>	53

5.	RESULTADOS	54
5.1.	DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE: VÍA CERCOPAMBA	54
5.1.1.	<i>Solución manual</i>	54
5.1.2.	<i>Solución software</i>	56
5.1.3.	<i>Estructura de Pavimento Final</i>	58
5.1.3.1.	Criterio Multicapa	62
5.1.3.2.	Posibilidad de construcción	65
6.	DISCUSIONES	69
7.	CONCLUSIONES	71
7.1.	LIMITACIONES	73
7.2.	RECOMENDACIONES	73
8.	REFERENCIAS	75
9.	ANEXOS	78
9.1.	ESTUDIO DEL TRÁFICO	78
9.1.1.	<i>Caracterización del tránsito según MTOP 2012</i>	78
9.1.2.	<i>Factor Equivalente de Carga</i>	79
9.2.	ANEXO COEFICIENTES ESTRUCTURALES	79
9.3.	ANEXO MONOGRAMAS DE SOLUCIÓN	82
9.3.1.	<i>Pavimento Flexible</i>	82
9.3.2.	<i>Pavimento Rígido</i>	83
9.4.	ESTADO ACTUAL VÍA CERCOPAMBA	85
9.5.	ESTUDIO DE TRÁFICO	86
9.5.1.	<i>Factores de Expansión del Tráfico</i>	86
9.6.	ESTUDIO DE SUELO	88
9.6.1.	<i>Obtención de CBR por ensayo DCP aplicando la norma ASTM D-6951-03</i>	88
9.6.2.	<i>Fotografías ensayo DCP</i>	91
9.7.	EJECUTABLE APLICACIÓN AASHTO 93	91
9.8.	NÚMEROS ESTRUCTURALES DE LA BASE Y SUBBASE	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Periodos de diseño recomendados por la AASHTO 93.....	20
Tabla 2 Período de análisis para pavimento flexible y rígido.	20
Tabla 3 Factor de distribución de carriles.	21
Tabla 4 Niveles de confiabilidad sugeridos para diferentes carreteras.	22
Tabla 5 Valores de serviciabilidad final recomendados por la AASHTO 93.....	23
Tabla 6 Valores de PSI en base a la condición de la vía recomendados por la AASHTO 93.	23
Tabla 7 Relaciones empíricas para obtener Mr a partir del CBR.....	24
Tabla 8 Niveles de drenaje de la estructura de pavimento.....	24
Tabla 9 Valores de mi recomendados para modificar los coeficientes de capas de base y subbase granulares.	25
Tabla 10 Módulos de Ruptura del Concreto Recomendados.....	27
Tabla 11 Coeficientes de Transferencia de Carga (J).....	28
Tabla 12 Valores de la desviación normal estándar Z_R	30
Tabla 13 Valores de desviación normal estándar.....	31
Tabla 14 Espesores mínimos para diseño de pavimentos por criterio multicapa.	33
Tabla 15 Espesores mínimos para el diseño por criterio posibilidad de construcción.	34
Tabla 16 Proceso iterativo del criterio posibilidad de construcción.	34
Tabla 17 Descripción del estado actual de la vía CERCOPAMBA.....	43
Tabla 18 Datos históricos del tiempo en la parroquia de Guayllabamba.	44
Tabla 19 Estudio del Tráfico Vía CERCOPAMBA.	44
Tabla 20 Volumen diario por medio de factores de expansión.	45
Tabla 21 Tránsito promedio diario por medio de factores de expansión.....	45
Tabla 22 Tránsito promedio diario anual por medio de factores de expansión.	45
Tabla 23 Porcentaje de vehículos livianos y pesados sobre la vía CERCOPAMBA.	46
Tabla 24 Desglose de vehículos pesados sobre la vía CERCOPAMBA.	46
Tabla 25 Cálculo Factor Equivalente de Carga (FCE).	47
Tabla 26 Resultados de prueba DCP en cinco puntos de la vía CERCOPAMBA.....	48
Tabla 27 Resultados obtenidos por medio de la correlación de CBR vs DCP.....	51
Tabla 28 Datos para la determinación del CBR de diseño.....	51
Tabla 29 %CBR de Diseño en función del tipo de tráfico.	52
Tabla 30 Listado de fuentes para la adquisición de materiales pétreos cerca de la parroquia Guayllabamba.	53
Tabla 31 Características de los materiales de construcción para la vía CERCOPAMBA.	54
Tabla 32 Parámetros iniciales de diseño flexible.	55
Tabla 33 Características de las capas del pavimento para la vía CERCOPAMBA.	58
Tabla 34 Coeficientes estructurales y de drenaje para las capas del pavimento de la vía CERCOPAMBA.	61
Tabla 35 Números estructurales por cada resueltos por la aplicación creada.	62
Tabla 36 Espesores resultantes criterio multicapa.....	64
Tabla 37 Números estructurales para nueva configuración de pavimento por criterio multicapa.	64
Tabla 38 Número estructural propuesto por criterio multicapa.....	64

Tabla 39 Diseño de espesores aplicando criterio posibilidad de construcción.....	65
Tabla 40 Espesores y números estructurales propuestos para los tramos empedrados de la vía CERCOPAMBA.	66
Tabla 41 Espesores y números estructurales modificados para tramos sin empedrado.	68
Tabla 42 Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones de Vehículos de Carga Pesada.	78
Tabla 43 Factores de expansión horarios para una carretera rural primaria.	86
Tabla 44 Factores de expansión diarios para una carretera rural primaria.	86
Tabla 45 Factores de expansión mensuales para una carretera rural primaria.....	87
Tabla 46 Hoja de datos DCP - P1.....	88
Tabla 47 Hoja de datos DCP - P2.....	88
Tabla 48 Hoja de datos DCP - P3.....	89
Tabla 49 Hoja de datos DCP - P4.....	89
Tabla 50 Hoja de datos DCP - P5.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sección típica de un pavimento.....	17
Figura 2 Sección transversal típica de un a) Pavimento de Concreto Asfáltico y b) Pavimento de Concreto Hidráulico.	19
Figura 3 Estimación módulo de reacción k en función del CBR.	26
Figura 4 Estructura de pavimento flexible por capas.	32
Figura 5 Extensión App Designer de MATLAB.	38
Figura 6 Interfaz gráfica que resuelve las ecuaciones del AASHTO 93 para pavimentos flexibles.	38
Figura 7 Interfaz gráfica que resuelve las ecuaciones del AASHTO 93 para pavimentos rígidos.	40
Figura 8 Ubicación geográfica parroquia Guayllabamba.....	41
Figura 9 Geometría y perfil de elevación de la vía CERCOPAMBA.	42
Figura 10 Esquema equipo DCP.....	48
Figura 11 Solución manual de SN por medio de Monograma AASHTO 93.	56
Figura 12 Solución de SN por medio del software interactivo para la vía CERCOPAMBA.	57
Figura 13 Estructura de pavimento final para las zonas sin empedrado en la vía CERCOPAMBA.	66
Figura 14 Estructura de pavimento final para los tramos empedrados en la vía CERCOPAMBA.	67
Figura 15 Estructura de pavimento modificada para las zonas sin empedrado de la vía CERCOPAMBA.	68
Figura 16 Fórmulas para la determinación de los factores de ejes equivalentes.	79
Figura 17 Cuadro de diseño para pavimentos flexibles basado en el uso de valores medios para cada entrada.	82
Figura 18 Cuadro de diseño para pavimentos rígidos basado en el uso de valores medios para cada entrada.	84
Figura 19 Solución del SN de la base con 80% de CBR por medio de la aplicación creada.....	92
Figura 20 Solución del SN de la subbase con 30% de CBR por medio de la aplicación creada. ...	92

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Correlación de %CBR de laboratorio vs Índice DCP de campo.	49
Gráfico 2 Índice DCP para los cinco puntos de análisis de la vía CERCOPAMBA.	50
Gráfico 3 Determinación CBR de Diseño.	52
Gráfico 4 Solución coeficiente estructural para la rodadura (a1).	59
Gráfico 5 Solución coeficiente estructural para la base (a2).	60
Gráfico 6 Solución coeficiente estructural para la subbase (a3).	60
Gráfico 7 Coeficiente estructural (a1) en función del módulo resiliente del concreto asfáltico.	79
Gráfico 8 Coeficiente estructural (a2) en función de varios parámetros de resistencia de la base granular.	80
Gráfico 9 Coeficiente estructural (a2) en bases tratadas con cemento para diferentes parámetros de resistencia.	80
Gráfico 10 Coeficiente estructural (a2) en bases tratadas con asfalto para diferentes parámetros de resistencia.	81
Gráfico 11 Coeficiente estructural (a3) con diferentes parámetros de resistencia para la subbase.	81

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La construcción de una infraestructura vial no se puede completar sin el diseño adecuado de su estructura de pavimento. El pavimento o rodadura le proporciona a la carretera características superficiales de uniformidad, color y textura apropiadas considerando las preferencias del usuario. Sin embargo, la función principal de esta estructura es soportar las cargas cíclicas del tránsito durante el período para la cual fue diseñada. Estas cargas generan esfuerzos que deben ser transmitidos de forma continua y uniforme a la subrasante, evitando su excesiva deformación. Esta deformación depende directamente del diseño del pavimento, por ello es fundamental diseñarlo correctamente.

La AASHTO (Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte) permite diseñar pavimentos flexibles (a base de mezcla asfáltica) y rígidos (a base de hormigón) mediante ecuaciones empíricas y conceptos probabilísticos basados en los resultados de la pista de prueba realizada en "Ottawa, Illinois a finales de los años 50's e inicio de los años 60's" (Boada, 2020). Estas ecuaciones de comportamiento no lineales se deben resolver empleando métodos numéricos, lo cual es un proceso complejo. Por ello, también se pueden resolver a través de monogramas que facilitan el proceso de diseño; pero no siempre dan resultados exactos.

Ante tal situación, el ingeniero colombiano Luis Ricardo Vásquez Varela y muchos más, han desarrollado aplicaciones que resuelven de manera exacta y rápida las ecuaciones de la metodología AASHTO 93 para el diseño de pavimentos tanto flexibles como rígidos. Para pavimentos flexibles, los softwares dan como resultado un número estructural (SN) del

pavimento necesario para diseñarlo. En cambio, para pavimentos rígidos esta metodología diseña directamente el pavimento ya que permite obtener su espesor requerido (D). De tal forma, crear una aplicación que resuelva estas ecuaciones resulta ser una opción muy ventajosa.

1.2. Descripción y alcance del proyecto principal

La interfaz del Ing. Vásquez es una herramienta muy útil para la resolución de las ecuaciones de la metodología AASHTO 93 como se mencionó anteriormente. Sin embargo, Ecuador no cuenta con una interfaz similar, a pesar de que la normativa AASHTO se aplique diariamente en el diseño de carreteras de este país. Por lo tanto, este proyecto se enfoca en la resolución de las ecuaciones de la metodología AASHTO 93 mediante la programación en Matlab de un nuevo software interactivo. Con la finalidad de generar una aplicación de autoría totalmente ecuatoriana que pueda ser utilizada por estudiantes de pregrado en ingeniería civil, maestros y profesionales alrededor del país.

De manera complementaria, en este trabajo se presenta el diseño de una estructura de pavimento aplicando correctamente la metodología AASHTO 93 de forma empírica – manual en un caso de estudio específico ubicado en la Parroquia Guayllabamba cantón Quito, provincia de Pichincha. Debido a que también es fundamental dominar el uso de los monogramas de resolución de estas ecuaciones para aplicaciones tanto académicas como laborales; se diseña un pavimento flexible para la vía CERCOPAMBA manualmente. Los resultados obtenidos de este método manual se comprueban aplicando la interfaz que se pretende programar en este trabajo final con el objetivo de demostrar su funcionalidad y eficacia.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Crear un software interactivo que resuelva las ecuaciones de la metodología AASHTO 93 para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos.

2.2. Objetivos Específicos

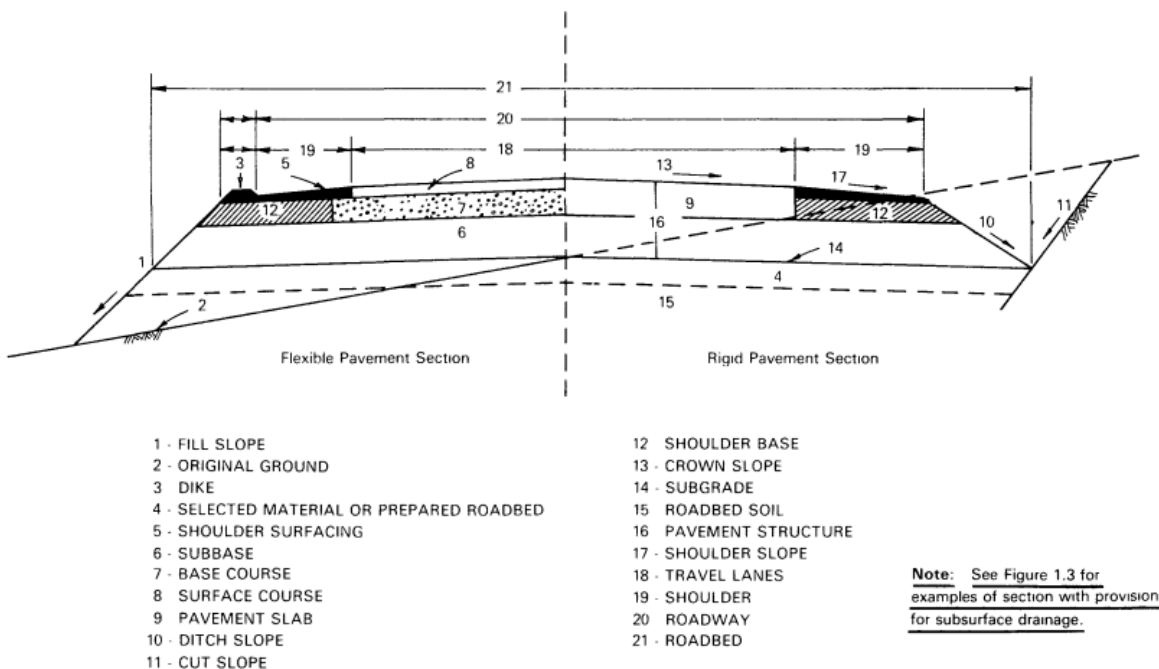
- Aprender el lenguaje apropiado de programación empleado para generar líneas de código en el programa MATLAB.
- Programar lógica y eficientemente un código que resuelva las ecuaciones para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos según la AASHTO.
- Generar una interfaz gráfica (GUI) que le permita al usuario interactuar con este código sin manipularlo directamente utilizando la extensión de MATLAB "App Designer".
- Aplicar adecuadamente la metodología AASHTO 93 en el diseño de un pavimento flexible para la carretera CERCOPAMBA ubicada Parroquia Guayllabamba cantón Quito.
- Comprobar la funcionalidad y eficacia del software en el diseño del pavimento del caso antes mencionado.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Pavimentos

3.1.1. Definición

El pavimento se define como la capa o conjunto de capas sobrepuestas que se deben diseñar y construir con materiales adecuadamente compactados sobre la subrasante de una vía (Montejo, 2002). La subrasante constituye el último nivel antes del suelo que denota los rasgos fundamentales del diseño geométrico en planta y en elevación del proyecto. Las capas estratificadas de la estructura de pavimento se apoyan en la subrasante con la finalidad de transmitir los esfuerzos que las cargas cíclicas del tránsito producen durante el período de vida útil (Montejo, 2002). Una sección transversal típica de pavimento se puede observar en la figura:



Structural Design Terms

Figura 1 Sección típica de un pavimento.

Fuente: (AASHTO, 1993).

3.1.2. Función y características

La función principal del pavimento es soportar las cargas impuestas por cualquier tipo de tráfico (automóvil, camión o aviones) sin deformarse excesivamente (Mallick & El-Korchi, 2013). Esta estructura también debe proporcionarle a la carretera características superficiales de uniformidad, color y textura adecuados, que permitan “el tránsito expedito de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía previstos del proyecto” (Rico & Del Castillo, 1981).

Para que la estructura de pavimento pueda cumplir favorablemente estas funciones, debe cumplir los siguientes requisitos: resistir los efectos de la intemperie, tener una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación vial, resistir el desgaste producido por la fricción de las llantas de los vehículos, denotar una regularidad superficial tanto longitudinal como transversal, presentar condiciones apropiadas de drenaje, y poseer un color apropiado que eviten reflejos y deslumbramientos (Montejo, 2002). Finalmente, el pavimento debe ser lo suficientemente durable y económico para moderar el ruido de contacto que se genera entre el vehículo y la rodadura y asegurar comodidad y seguridad vial (Montejo, 2002).

3.1.3. Clasificación

Los pavimentos se clasifican generalmente en tres tipos: flexibles, rígidos y articulados (Boada, 2020). El pavimento flexible está conformado por una carpeta asfáltica apoyada típicamente encima de dos capas granulares (base y subbase) soportadas en el suelo compactado o subrasante (Papagiannakis & Masad, 2007). Por otro lado, el pavimento rígido consiste en una losa de hormigón que puede estar apoyado directamente sobre la subrasante o sobre una capa intermedia de ser necesario, como se muestra a continuación (Papagiannakis & Masad, 2007):

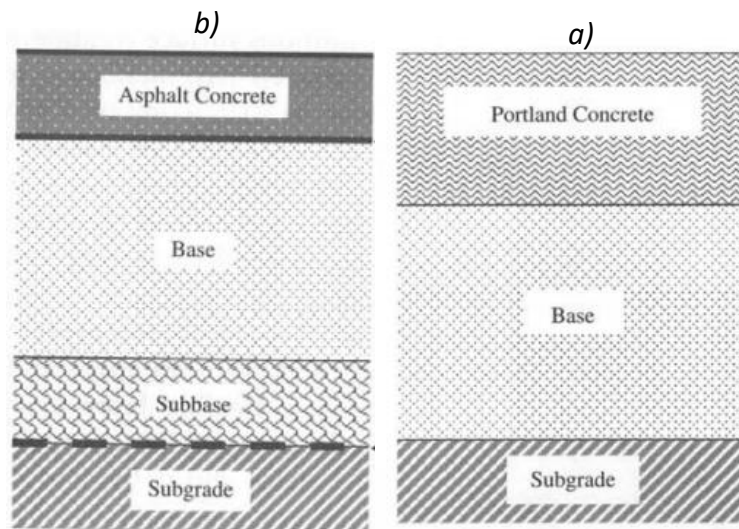


Figura 2 Sección transversal típica de un a) Pavimento de Concreto Asfáltico y b) Pavimento de Concreto Hidráulico.

Fuente: (Papagiannakis & Masad, 2007).

3.2. Diseño Estructural AASHTO 93

3.2.1. Pavimentos Flexibles

Los pavimentos flexibles y rígidos se pueden diseñar mediante el método de regresión AASHTO 93 basado en el comportamiento del pavimento o prueba en carretera (Huang, 2004). En 1972 la AASHTO desarrolló una guía provisional de diseño de pavimentos flexibles y rígidos basada en los resultados del AASHTO ROAD TEST y en los procedimientos de diseño existentes en aquella época (Montejo, 2002). No obstante, en 1993 actualizó esta guía incorporando nuevas consideraciones y variables de diseño que se estudian a continuación:

3.2.1.1. Variables de diseño

Para aplicar el método de diseño AASHTO 93 el análisis de los siguientes parámetros es fundamental (Montejo, 2002):

a) *Restricciones de tiempo*

Para considerar la variable tiempo es necesario diferenciar entre el periodo de diseño y periodo de análisis de la vía. El periodo de diseño se define como el tiempo estratégico para diseñar el pavimento y está en función de las condiciones del camino:

Tabla 1 *Periodos de diseño recomendados por la AASHTO 93.*

Condiciones de la Carretera	Periodo de Diseño (años)
Alto volumen urbano	30 – 50
Alto volumen rural	20 – 50
Bajo volumen pavimentado	15 – 25
Bajo volumen revestido	10 – 20

Fuente: (AASHTO, 1993) – Elaboración propia.

En cambio, el periodo de análisis se refiere “al tiempo que existe entre la condición inicial del pavimento hasta el instante que necesita rehabilitación” (Montejo, 2002). Generalmente se emplea los siguientes periodos de análisis en función del tipo de pavimento:

Tabla 2 *Periodo de análisis para pavimento flexible y rígido.*

Tipo de Pavimento	Período de Análisis (años)
Flexible	10 - 20
Rígido	20 - 35

Fuente: (Yáñez, 2012) – Elaboración propia.

b) *El tránsito*

El efecto de tránsito en el diseño de pavimentos se considera calculando el número de ejes equivalentes de 18 Kips (W_{18}) o ESAL's (AASHTO, 1993). Para calcular el W_{18} se requiere información sobre las cargas por eje del vehículo, su configuración y el número de aplicaciones

sobre la vía, es decir, un estudio del tránsito promedio diario anual (TPDA) sobre el carril de diseño. Las cargas del tráfico se obtienen mediante la siguiente ecuación:

$$W_{18} = N(8.2 \text{ Ton}) = \left(\frac{TPDA_f + TPDA_o}{2} \right) \times 365 \times n \times D_t \times FCE \times L_d \quad (1)$$

Donde n es el periodo de análisis, D_t es el factor de distribución direccional que para la mayoría de carreteras es igual 0.5 (AASHTO, 1993), FCE es el factor equivalente de cargas que se obtiene de una proyección del tránsito diario anual en la vía, y L_d es el factor de distribución de carriles que se escoge en base a la siguiente tabla:

Tabla 3 Factor de distribución de carriles.

Número de Carriles en Ambas Direcciones	Porcentaje del Tráfico ESAL 18-kip en el carril de diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4 o más	50-75

Fuente: (AASHTO, 1993) – Elaboración propia.

El TPDA inicial de la ecuación (1) se obtiene por medio de una proyección del tránsito en una sección de la vía de análisis. Esta proyección considera la configuración, magnitud y repeticiones de un tránsito fijo dado por vehículos pesados que se exponen en el anexo 9.1. El TPDA final de la vía se obtiene en función del crecimiento poblacional (g) de la ubicación del caso de estudio.

Donde g está dada por $g = \frac{\text{Tasa de crecimiento}}{100}$ y se emplea para determinar el volumen de tráfico esperado durante el período de análisis:

$$TPDA_f = TPDA_o(1 + g)^n \quad (2)$$

c) *Confianza/Confiabilidad*

La confiabilidad hace referencia a la probabilidad de comportamiento satisfactorio de la sección de pavimento bajo las condiciones ambientales y de carga durante el periodo de diseño (Montejo, 2002). A continuación se presentan los niveles de confianza recomendados para diferentes tipos de carreteras en base a su clasificación funcional:

Tabla 4 Niveles de confiabilidad sugeridos para diferentes carreteras.

Clasificación Funcional	Nivel de Confianza Recomendado (%)	
	Urbano	Rural
Interestatal y autopistas	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 95
Calles colectoras	80 – 95	75 – 95
Calles locales	50 – 80	50 – 80

Fuente: (AASHTO, 1993) – Elaboración propia.

3.2.1.2. Criterios de comportamiento

Un criterio fundamental para diseño de pavimentos es la serviciabilidad (AASHTO, 1993). La serviciabilidad se define como la capacidad de un pavimento para servir al tránsito en un periodo de tiempo determinado en función de la perspectiva del usuario (Montejo, 2002). Este criterio se evalúa con el índice de servicio “el cual varía de cero (carretera imposible) hasta 5 (carretera perfecta)” (Montejo, 2002) y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta PSI = P_o - P_t \quad (3)$$

Donde P_o es el índice de servicio inicial que puede tener valores de 4.2 – 4.5 (Yáñez, 2012) y P_t es la serviciabilidad final que se obtiene según el tipo de carretera:

Tabla 5 Valores de serviciabilidad final recomendados por la AASHTO 93.

Tipo de carretera	Serviciabilidad final P_t
Autopistas	3.0
Carreteras de importancia media	2.5
Carreteras de importancia baja	2.0

Fuente: (AASHTO, 1993) – Elaboración propia.

De esta forma, la condición de servicio de la vía se puede evaluar en base a la tabla a continuación:

Tabla 6 Valores de PSI en base a la condición de la vía recomendados por la AASHTO 93.

Escala	Índice de Servicio
Muy bueno	5.0
Bueno	4.0
Regular	3.0
Malo	2.0
Muy malo	1.0

Fuente: (AASHTO, 1993) – Elaboración propia.

3.2.1.3. Propiedades de los materiales y características estructurales

a) Módulo resiliente de la subrasante

El módulo resiliente de subrasante (M_r) se obtiene por medio del CBR medido en campo o laboratorio (Montejo, 2002). El CBR (California Bearing Ratio) evalúa la calidad de la subrasante, subbase y base de un pavimento midiendo la resistencia al corte del suelo (Mallick & El-Korchi, 2013). Por tanto, se puede obtener el módulo resiliente para distintos valores de CBR como se muestra en la tabla a continuación:

Tabla 7 Relaciones empíricas para obtener M_r a partir del CBR.

Fórmula	Condición
$M_r = 1500(\text{CBR})$	CBR < 10%
$M_r = 2555(\text{CBR})^{0.64}$	10% < CBR < 20%
$M_r = 4326 \times \ln(\text{CBR}) + 241$	CBR de suelos granulares

Fuente: (Yáñez, 2012) – Elaboración propia.

b) Coeficiente de capas

El método diseño AASHTO 93 asigna un coeficiente (a_i) que mide el comportamiento estructural de los materiales de cada capa del pavimento (Montejo, 2002). Estos coeficientes permiten obtener los espesores reales a partir de números estructurales (SN) (Montejo, 2002). La metodología AASHTO 93 presenta gráficos para estimar los coeficientes estructurales de la capa superficial de rodadura asfáltica a_1 , la base granular a_2 , y la subbase granular a_3 . También presenta los gráficos para estimar los coeficientes estructurales de la base y subbase tratadas con cemento o mezclas bituminosas, los cuales se exponen en el anexo 9.2.

c) Drenaje

La calidad de drenaje en el diseño de un pavimento es un parámetro cualitativo y cuantitativo que queda a criterio del ingeniero a cargo del proyecto y se escoge en función a la siguiente tabla:

Tabla 8 Niveles de drenaje de la estructura de pavimento.

Calidad del Drenaje	Término para remoción del agua
Excelente	2 horas
Buena	1 día
Aceptable	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	(El agua no drena)

Fuente: (AASHTO, 1993) – Elaboración propia.

La metodología AASHTO 93 recomienda, en función de la calidad de drenaje del pavimento y el tiempo en el año de exposición a niveles de humedad cercanos a la saturación, los siguientes factores aplicables a las capas granulares:

Tabla 9 Valores de mi recomendados para modificar los coeficientes de capas de base y subbase granulares.

Calidad del drenaje	% de tiempo de exposición de la estructura de pavimento a nivel de humedad próximos a la saturación			
	<1%	1-5%	5-25%	>25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Aceptable	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Fuente: (AASHTO, 1993) – Elaboración propia.

3.2.2. Pavimentos Rígidos

Para diseñar pavimentos rígidos por medio de la AASHTO se utiliza el CBR para obtener el módulo de reacción k de la subrasante, y se añaden al diseño cuatro variables más que se detallan a continuación:

3.2.2.1. Variables de diseño adicionales

a) Módulo de reacción de la subrasante

El módulo de reacción de la subrasante (k) da un valor del asentamiento de la subrasante al aplicarse un esfuerzo de compresión (Fuentes, 2017). Analíticamente, el módulo de reacción se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\sigma}{\delta} \quad (4)$$

Donde σ es el esfuerzo aplicado sobre un área de carga y δ la deflexión en pulgadas para dicho esfuerzos. “Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada (pci)” (Fuentes, 2017). Para obtener el módulo k se requiere de una prueba de carga sobre placa. Sin embargo, esta prueba es de alto costo y requiere de mucho tiempo, por ello se puede estimar el valor de k mediante el CBR (Yáñez, 2012):

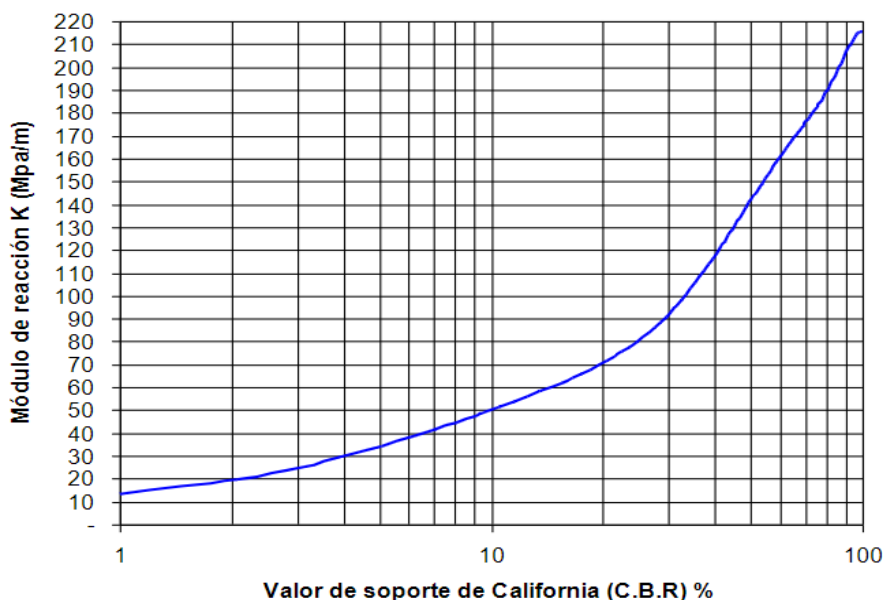


Figura 3 Estimación módulo de reacción k en función del CBR.

Fuente: (Yáñez, 2012).

b) Módulo de ruptura del concreto

El módulo de ruptura controla el fisuramiento por fatiga en el hormigón causado por las cargas del tránsito (Fuentes, 2017). Este módulo se obtiene mediante la siguiente correlación en función del módulo de reacción (k) y la resistencia especificada por diseño del concreto (f'_c):

$$S'_c = k (f'_c)^{0.5} \quad (5)$$

Para emplear esta correlación el valor del módulo de reacción debe estar entre $7 < k < 12$. Si es que esta condición no se cumple, la guía AASHTO 93 recomienda los siguientes valores de módulo de ruptura en función del tipo de carretera:

Tabla 10 Módulos de Ruptura del Concreto Recomendados.

Tipo de Carretera	Módulos de Ruptura Recomendados (S'c)	
	kg/cm ²	psi
Autopista	48.0	682.7
Carreteras	48.0	682.7
Zonas Industriales	45.0	640.1
Urbanas Principales	45.0	640.1
Urbanas Secundarias	42.0	597.4

Fuente: (AASHTO, 1993) – Elaboración propia.

c) Módulo de Elasticidad del Concreto

El módulo de elasticidad relaciona las deformaciones causadas por los esfuerzos de tensión en el hormigón (Fuentes, 2017). En pavimentos rígidos el módulo de elasticidad y los coeficientes de expansión térmica y contracción, rigen el diseño estructural de la losa de hormigón. El módulo de elasticidad para hormigones de densidad normal se puede obtener mediante la siguiente ecuación presentada por (ACI 318-19, 2019):

$$E_c = 57000\sqrt{f'_c} \quad (6)$$

Donde E_c es el módulo de elasticidad del hormigón y f'_c la resistencia especificada por diseño del concreto, ambos en unidades de (psi).

d) *Coefficiente de transferencia de Carga*

Con el fin de reducir las deflexiones excesivas en las juntas de un pavimento rígido, las cargas del tránsito deben transmitirse efectivamente, lo cual se mide mediante el coeficiente de transferencia de carga J (Fuentes, 2017). Se puede tener tres casos de transferencia de cargas en una junta transversal losa – losa, para los cuales se recomienda un rango de valores específicos dados por la AASHTO 93 que “establece rangos de los coeficientes de transferencia de carga para diferentes condiciones desarrolladas a partir de la experiencia y del análisis mecánico de esfuerzos” (Fuentes, 2017). Estos valores dependen del estudio del tráfico del proyecto, del soporte lateral del pavimento y su tipo de junta transversal:

Tabla 11 *Coefficientes de Transferencia de Carga (J).*

Soporte Lateral	<i>Si</i>	<i>No</i>	<i>Si</i>	<i>No</i>	<i>Si</i>	<i>No</i>	Tipo de Carretera
ESAL's	<i>Con pasadores con o sin refuerzo de temperatura</i>		<i>Con refuerzo continuo</i>		<i>Sin pasadores (fricción entre agregados)</i>		
Hasta 0.3	2.7	3.2	2.8	3.2	-	-	Calles y caminos vecinales
0.3 – 1	2.7	3.2	3.0	3.4	-	-	
1 – 3	2.7	3.2	3.1	3.6	-	-	
3 – 10	2.7	3.2	3.2	3.8	2.5	2.9	Caminos principales y autopistas
10 – 30	2.7	3.2	3.6	4.3	2.6	3.0	
Más de 30	2.7	3.2	3.6	4.3	2.6	3.1	

Fuente: (AASHTO, 1993) – Elaboración propia.

1.2.3. Ecuaciones de comportamiento

La información obtenida por la AASHTO ROAD TEST para pavimentos flexibles y rígidos se refleja en las ecuaciones [7] y [8] respectivamente. Este método es aplicable únicamente “para vías con tránsito superior a 0.05×10^6 ejes equivalentes de 8.2 toneladas” (Montejo, 2002) y se basan en las ecuaciones de comportamiento que se describen a continuación. Es importante resaltar que este método da resultados diferentes para cada tipo de pavimento.

Para un pavimento flexible, da como resultado el número estructural SN necesario para diseñar este tipo de pavimento. En cambio, para los pavimentos rígidos, da como resultado directamente el espesor de la losa requerido en función de los requerimientos estructurales del proyecto. Estas diferencias son transcendentales porque implican que para los pavimentos flexibles aún se requiere realizar un paso más, que es precisamente diseñar el espesor del pavimento mediante dos criterios que se estudian en secciones posteriores.

- Pavimentos Flexibles

$$\log W_{18} = Z_R \times S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_r) - 8.07 \quad (7)$$

- Pavimentos Rígidos

$$\log W_{18} = Z_R \times S_o + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32P_t) \times \log \left[\frac{S'_c \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \times \left(D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}}\right)} \right] \quad (8)$$

Donde para ambas ecuaciones W_{18} es el número estimado de ejes equivalentes de 18 Kips (8.2 toneladas), Z_R es la desviación normal estándar, S_o es el error estándar en la predicción de la capacidad del pavimento, SN es el número estructural, ΔPSI es la diferencia entre el índice de servicio inicial y final (se obtiene por medio de la ecuación 2), M_r es el módulo resiliente de la subrasante, D es el espesor de la losa para pavimentos rígidos, P_t índice de serviciabilidad final, S'_c es el módulo de ruptura de la subrasante, C_d o m el coeficiente de drenaje, J el coeficiente de transferencia de carga, E_c el módulo de elasticidad del concreto y k el módulo de reacción de la subrasante del suelo (AASHTO, 1993).

1.2.3.1. Parámetros de diseño

Los valores de la desviación normal estándar Z_R para diferentes niveles seleccionados de confianza unilateral se presentan en la tabla a continuación (Papagiannakis & Masad, 2007):

Tabla 12 Valores de la desviación normal estándar Z_R .

% Confiabilidad	Z_R
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
95	-1.645
99	-2.327
99.9	-3.090

Fuente: (Papagiannakis & Masad, 2007) – Elaboración propia.

Por otro lado, el S_o “combina los errores estándar en la predicción de la carga de tráfico (W_{18}) y en la predicción del rendimiento hasta el final de la vida funcional de un pavimento ($PSI = 2.0$)” (Papagiannakis & Masad, 2007). En base a varios análisis, se ha logrado establecer los siguientes valores recomendados de desviación normal estándar para pavimentos flexibles como rígidos:

Tabla 13 Valores de desviación normal estándar.

Pavimentos Rígidos	
$S_o = 0.30$	$S_o = 0.40$
Pavimentos Flexibles	
$S_o = 0.40$	$S_o = 0.50$

Fuente: (Yáñez, 2012) – Elaboración propia.

3.2.2.2. Determinación del número estructural y/o espesor de la losa

Las ecuaciones de regresión del AASHTO 93 nos permiten obtener el número estructural (SN) necesario para el diseño de un pavimento flexible y el espesor de la losa para un pavimento rígido. El número estructural (SN) “es un número abstracto, que expresa la resistencia estructural de un pavimento, para una combinación dada de soporte del suelo (M_R), del tránsito total (W_{18}), de la serviciabilidad terminal, y de las condiciones ambientales” (Montejo, 2002). Las ecuaciones del AASHTO 93 son muy complejas de resolver por métodos tradicionales. Por ello, se tienen la opción de resolución manual mediante los monogramas que se muestran en el anexo 9.3.

3.3. Criterios de Diseño

Como se mencionó en la sección anterior, el método AASHTO 93 da como resultado únicamente el número estructural para pavimentos flexibles. El valor del número estructural es necesario para obtener los espesores de las capas requeridas para este tipo de pavimento. Para esto, existen dos criterios que se utilizan para obtener los espesores y completar el diseño del pavimento: el multicapa y posibilidad de construcción. Ambos criterios buscan identificar “un conjunto de capas cuyos espesores, convenientemente combinados, proporcionen la capacidad portante dada por SN” (Montejo, 2002):

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3 \quad (9)$$

Donde a_1 es el coeficiente estructural de la capa 1 (generalmente asfáltica por eso no tiene coeficiente de drenaje m) y D_1 el espesor de cada capa, y así sucesivamente. La diferencia entre ambos criterios radica en ciertas consideraciones que se detallan a continuación:

3.3.1. Criterio Multicapa

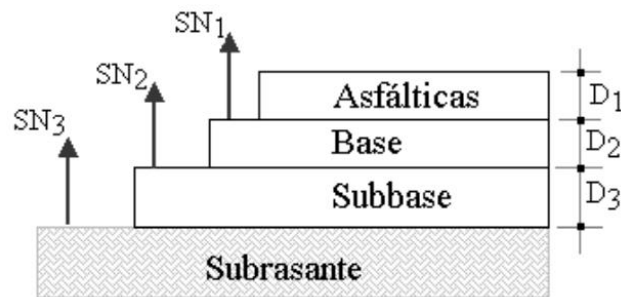


Figura 4 Estructura de pavimento flexible por capas.

Fuente: (Boada, 2020).

El criterio multicapa como su nombre lo indica, considera la resistencia de la subrasante y de los materiales granulares por cada capa. Es decir, estudia la distribución de esfuerzos en cada capa individualmente. Tomando como ejemplo la figura 5 y en base a la ecuación general (8), los espesores mediante este criterio se calculan de la siguiente manera (AASHTO, 1993):

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad (10)$$

$$D_2 \geq \frac{(SN_2 - a_1 D_1)}{a_2 m_2} \quad (11)$$

$$D_3 \geq \frac{(SN_3 - a_1 D_1 - D_2 a_2 m_2)}{a_3 m_3} \quad (12)$$

Para determinar el espesor de cada capa, se resta la resistencia de la capa anterior. Esto con el fin de obtener un diseño realista en función de los esfuerzos que se producen en cada capa que compone la estructura de pavimento. En este proceso, la incógnita es el espesor y el SN que se obtiene en función de las características de cada capa. Para comprobar si los espesores obtenidos son funcionales, la AASHTO recomienda los siguientes espesores mínimos:

Tabla 14 Espesores mínimos para diseño de pavimentos por criterio multicapa.

Ejes W18	Capas Asfálticas (mm)	Capa Base (mm)
<50 000	30	100
50 001 – 150 000	60	100
150 001 – 500 000	75	100
500 001 – 2 000 000	90	150
2 000 001 – 7 000 000	100	150
>7 000 000	120	150

Fuente: (AASHTO, 1993) – Elaboración Propia.

La funcionalidad de este criterio se explicará más detalladamente en el caso de estudio.

3.3.2. Criterio Posibilidad de Construcción

El criterio posibilidad de construcción en cambio solo considera la resistencia portante del suelo de la subrasante. Es decir, no calcula otros números estructurales SN para el resto de las capas, sino únicamente para la subrasante. Además, este proceso es netamente iterativo hasta obtener un SN mayor o igual al SN requerido por la estructura de pavimento (Boada, 2020).

El proceso requiere de escoger espesores iniciales para cada una de las capas en base a las recomendaciones dadas por la AASHTO en la tabla a continuación:

Tabla 15 Espesores mínimos para el diseño por criterio posibilidad de construcción.

Ejes W18	Capas Asfálticas (mm)	Capa Base (mm)
<50 000	TSD	100
50 001 – 150 000	50	100
150 001 – 500 000	60	100
500 001 – 2 000 000	75	150
2 000 001 – 7 000 000	90	150
>7 000 000	100	150

Fuente: (Yáñez, 2012) – Elaboración Propia.

De esta forma, el proceso consiste en ir realizando una multiplicación por capas del espesor con su respectivo coeficiente estructural y coeficiente de drenaje que sumados den el SN requerido por el pavimento. Este proceso de cálculo iterativo se detalla en la tabla a continuación:

Tabla 16 Proceso iterativo del criterio posibilidad de construcción.

Capas	Coeficiente Estructural	Coeficiente de Drenaje	Espesores (cm)	Número Estructural (SN)
1	a_1	-	D_1	$a_1 D_1$
2	a_2	m_2	D_2	$a_2 m_2 D_2$
3	a_3	m_3	D_3	$a_3 m_3 D_3$
SN TOTAL				Ecuación (9)

Fuente: (Yáñez, 2012) – Elaboración Propia.

Asimismo, la funcionalidad de este criterio se explicará más detalladamente en la obtención de los espesores del caso del estudio en secciones posteriores.

3.4. Programación en MATLAB

Uno de los objetivos principales de este trabajo final es la creación de una aplicación, capaz de resolver las ecuaciones del AASHTO 93, de autoría totalmente ecuatoriana. Para ello, se escogió la plataforma de programación y cálculo numérico: MATLAB. Se utiliza este programa por su versatilidad para “analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos matemáticos como científicos” (MathWorks, 1994). Pero también por su extensión App Designer que permite desarrollar una interfaz gráfica amigable con el usuario, a pesar de que el autor del programa no sea un desarrollador de software profesional (MathWorks, 1994).

3.4.1. Métodos Numéricos

Las ecuaciones [7] y [8] del AASHTO 93 no se puede resolver por métodos convencionales, por lo que se empleó métodos numéricos. Un método número es un proceso por medio del cual se obtiene una solución a problemas matemáticos realizando cálculos aritméticos y lógicos (Seminario, s. f.). Además, su procedimiento genera instrucciones precisas “que especifican una secuencia de operaciones algebraicas y lógicas que producen una aproximación de la solución del problema (solución numérica) o un mensaje” (Seminario, s. f.).

La serie de algoritmos empleados para encontrar la solución de las ecuaciones del AASHTO 93 empiezan creando la siguiente función anónima en MATLAB:

```
(1) f = @(SN) Zr*So + 9.36*log10(SN+1) - 0.20 + (log10(dPSI/(4.2-1.5)))/(0.40+(1094/(SN+1)^5.19)) + 2.32*log10(Mr) - 8.07 - log10(w18);
```

Donde f es el nombre de la función, $@(SN)$ es la variable y el resto como se puede observar es la ecuación [8] de comportamiento para pavimentos flexibles. Esto crea un handle en MATLAB con el nombre de la función, es este caso f . Si escribimos en la ventana de comandos $f(3)$,

inmediatamente MATLAB realiza las operaciones descritas en la ecuación reemplazando el número 3 en vez del SN en la ecuación. Esto evidencia que SN no es realmente una variable en esta línea de código, sino más bien un comodín para encontrar una solución.

Por tanto, el método numérico consiste en utilizar la función `fzero` de Matlab para saber cuándo nuestra función es igual a cero por medio de la línea de código siguiente:

```
(2) SN = fzero(f,3);
```

SN ahora es la variable que queremos encontrar por medio del comando `fzero(f,3)` de la función `f` donde el número 3 que se ingresa es una estimación inicial. Sin embargo, la función `fzero` de Matlab solo encuentra el cero de una ecuación. Por tanto, para aplicar este principio para resolver las ecuaciones [7] y [8], pasamos el $\log W_{18}$ a restar al otro lado de la ecuación:

```
(1) f = @(SN) Zr*So + 9.36*log10(SN+1) - 0.20 + (log10(dPSI/(4.2-1.5)))/(0.40+(1094/(SN+1)^5.19)) + 2.32*log10(Mr) - 8.07 - log10(w18);
```

De esta forma estamos aislando al cero para que Matlab encuentre el SN necesario para que la ecuación en su totalidad sea igual a cero. Por tanto, si encontramos el SN que hace igual a cero a la función, encontramos el SN de nuestro problema. En otras palabras, encontramos la solución para las ecuaciones [7] y [8] no lineales del AASHTO 93. La estimación inicial para aplicar este método proviene de un análisis previo de un pavimento realizado en las clases de “Diseño de Pavimentos” de la Universidad San Francisco de Quito. No obstante, se pudo haber utilizado otra estimación inicial en base a los valores que el SN puede tomar.

Este mismo principio se aplicó para la resolución de la ecuación de comportamiento [8] para pavimentos rígidos. Para la cual, de la misma forma, se programó la ecuación no lineal, se le

igual a cero y se utilizó la función `fzero` para encontrar la solución que haga cero la ecuación y nos del valor del espesor (D) requerido por nuestro problema:

Función anónima:

```
g = @(D) Zr*So + 7.35*log10(D+1) - 0.006 + (log10(dPSI/(4.5-1.5)))/
(1+(1.624e7/(D+1)^8.46)) + (4.22 - 0.32*PSIf) * log10((Sc*Cd*((D^0.75) -
1.132))/(215.63*J*((D^0.75) - (18.42/((Ec/k)^0.25)))))) - log10(w18);
```

Método Numérico:

```
D = fzero(g, 7);
```

En la práctica, el valor que nos interesa obtener es precisamente el espesor (D) y el número estructural (SN) previamente calculados. Por tanto, en la interfaz gráfica se utiliza estas operaciones matemáticas para que el usuario pueda obtener directamente estos valores. La resolución matemática de las ecuaciones [7] y [8] fue hecha inicialmente MATLAB, debido en que en la ventana de comandos de este programa es más fácil verificar los resultados y corregir errores de cálculo. Una vez resuelta esta parte, el siguiente paso fue crear la aplicación:

3.4.2. Interfaz Gráfica

Una de las razones por la cual se escogió MATLAB como plataforma de programación para este trabajo, fue su versatilidad para poder crear aplicaciones profesionales por medio de su extensión App Designer. En App Designer se puede realizar desde análisis de imágenes, vínculo de datos, hasta mostrar ejes especializados, crear tablas, consultar datos de un sitio web, pasar datos entre aplicaciones y mostrar/animar los estados de vuelos reales (MathWorks, 1994). Esta extensión interactiva se muestra a continuación:

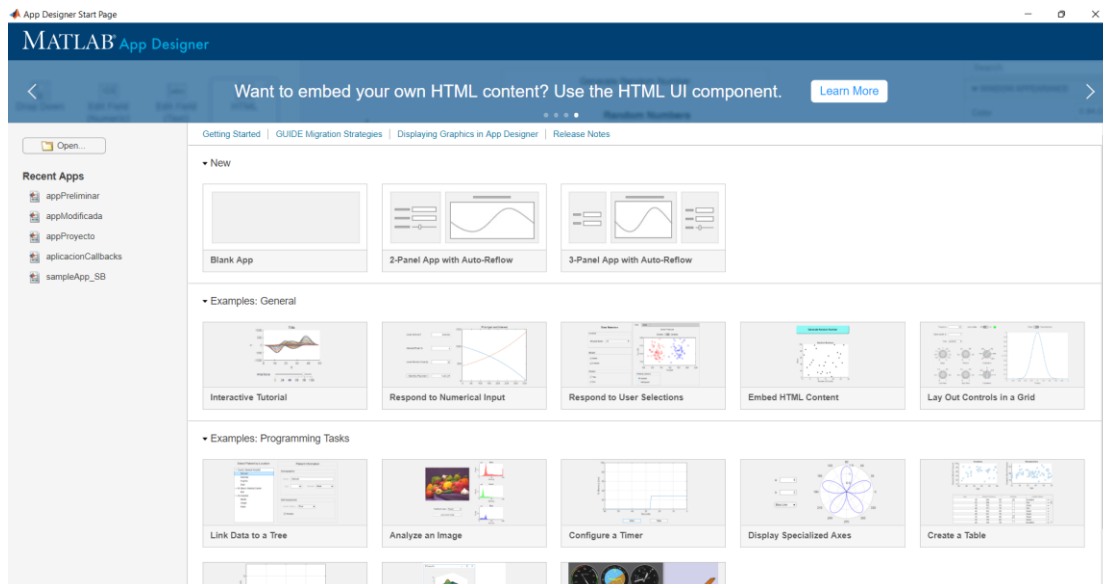


Figura 5 Extensión App Designer de MATLAB.

En este caso se utilizó esta versátil extensión para programar la siguiente interfaz gráfica que resuelve las ecuaciones del AASHTO 93:

Figura 6 Interfaz gráfica que resuelve las ecuaciones del AASHTO 93 para pavimentos flexibles.

La figura 8 muestra la versión final de la interfaz gráfica de este trabajo final. En primer lugar, la aplicación le permite escoger al usuario el tipo de pavimento que desea diseñar. Si el usuario desea diseñar pavimentos flexibles (que es la opción por default) debe seguir los siguientes pasos:

- 1) Ingresar los valores de serviciabilidad y desviación estándar S_o .
- 2) Escoger la confiabilidad en porcentaje requerida para el proyecto.
- 3) Ingresar el valor del CBR en % de la subrasante.
- 4) Calcular el módulo resiliente de la subrasante a través del CBR y el botón calcular M_r .
- 5) Ingresar los valores de TPDA inicial y final, L_d , D_t , n , y FCE para calcular el número de ejes equivalentes W_{18} por medio de la ecuación (1).
- 6) Finalmente, calcular el número estructural SN aplastando el botón calcular al final.

En cambio, si el usuario decide diseñar pavimentos rígidos debe seguir estos mismos pasos del 1 al 6, pero también debe ingresar los valores del panel de variables adicionales para pavimentos rígidos que se habilita solamente al escoger este tipo de pavimento en la app:

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO
Diseño de Pavimentos utilizando la metodología AASHTO

ECUACIÓN AASHTO 1993

Tipo de Pavimento
Pavimento Flexible Pavimento Rígido

Serviciabilidad y Desviación Estándar - So
PSI inicial So
PSI final

Confiabilidad - R
Confiabilidad

CBR y Módulo Resiliente - Mr
CBR %
Módulo de Reacción (k) pci

Número de Ejes Equivalentes - W18
TPDA inicial Ld
TPDA final Dt
Periodo de Diseño (n) años
FCE
W18

Adicionales para pavimentos rígidos
Módulo de Elasticidad del Concreto (Ec) psi
Módulo de Rotura del Concreto (Sc) psi
Coeficiente de Transmisión de Carga (J)
Coeficiente de Drenaje (Cd)

Tipo de Análisis
Espesor (D)

Figura 7 Interfaz gráfica que resuelve las ecuaciones del AASHTO 93 para pavimentos rígidos.

Los parámetros de ingreso no cambian, con excepción del panel del Módulo Resiliente, que para pavimentos rígidos calcula el Módulo de Reacción (k) a través del CBR. En este caso, se debe ingresar los valores de las variables adicionales para este tipo de pavimento como es el: módulo de elasticidad del concreto (Ec), módulo de rotura del concreto (Sc), coeficiente de transmisión de carga (J) y coeficiente de drenaje (Cd).

La interfaz tiene cuatro botones que puede utilizar el usuario al final. El primero le permite calcular, tanto para pavimentos flexibles como rígidos, el número de estructural y el espesor, respectivamente. El segundo despliega ante el usuario un mensaje con pautas para el diseño de ambos tipos de pavimentos. El tercer botón le permite borrar los valores ingresados en cada panel por si el usuario los ingreso mal o quiere volver a escribirlos. Finalmente, el cuarto botón es para salir de la aplicación totalmente y cerrar su ejecutable de la pantalla.

4. METODOLOGÍA

4.1. Caso de estudio: Vía Cercopamba

Para emplear el software interactivo creado en este trabajo final, se pretende diseñar la estructura de pavimento flexible requerida por el caso de estudio: VÍA CERCOPAMBA:

4.1.1. Ubicación

El caso de estudio analizado en este proyecto final se encuentra “ubicado en la parroquia metropolitana rural Guayllabamba, perteneciente al cantón Quito, provincia de Pichincha” (GAD Guayllabamba, s. f.). Guayllabamba está a 25 km apropiadamente de la ciudad de Quito siendo su vía de acceso principal de primer orden. Esta parroquia limita “al norte con el cantón Pedro Moncayo, al sur con las parroquias del El Quinche, Yaruquí y Tababela, al este con el cantón Cayambe y al oeste con la Parroquia de Calderón” (GAD Guayllabamba, s. f.).

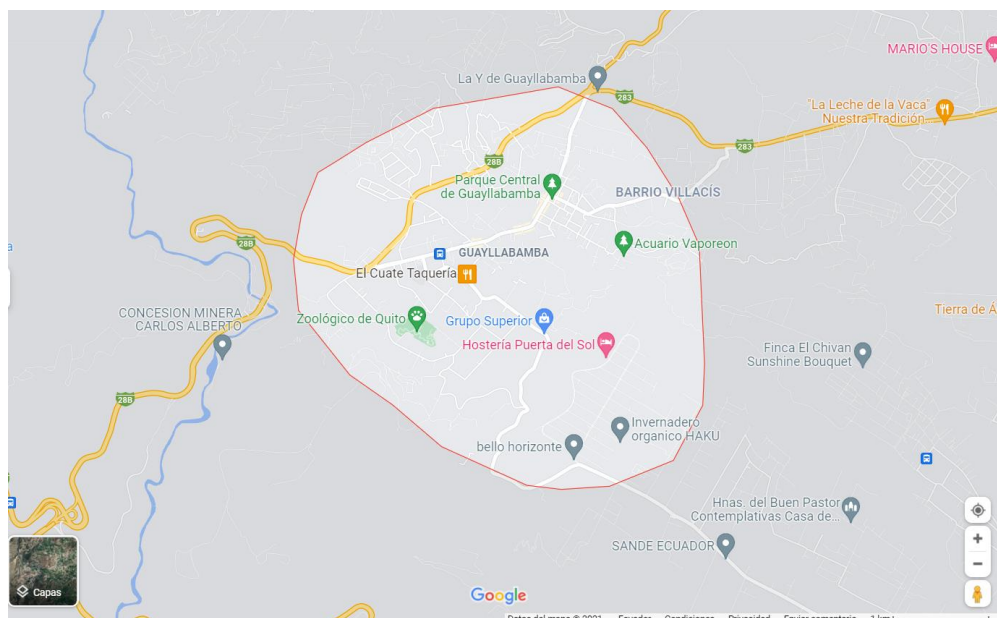


Figura 8 Ubicación geográfica parroquia Guayllabamba.

Fuente: Google Maps.

4.1.2. Geometría

El caso de estudio analizado en este proyecto es el diseño del pavimento flexible para la vía CERCOPAMBA en la parroquia de Guayllabamba. Esta carretera nace de la vía colectora E28B Guayllabamba Tabacundo. Específicamente, la vía CERCOPAMBA une al Barrio Santa Mónica con otros sectores de la parroquia en una distancia de 3.225 metros totales de longitud. El punto inicial y final de la vía se pueden apreciar en la figura a continuación:

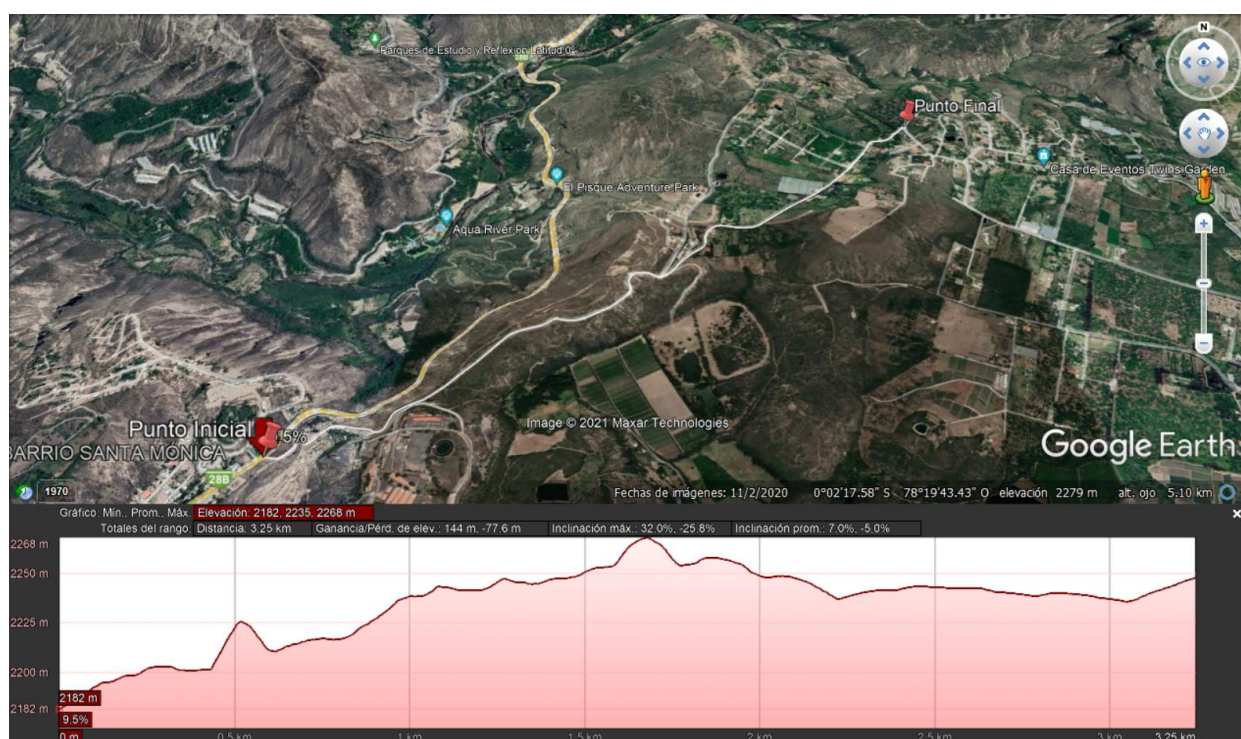


Figura 9 Geometría y perfil de elevación de la vía CERCOPAMBA.

Fuente: Google Earth.

4.1.3. Estado Actual del Pavimento

El camino CERCOPAMBA en la parroquia Guayllabamba presenta ciertos tramos empedrados y lastrados en malas condiciones. El ancho de esta vía fue constante a lo largo de los 3+225 km que la conforman con un valor de 4 metros en total. Además, contaba con cunetas triangulares

solo en algunos tramos específicos con un ancho promedio de 75 cm. En el anexo 9.4 se muestra fotografías del estado actual de la vía y en la siguiente tabla se detallan sus características:

Tabla 17 Descripción del estado actual de la vía CERCOPAMBA.

Abscisa	Tipo de Pavimento	Condición	Descripción
0+500	Empedrado	Regular	Hasta este punto la vía cuenta con cunetas de 0.75x0.45m.
0+700	Lastrado	Mala	Se pierde la capa de empedrado aproximadamente 50m.
0+750	Empedrado	Mala	Empedrado en malas condiciones y sin cunetas.
1+100	Lastrado	Mala	Desprendimiento de empedrado en la vía y se encuentra recubierta de material arcilloso aproximadamente 100m.
1+600	Lastrado	Mala	Pérdida nuevamente de empedrado y empozamientos de agua por falta de sistemas de drenaje adecuados.
1+700	Lastrado	Mala	Pérdida de empedrado.
2+000	Lastrado	Mala	La vía se encuentra a nivel de subrasante. El empedrado se ha perdido completamente y no contiene cunetas hasta aproximadamente 500m más.
2+980	Empedrado	Mala	La vía se amplía desde este punto a 8 metros de ancho total hasta la abscisa 3+000 km (fin de la vía).

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Clima

La parroquia Guayllabamba ofrece un clima cálido y templado. Tiene una gran cantidad de precipitaciones anuales, incluso en el mes más seco (Climate-Data.org, s. f.). Las temperaturas en esta parroquia oscilan de 18 °C a 28 °C (GAD Guayllabamba, s. f.). Sin embargo, su temperatura media anual es de 12.9°C con precipitaciones de hasta 90 mm (Weather Atlas, s. f.). En la tabla siguiente los datos históricos del tiempo en Guayllabamba que se emplearan para el análisis y diseño del pavimento de esta carretera:

Tabla 18 Datos históricos del tiempo en la parroquia de Guayllabamba.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	12.8	12.9	12.9	13	13	12.8	12.7	12.9	12.9	12.8	12.8	12.8
Temperatura mín. (°C)	9.4	9.6	9.5	9.5	9.5	9.2	9	8.6	8.4	8.9	9.3	9.5
Temperatura máx. (°C)	17	17.1	17.2	17.2	17.3	17.3	17.4	18.1	18.1	17.4	17.2	17
Precipitación (mm)	178	183	236	259	193	113	82	60	108	181	209	198
Humedad(%)	84%	84%	85%	86%	84%	81%	78%	75%	78%	83%	85%	86%
Días lluviosos (días)	19	18	20	20	20	16	14	12	15	19	19	19
Horas de sol (horas)	5.8	5.7	5.9	6.0	6.2	6.5	6.7	7.2	7.4	6.4	5.8	5.7

Fuente: (Climate-Data.org, s. f.).

La tabla 15 expone las temperaturas medias, máximas y mínimas, precipitación, humedad, días lluviosos y horas de sol para cada mes durante un año en la parroquia de Guayllabamba. De la cual, se puede determinar que agosto es el mes con menos porcentaje de humedad y precipitación, pero con mayor temperatura. En cambio, abril, noviembre y diciembre son los meses con mayor porcentaje de humedad y precipitación, pero con menor temperatura.

4.1.5. Estudio de Tráfico

La determinación de los volúmenes del tráfico actual en la vía CERCOPAMBA se realizó por medio de un conteo manual durante dos intervalos horarios el sábado 27 de noviembre del 2021:

Tabla 19 Estudio del Tráfico Vía CERCOPAMBA.

Intervalo Horario	Volumen	
	Livianos	Pesados
9:00 - 10:00	12	4
10:00 - 11:00	9	1
TOTAL	21	5

Fuente: Elaboración propia.

Dado que el conteo vehicular de la vía CERCOPAMBA fue limitado, se emplearon factores de expansión para obtener una estimación del TPDA inicial. Los factores de expansión se utilizan

para ajustar los conteos periódicos y proyectarlos a las 24 horas diarias durante todo un año (Garber & Hoel, 2009). Los factores que se emplean son de tipo horario, diario y mensual y se obtienen de las tablas del anexo 9.5. Se pudo emplear estos factores ya que la vía CERCOPAMBA es una carretera rural primaria.

De tal forma, se emplearon los factores de expansión horarios, diarios y mensuales del anexo 9.5 para el intervalo horario, día y mes específico del estudio de tráfico realizado para la vía CERCOPAMBA obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 20 Volumen diario por medio de factores de expansión.

Intervalo Horario	Livianos	Pesados	Volumen Total	HEF
9:00 - 10:00	12	4	16	18,80
10:00 - 11:00	9	1	10	17,10
			Volumen	235,90
			Diario	236
				veh/día

Fuente: Excel – Elaboración propia.

Tabla 21 Tránsito promedio diario por medio de factores de expansión.

Día de la Semana	Volumen Total	DEF
Sábado	235,9	6,51
TPD	219,39	veh prom/día
	220	

Fuente: Excel – Elaboración propia.

Tabla 22 Tránsito promedio diario anual por medio de factores de expansión.

Mes	TPD	MEF
Noviembre	219,387	1,185
TPDA_o	259,97	veh
	260	prom/anual

Fuente: Excel – Elaboración propia.

Por lo tanto, el tránsito promedio diario anual para esta vía es de 260 vehículos al año. Este valor representa el 100% del volumen total que considera vehículos livianos más los vehículos pesados descritos en el anexo 9.1. Como nos interesa obtener el factor de ejes equivalente (FCE) del tráfico pesado que pasa por esta vía, se determina su porcentaje del volumen total:

Tabla 23 Porcentaje de vehículos livianos y pesados sobre la vía CERCOPAMBA.

	Cantidad	Porcentaje
TPDAo	260	100%
Livianos	210	81%
Pesados	50	19%

Fuente: Excel – Elaboración propia.

El tráfico pesado corresponde el 19% del volumen total, es decir, 50 vehículos pesados al año. Este porcentaje se divide en el tránsito de buses, camiones de la basura tipo 3A (tabla 31, anexo 9.1) y camiones varios tipo 4C (tabla 31, anexo 9.1). El siguiente desglose de vehículos pesados considera la existencia de un cuerpo de bomberos y dos florícolas, además de pequeñas entrevistas a miembros que viven a lo largo de la carretera CERCOPAMBA:

Tabla 24 Desglose de vehículos pesados sobre la vía CERCOPAMBA.

PESADOS	Porcentaje	TPDA
BUS	40%	20
3A	40%	20
4C	20%	10

Fuente: Excel – Elaboración propia.

El factor de ejes equivalentes se obtuvo por medio del desglose de vehículos pesados de la tabla 24. Para ello se analizó el tipo de ejes y la carga de cada bus, camión 3A y camión 4C. Dependiendo si el eje era simple, doble, tándem o trídem se aplicaron las fórmulas del anexo 9.1 para obtener el factor de ejes equivalente como se muestra a continuación:

Tabla 25 Cálculo Factor Equivalente de Carga (FCE).

Tipo	TDPA _i	Porcentaje	Ejes	Carga	FEC _i
BUS	20,00	40%	Simple	3,60	0,04
			Simple Doble	9,20	0,63
3A	20,00	40%	Simple	6,00	0,27
			Tándem	20,00	1,26
4C	10,00	20%	Simple	6,00	0,14
			Trídem	24,00	0,24
TPDA_o	50,00	100%	Factor Equivalente Carga (FCE)		2,58

Fuente: Excel – Elaboración propia.

Una vez obtenido el FCE, el siguiente paso es determinar el TPDA final para vehículos pesados exclusivamente. Para encontrar este valor se necesita del periodo de análisis de la vía y de la tasa de crecimiento anual. Como la vía CERCOPAMBA es de bajo volumen de circulación se escoge un periodo de $n = 10$ años. El crecimiento poblacional de la parroquia Guayllabamba específicamente tiene un valor de 4.94% en total (López Lindao & DESAE, 2010). Con estos valores se utiliza la ecuación (2) para encontrar el TPDA final:

$$TPDA_f = TPDA_o(1 + g)^n \quad (2)$$

$$TPDA_f = 50 \times (1 + 0.0494)^{10}$$

$$TPDA_f \approx 81 \text{ veh pesados prom/año}$$

4.1.6. Estudio de Suelo

Un parámetro para medir la resistencia del suelo es Valor de Soporte California o CBR. Este valor se determina en campo o laboratorio. En este caso, se empleó la prueba de Cono Dinámico de Penetración (DCP) ya que permite “evaluar la resistencia del suelo en cualquier condición y

estimar un valor de CBR en campo” (Viscarra Agreda, 2005). El esquema del dispositivo DCP utilizado se muestra a continuación:

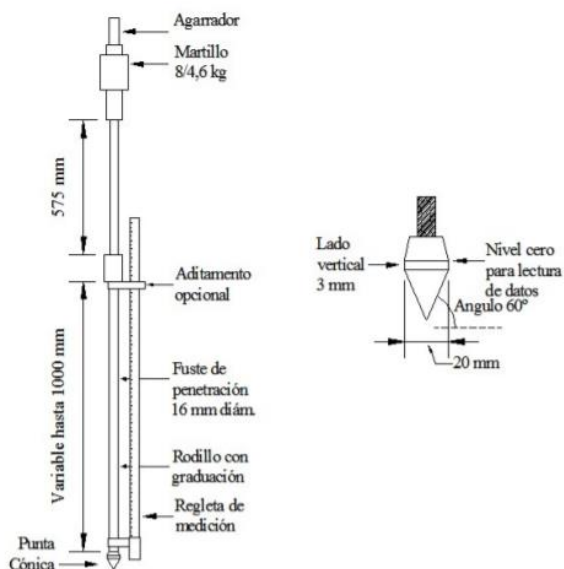


Figura 10 Esquema equipo DCP.

Fuente: (ASTM, 2018).

El ensayo DCP consiste en medir la razón de penetración de la punta cónica (figura 13) en el suelo inalterado y/o compactado provocados por una serie de golpes por medio del martillo de 8 Kg (ASTM, 2018). Este ensayo se realizó a lo largo de la vía CERCOPAMBA aplicando la norma ASTM D-6951-03 para determinar los CBR en cinco puntos específicos que se muestran a continuación:

Tabla 26 Resultados de prueba DCP en cinco puntos de la vía CERCOPAMBA.

Punto	Distancia (km)	Abscisa	% CBR
P1	0,500	0+500	34
P2	1,463	1+463	52
P3	2,009	2+009	24
P4	2,539	2+539	19
P5	3,057	3+057	19

Fuente: Excel - Elaboración Propia.

El proceso completo de obtención del % CBR aplicando la norma ASTM D-6951-03 se explican en el anexo 9.6. Sin embargo, los valores de CBR obtenidos de tabla 20 no reflejan la verdadera resistencia portante de los suelos de Guayllabamba, debido a que sobreestiman su valor. Por ello, con la finalidad de obtener valores de CBR más reales, se utiliza el estudio realizado por Daniel Barreno, quien por medio ensayos en campo y laboratorio obtuvo una correlación entre el %CBR y el índice DCP para varias muestras de suelos únicamente de Guayllabamba. La gráfica de esta correlación se muestra a continuación:

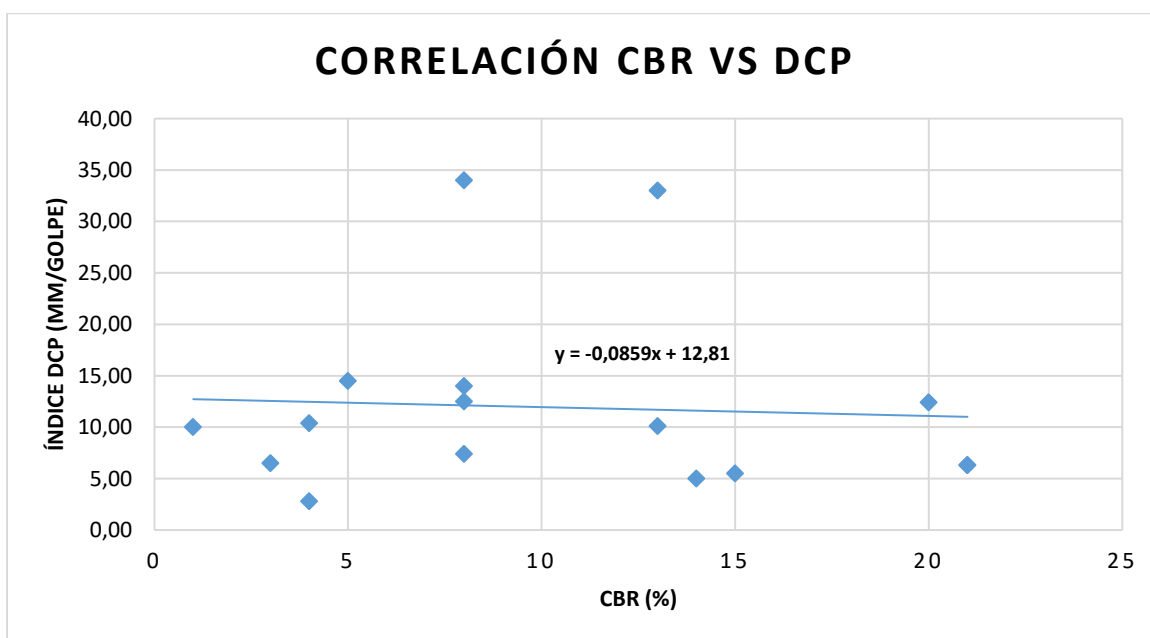


Gráfico 1 Correlación de %CBR de laboratorio vs Índice DCP de campo.

Fuente: Excel - (Barreno, 2021).

La correlación entre ambos valores es débil debido a la variedad de errores aleatorios que se pueden cometer en los ensayos DCP en campo y relación de soporte california CBR en laboratorio. No obstante, la ecuación de la línea de tendencia nos sirve para calcular valores de CBR en función del índice DCP que reflejan realmente la resistencia de los suelos de la zona. De

esta manera, se procedió a graficar por cada punto de análisis, el número de golpes acumulado del ensayo DCP en función de la penetración acumulada en (mm):

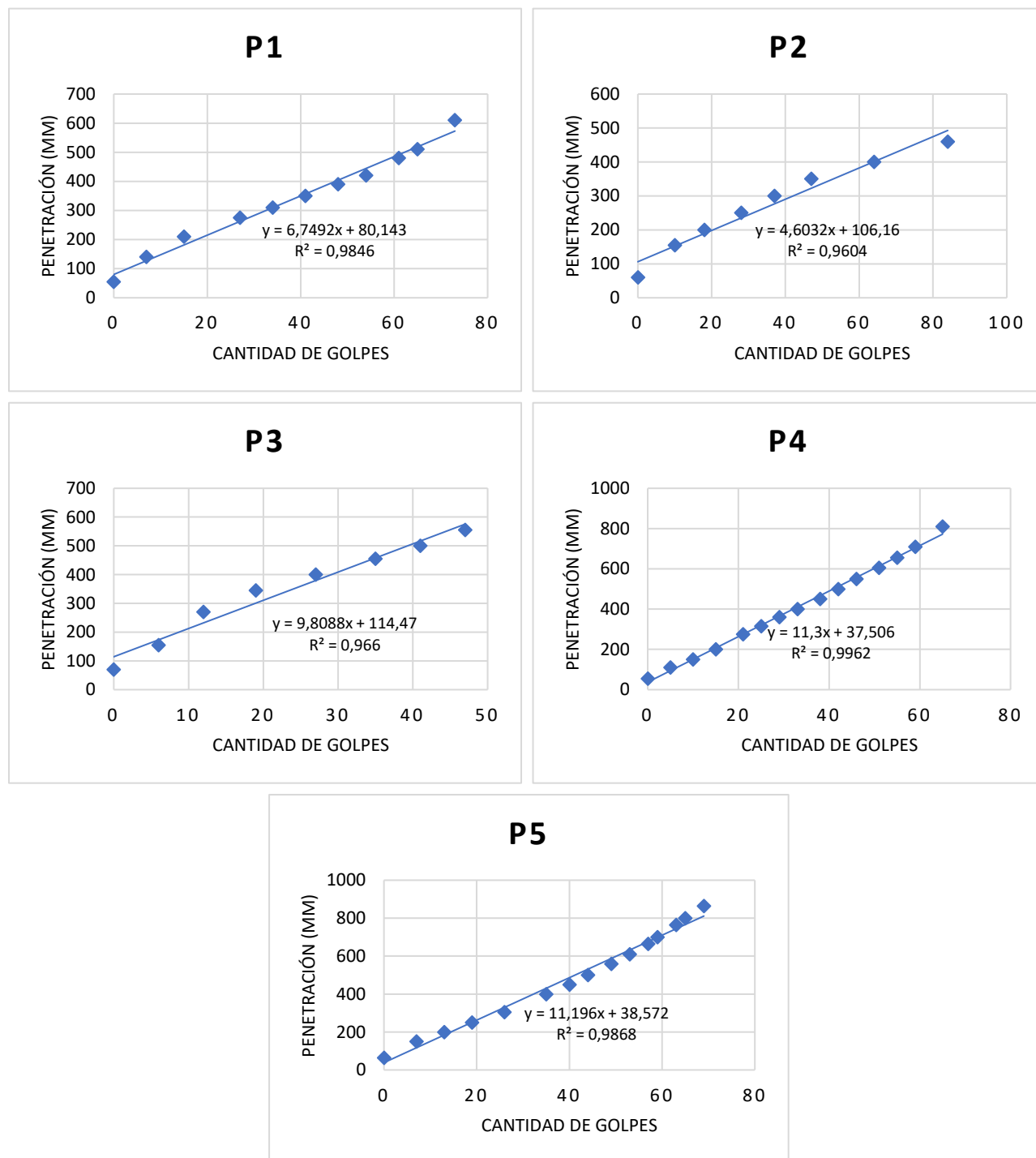


Gráfico 2 Índice DCP para los cinco puntos de análisis de la vía CERCOPAMBA.

Fuente: Excel – Elaboración propia.

De los gráficos anteriores, se deduce que las pendientes de las rectas de tendencia corresponden a los índices de DCP para cada punto de análisis. Estos valores fueron redondeados a un número entero y por medio de ellos, se aplicó la ecuación de correlación del gráfico 1 para obtener los valores de CBR más adecuados para el caso de estudio:

Tabla 27 Resultados obtenidos por medio de la correlación de CBR vs DCP.

Punto	Distancia (km)	Abscisa	DCP (mm/golpe)	% CBR
P1	0,500	0+500	7	13
P2	1,463	1+463	5	13
P3	2,009	2+009	10	12
P4	2,539	2+539	11	12
P5	3,057	3+057	12	12

Fuente: Excel – Elaboración propia.

Con los datos de la tabla 21, se procedió a determinar el CBR de diseño para la vía considerándola una unidad homogénea. Para ello, se ordenó de menor a mayor los % CBR, se determinó el número de valores de CBR mayores o iguales para cada caso, se calculó el porcentaje acumulado de valores de CBR mayores o iguales en cada caso, y finalmente se graficó estos datos como se muestra a continuación:

Tabla 28 Datos para la determinación del CBR de diseño.

% CBR	No. Valores CBR >=	% Valores CBR >=
12	5	100,00
12		
12		
13	2	40,00
13		

Fuente: Excel – Elaboración Propia.

El CBR de diseño se escoge en función del tipo de tránsito de la vía:

Tabla 29 %CBR de Diseño en función del tipo de tráfico.

Tipo de Tráfico	$W_{18} = N(8.2 \text{ Ton})$	Entrada Gráfica
Pesado	$(\times 10^6)$	85%
Mediano	$(\times 10^6 - \times 10^4)$	70%
Liviano	$(< \times 10^4)$	60%

Fuente: Excel – Elaboración Propia.

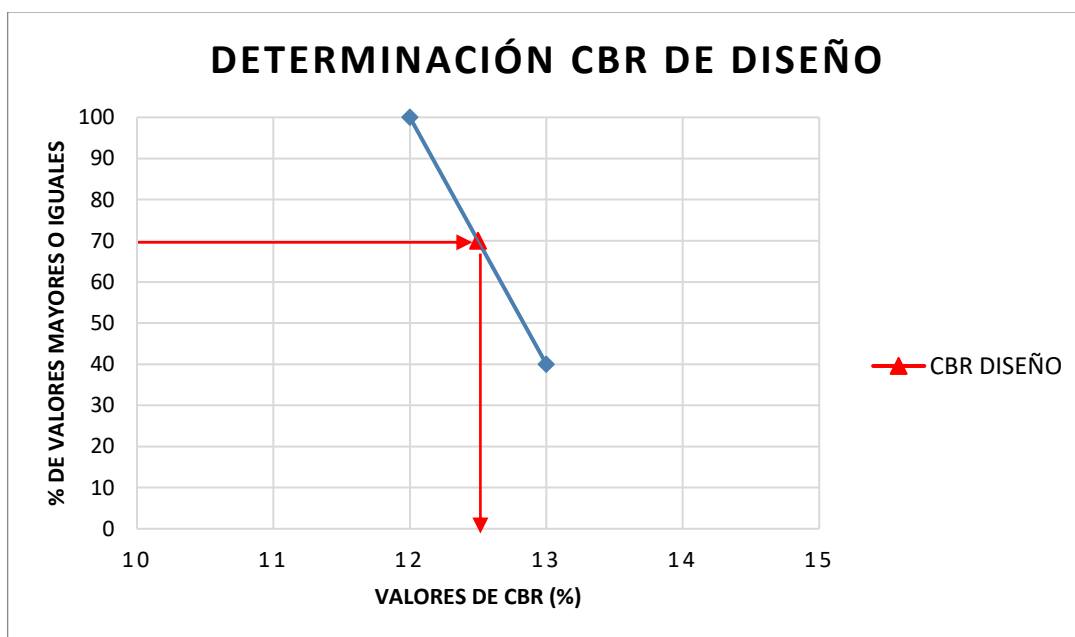


Gráfico 3 Determinación CBR de Diseño.

Fuente: Excel – Elaboración Propia.

Como la vía CERCOPAMBA es de bajo flujo vehicular, pero que contiene tránsito pesado en un porcentaje, se considera que su tipo de tráfico es mediano. Por tanto, del gráfico 3 se determina que el CBR es de 12.50%, que por temas de diseño se redondea al inmediato inferior de 12% lo que indica que la resistencia del suelo sobre esta vía es aceptable.

$$\text{CBR}_{\text{diseño}} = 12\%$$

4.1.7. Fuentes de Material

La mayoría de fuentes de extracción de materiales de construcción se encuentran ubicados en el norte de Quito, específicamente “a lo largo de la carretera Quito – Mitad del Mundo – Perucho, existiendo también en Parcayacu, Calacalí, Río Guayllabamba, Bellavista y Bodaspamba” (EPMOP et al., 2011). El Ministerio de Transporte y Obras Públicas indica las fuentes de donde se puede obtener materiales pétreos en la siguiente tabla:

Tabla 30 Listado de fuentes para la adquisición de materiales pétreos cerca de la parroquia Guayllabamba.

No.	Nombre	Ubicación	Material	Aptitud ¹	Volumen
37	Q. Chitahuayco	Parcayacu	Brecha volc.	B AC AA	100.000
40	El Corazón	Pomasqui		SB	100.000
1	Sta. Rosa	Pomasqui	Ag. Volcánico	AC	Ilimitada
2	Tentadero	Pomasqui	Ag. Volcánico	SS	Ilimitada
36	San Antonio	San Antonio	Gravas y arenas	SB SS	100.000
41	Calacalí	Calacalí		B AC AA	100.000
12	Loma Catequilla	San Antonio	Brecha volcánica	SB AC	Ilimitada
50	Loma Catequilla 2	San Antonio	Brecha volcánica	SB AC	no indica
35	Río Guayllabamba	Margen izquierda Río	Grava andesítica	B AC AA	100.000
16	Recalde	San Antonio		SS	100.000
3	Buitrón	San Antonio	Andesitas	SS	Ilimitada
4	Maldonado	San Antonio	Andesitas	SB AC	Ilimitada
11	La Marca	San Antonio	Andesitas	SS	Ilimitada
32	Q. Portada	N de S. Antonio		SB AC AA	100.000
42	Mojanda 1	S de La Marca		SB AC AA	100.000
43	Mojanda 2	Tanlahua		B AC AA	100.000
34	Tanlahua	Vía a Perucho	lavas andesíticas	AC SS	100.000
33	Pogyos, El Plan	Vía a Perucho		B AC AA	100.000
30	Perucho	Puente Guayllabamba	Andesitas verdes	B AC AA	100.000
31	Calderón	Bellavista		SB SS	100.000
70	Río Guayllabamba	Puente Panamericana	Grava aluvial	B AC AA	100.000
17	Bodaspamba	Guayllabamba	Gravas y bloques	SB	
38	Minas Huayco	Quito - Nono	brecha volcánica	B AC AA	100.000
17	Nono	Vía a Nono		B AC AA	100.000

Fuente: (EPMOP et al., 2011).

De acuerdo con la ubicación de la carretera CERCOPAMBA se recomienda adquirir los materiales de construcción de las minas de Guayllabamba. Estas minas se encuentran ubicadas específicamente “en la carretera Panamericana Norte, en las inmediaciones del Puente sobre el Río Guayllabamba, con acceso carrozable y en plena explotación” (EPMOP et al., 2011). El material existente en esta cantera corresponde “a gravas de arrastre aluvial, con predominio de

rocas volcánicas, con buena cantidad de bloques de tamaños centimétricos a gravas medianas, y escasa cantidad de arena” (EPMMOP et al., 2011).

El depósito de material de construcción de la mina de Guayllabamba es renovable y las características de estos materiales se describen a continuación:

Tabla 31 Características de los materiales de construcción para la vía CERCOPAMBA.

PROPIEDAD	VALORES	ESPECIFICADOS
% Arcilla	8	0 a 3
Desgaste a Sulfatos	3.52	Menor a 10
Abrasión los Angeles	23	Menor a 40
Densidad SSS	2.59 a 2.67	Mayor a 2.2
Absorción	1.39 a 2.45	
Granulometría	Según pedido	Clase 1
Peso Unitario	1.45 a 1.72	

Fuente: (EPMMOP et al., 2011).

5. RESULTADOS

5.1. Diseño Pavimento Flexible: VÍA CERCOPAMBA

5.1.1. Solución manual

Para el diseño de una estructura de pavimento flexible se requiere de la obtención de varios parámetros que se detallaron en secciones anteriores. En primer lugar, se determinan las variables de diseño que dependen del tipo de pavimento y de carretera de análisis. La vía CERCOPAMBA se cataloga como una carretera local de baja importancia ubicada en un sector rural con un bajo volumen de tránsito. Con esta información, en la tabla siguiente se describe los parámetros de diseño y su valor que recomienda la AASHTO 93:

Tabla 32 Parámetros iniciales de diseño flexible.

Parámetro de Diseño	Valor	Fuente
Periodo de Diseño	10 años	Tabla 1: (AASHTO, 1993).
Periodo de Análisis	10 años	Tabla 2: (Yáñez, 2012).
Confiabilidad	80%	Tabla 5: (AASHTO, 1993).
Serviciabilidad Inicial	4.5	(Yáñez, 2012).
Serviciabilidad Final	2.5	Tabla 6: (AASHTO, 1993).
Desviación Estándar	0.50	Tabla 14: (AASHTO, 1993)

Fuente: Elaboración Propia.

El CBR de diseño obtenido por medio del ensayo DCP y el tipo de tráfico de la vía fue de 12%. Por medio de este valor, se obtiene el módulo resiliente de la subrasante con la ecuación de la tabla 8 para $10\% < \text{CBR} < 20\%$ (Yáñez, 2012):

$$M_r = 2555(\text{CBR})^{0.64}$$

$$M_r = 2555 \times (12)^{0.64}$$

$$M_r = 12533.34 \text{ psi}$$

Por otro lado, se utiliza la ecuación [1] para obtener el número de ejes equivalentes W_{18} con los datos obtenidos del estudio del tráfico **PESADO** en la vía CERCOPAMBA:

$$W_{18} = N(8.2 \text{ Ton}) = \left(\frac{\text{TPDA}_f + \text{TPDA}_o}{2} \right) \times 365 \times n \times D_t \times \text{FCE} \times L_d \quad (1)$$

$$W_{18} = N(8.2 \text{ Ton}) = \left(\frac{81 + 50}{2} \right) \times 365 \times 10 \times 0.5 \times 2.58 \times 1$$

$$W_{18} = N(8.2 \text{ Ton}) = 308406.75 \approx 3.1 \times 10^5$$

Finalmente, se emplea la ecuación [3] para obtener el índice de servicio de la vía en función de los datos recomendamos con la AASHTO 93 de la tabla 32:

$$\Delta \text{PSI} = P_o - P_t \quad (3)$$

$$\Delta\text{PSI} = 4.5 - 2.5$$

$$\Delta\text{PSI} = 2.5$$

Con estos valores, resolvemos la ecuación [7] para pavimentos flexibles aplicando el monograma solución del anexo 9.3 obteniendo el siguiente resultado de número estructural SN:

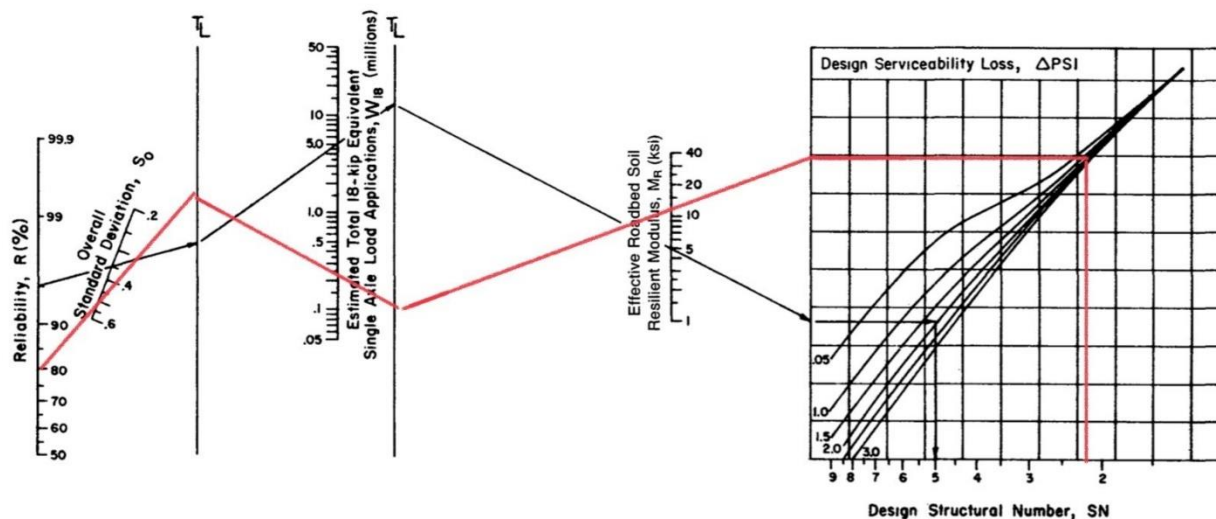


Figura 11 Solución manual de SN por medio de Monograma AASHTO 93.

Fuente: (AASHTO, 1993) – Elaboración propia.

De acuerdo con la solución manual de la figura 12 el pavimento flexible de la vía CERCOPAMBA requiere de un número estructural de:

$$\text{SN}_{\text{manual}} = 2.20$$

5.1.2. Solución software

Empleando los mismo parámetros de diseño recomendados por la AASHTO 93 en la tabla 32 y los resultados de módulo resiliente, número de ejes 8.2Ton e índice de serviciabilidad de la vía CERCOPAMBA, se comprueba el resultado del número estructural obtenido manualmente por medio de la aplicación creada en este trabajo final:

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO
Diseño de Pavimentos utilizando la metodología AASHTO

ECUACIÓN AASHTO 1993

Tipo de Pavimento
Pavimento Flexible Pavimento Rígido

Serviciabilidad y Desviación Estándar - So
PSI inicial: 4.5
PSI final: 2.5
So: 0.5

Confiabilidad - R
Confiabilidad: 80

CBR y Módulo Resiliente - Mr
CBR: 12 %
Módulo Resiliente (Mr): 12533.34 psi

Tipo de Análisis
Número Estructural (SN): 2.19

Número de Ejes Equivalentes - W18
TPDA inicial: 50
TPDA final: 81
Período de Diseño (n): 10 años
FCE: 2.58
W18: 308406.75

Adicionales para pavimentos rígidos
Módulo de Elasticidad del Concreto (Ec): 0 psi
Módulo de Rotura del Concreto (Sc): 0 psi
Coeficiente de Transmisión de Carga (J): 0
Coeficiente de Drenaje (Cd): 0

Calcular Diseñar Borrar Salir

Figura 12 Solución de SN por medio del software interactivo para la vía CERCOPAMBA.

Fuente: Elaboración propia.

$$SN_{\text{software}} = 2.19$$

El resultado obtenido por medio del software interactivo es ligeramente menor al resultado obtenido manualmente. Esto se debe a que la solución manual de la ecuación [7] está sujeta a varios errores aleatorios al utilizar el monograma de la figura 12. Para evitar esos errores es que precisamente se programaron las ecuaciones del AASHTO 93 para obtener resultados más exactos de manera más rápida y eficaz. Por tanto, el número estructural que considera la resistencia portante del suelo es de:

$$SN = 2.19$$

5.1.3. Estructura de Pavimento Final

Una vez determinado el número estructural requerido por el pavimento, el último paso es diseñarlo por medio de los criterios propuestos por la metodología AASHTO 93: multicapa o posibilidad de construcción descritos en la sección 3.3. El diseño por cualquiera de ambos métodos requiere de los coeficientes estructurales para cada capa. En este caso se proponen inicialmente tres capas de pavimento: capa de rodadura, base y subbase con las siguientes características:

Tabla 33 Características de las capas del pavimento para la vía CERCOPAMBA.

Capa	Características
Rodadura	Mezcla Bituminosa: $E_{CA} = 450000$ psi
Base	Base clase 4: $CBR \geq 80\%$
Subbase	Subbase clase 3: $CBR \geq 30\%$

Fuente: (AASHTO, 1993; NEVI-12-MTOP, 2013) – Elaboración propia.

La AASHTO recomienda emplear una capa asfáltica con un módulo de elasticidad por encima de los 450000 psi, y el Ministerio de Obras Públicas recomienda emplear una base clase 4 con un CBR mayor a 80% y una subbase clase 3 con un CBR mayor a 30% para vías de baja circulación como la carretera CERCOPAMBA. Con estas propiedades se utilizan los gráficos del anexo 9.2 para obtener los coeficientes estructurales a_1 , a_2 y a_3 para la capa de rodadura, base y subbase con los gráficos del anexo 9.2, respectivamente.

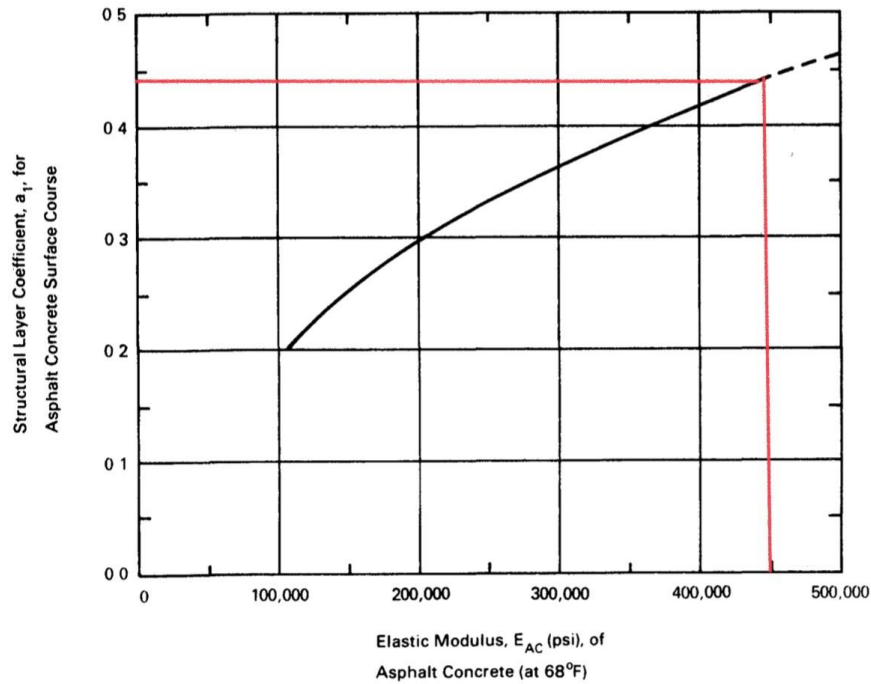


Gráfico 4 Solución coeficiente estructural para la rodadura (a_1).

Fuente: (AASHTO, 1993).

$$a_1 = 0.44 \frac{1}{\text{in}}$$

El gráfico 4 se encuentra en unidades del sistema inglés, por tanto al transformarlo al sistema internacional se tiene que:

$$a_1 = 0.44 \frac{1}{\text{in}} \times \frac{1 \text{ in}}{2.54 \text{ cm}}$$

$$a_1 = 0.173 \frac{1}{\text{cm}}$$

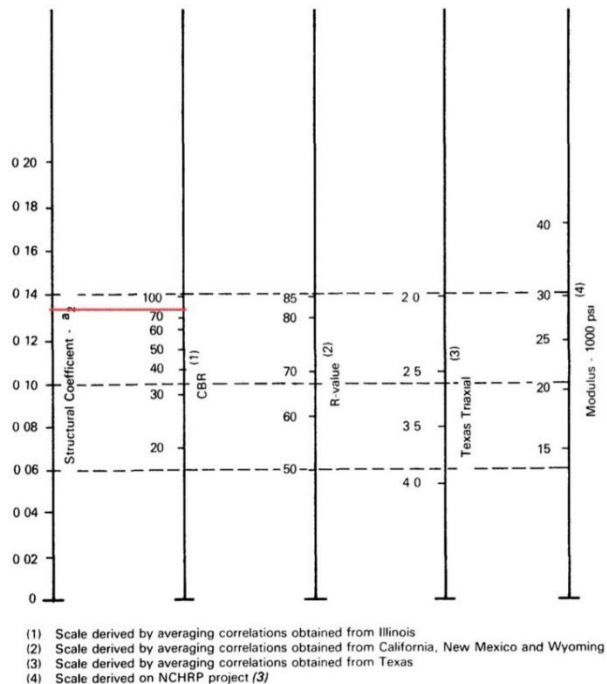


Gráfico 5 Solución coeficiente estructural para la base (a₂).

Fuente: (AASHTO, 1993).

$$a_2 = 0.132 \frac{1}{\text{in}} \times \frac{1 \text{ in}}{2.54 \text{ cm}} = 0.052$$

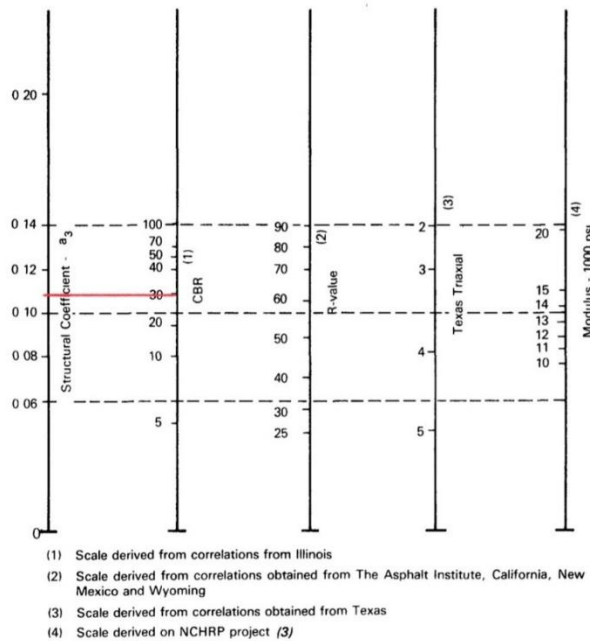


Gráfico 6 Solución coeficiente estructural para la subbase (a₃).

Fuente: (AASHTO, 1993).

$$a_2 = 0.132 \frac{1}{\text{in}} \times \frac{1 \text{ in}}{2.54 \text{ cm}} = 0.052$$

Finalmente, se requiere obtener el coeficiente de drenaje de las capas propuestas en función de la calidad del drenaje y porcentaje de humedad/precipitación de Guayllabamba. En base a la tabla 18, se determina que los niveles de precipitación son elevados desde marzo hasta mayo, lo que implica que la zona tiene 3 meses constantes de lluvia (Climate-Data.org, s. f.):

$$\% \text{ humedad} = \frac{3 \text{ meses}}{12 \text{ meses}}$$

$$\% \text{ humedad} = 25$$

Por tanto, el “porcentaje de tiempo de exposición de la estructura de pavimento a nivel de humedad próximo a la saturación” es igual a 25% (AASHTO, 1993). Además, según la tabla 17 la vía CERCOPAMBA se encuentra en pésimo estado debido a las pérdidas del empedrado y empozamientos de agua. Por ello, se espera que la calidad de drenaje del pavimento propuesto sea buena en comparación a la actual. Con estas deducciones, se definen los coeficientes estructurales para cada capa y se obtienen los coeficientes de drenaje para la base y subbase según la tabla 9:

Tabla 34 Coeficientes estructurales y de drenaje para las capas del pavimento de la vía CERCOPAMBA.

Capa	Coeficientes estructurales (a)	Coeficientes de drenaje (m)
Rodadura	0.173	-
Base	0.052	1.00
Subbase	0.043	1.00

Fuente: (AASHTO, 1993; Silva, 2018) – Elaboración propia.

Nota: la rodadura asfáltica le da características de impermeabilidad al pavimento, por eso no tiene coeficiente de drenaje (m).

Con esta información, se procede a diseñar el pavimento por los criterios de diseño de la metodología AASHTO 93: multicapa y posibilidad de construcción:

5.1.3.1. Criterio Multicapa

El criterio multicapa considera la resistencia de la subrasante y de la base y subbase. Por ello, se obtienen los números estructurales de cada capa, directamente con el software creado en este trabajo, considerando las resistencias recomendadas por la (NEVI-12-MTOP, 2013) en la tabla 33. Estas soluciones se presentan en el anexo 9.8 y resumen en la tabla siguiente:

Tabla 35 Números estructurales por cada resueltos por la aplicación creada.

Capa	Coefficientes estructurales (a)	Coefficientes de drenaje (m)	Número Estructural (SN)
Rodadura	0.173	-	1.86
Base	0.052	1.00	2.05
Subbase	0.043	1.00	2.19

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se mencionó anteriormente, el criterio multicapa analiza la pérdida de resistencia por capa. Por ello, en la tabla 35 se presentan los números estructurales de la base, subbase y subrasante. Con estos valores, aplicamos las ecuaciones (10), (11) y (12) para obtener el espesor de cada capa:

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad (10)$$

$$D_1 \geq \frac{1.86}{0.173}$$

Como la capa de rodadura está asentada sobre la base, el número estructural 1 es precisamente el valor obtenido en la base, y por tanto el espesor de la primera capa debe ser mayor o igual:

$$D_1 \geq 10.75 \text{ cm} \approx 10 \text{ cm}$$

Asimismo, como la base está encima de la subbase, el número estructural 2 es el valor obtenido en la subbase, pero se resta la capacidad resistencia de la primera capa de rodadura:

$$D_2 \geq \frac{(SN_2 - a_1 D_1)}{a_2 m_2} \quad (11)$$

$$D_2 \geq \frac{2.05 - (0.173 \times 10)}{0.052 \times 1.00}$$

Por tanto, el espesor de la segunda capa tiene que ser mayor o igual:

$$D_2 \geq 6.15 \text{ cm}$$

Como este valor está por debajo del mínimo, se establece que la base debe tener al menos 10 cm de espesor. Por tanto, para obtener el espesor de la subbase, se emplea este nuevo D_2 . Como la subbase se consolida encima de la subrasante, se utiliza el número estructural obtenido inicialmente considerando la resistencia portante del suelo:

$$D_3 \geq \frac{(SN_3 - a_1 D_1 - a_2 m_2 D_2)}{a_3 m_3} \quad (12)$$

$$D_3 \geq \frac{2.19 - (0.173 \times 10) - (0.052 \times 1.00 \times 10)}{0.043 \times 1.00}$$

Por tanto, el espesor de la tercera capa tiene que ser mayor o igual:

$$D_3 \geq -1.39 \text{ cm}$$

Como el espesor de esta capa es negativo, significa que no requiere una tercera capa de subbase. Por lo tanto, se vuelve a realizar el diseño calculando los números estructurales únicamente dos capas: la rodadura y la base granular.

Tabla 36 Espesores resultantes criterio multicapa.

Capa	Espesor (cm)	Mínimo (cm)	Check
Rodadura	10.00	7.5 cm	CUMPLE
Base	6.15	10 cm	CUMPLE
Subbase	-1.39	15 cm	NO REQUIERE

Fuente: Tabla 14 (AASHTO, 1993) – Elaboración propia.

La nueva configuración de pavimento consiste en una rodadura y base sobre la subrasante, por tanto los números estructurales son los siguientes:

Tabla 37 Números estructurales para nueva configuración de pavimento por criterio multicapa.

Capa	Coefficientes estructurales (a)	Coefficientes de drenaje (m)	Número Estructural (SN)
Rodadura	0.173	-	1.86
Base	0.052	1.00	2.19
Subrasante	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Resolviendo nuevamente las ecuaciones (10) y (11) se tiene que los nuevos espesores son:

$$D_1 \geq \frac{1.86}{0.173} \approx 10 \text{ cm}$$

$$D_2 \geq \frac{2.19 - (0.173 \times 10)}{0.052 \times 1.00} \approx 8.85 \text{ cm}$$

La base como mínimo debe tener un valor de 10 cm por lo que se proponen los siguientes espesores y se obtiene el número estructural total de diseño:

Tabla 38 Número estructural propuesto por criterio multicapa.

Capa	Espesor (cm)	Número Estructural Real (SN)
Rodadura	10	$a_1 D_1 = 1.73$
Base	10	$a_2 D_2 m_2 = 0.52$
SN propuesto		2.25

Fuente: Elaboración propia.

Como es evidente, el SN propuesto es mayor al SN requerido por lo que el diseño cumple. Sin embargo, no se considera adecuado para las condiciones de la vía. El espesor propuesto para la rodadura es muy grande para esta vía con bajo volumen vehicular. Por ello, para tener un diseño más apegado a la realidad se diseñó el pavimento de CERCOPAMBA por el criterio posibilidad de construcción:

5.1.3.2. Posibilidad de construcción

Para aplicar el método de posibilidad de construcción se utiliza la tabla 16 que se muestra a continuación siendo la capa 1: la rodadura, la capa 2: la base y la capa 3: la subbase. Además, aplicamos la ecuación (9) para obtener el SN propuesto considerando nuevamente que:

$$SN_{\text{propuesto}} \geq SN_{\text{requerido}} = 2.19$$

Tabla 39 Diseño de espesores aplicando criterio posibilidad de construcción.

Capas	Coefficiente Estructural	Coefficiente de Drenaje	Espesores (cm)	Número Estructural (SN)
1	0.173	-	5.00	0.87
2	0.052	1.00	10.00	0.52
3	0.043	1.00	20.00	0.86
SN PROPUESTO				2.20

Fuente: (Yáñez, 2012) – Elaboración Propia.

Como el número estructural propuesto es mayor al requerido, se concluye que el diseño es adecuado para cubrir las demandas estructurales de la vía CERCOPAMBA para las zonas donde se ha perdido la capa de empedrado original. De tal forma, se propone la siguiente estructura de pavimento directamente sobre la subrasante de la carretera:

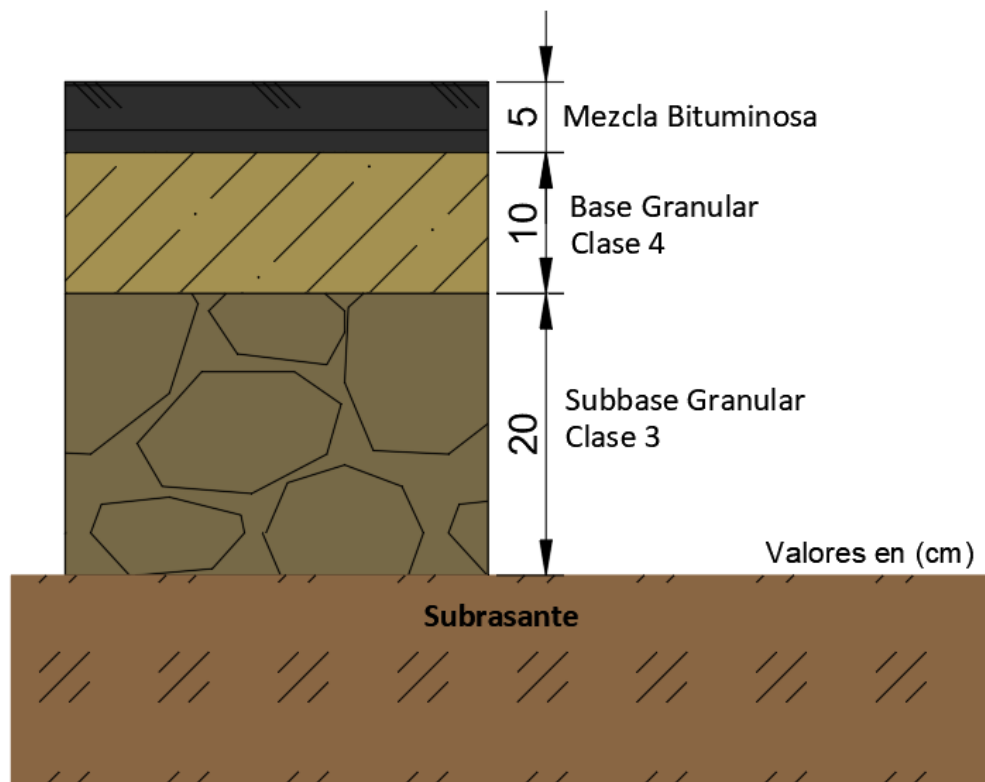


Figura 13 Estructura de pavimento final para las zonas sin empedrado en la vía CERCOPAMBA.

Fuente: AutoCAD – Elaboración Propia.

La estructura de pavimento de la figura 13 está diseñada para las zonas de la vía CERCOPAMBA que ha perdido la capa original de empedrado. Para los tramos de la vía que aún conservan este empedrado, se propone otro diseño de pavimento estructural que se detalla a continuación:

Tabla 40 Espesores y números estructurales propuestos para los tramos empedrados de la vía CERCOPAMBA.

Capas	Coefficiente Estructural	Coefficiente de Drenaje	Espesores (cm)	Número Estructural (SN)
Rodadura	0.173	-	5.00	0.87
Subbase	0.043	1.00	20.00	0.86
Mejoramiento (empedrado)	0.035	1.00	15.00	0.53
SN PROPUESTO				2.25

Fuente: (Yáñez, 2012) – Elaboración Propia.

Como el número estructural propuesto es mayor al requerido, el diseño para los tramos empedrados es funcional. Este diseño propone únicamente dos capas: una capa superficial de rodadura y una capa granular de subbase clase 3. La tercera capa de este pavimento es precisamente el empedrado que actúa como mejoramiento. De esta manera, la estructura de pavimento se apoya sobre directamente sobre este empedrado ya existente en la vía:

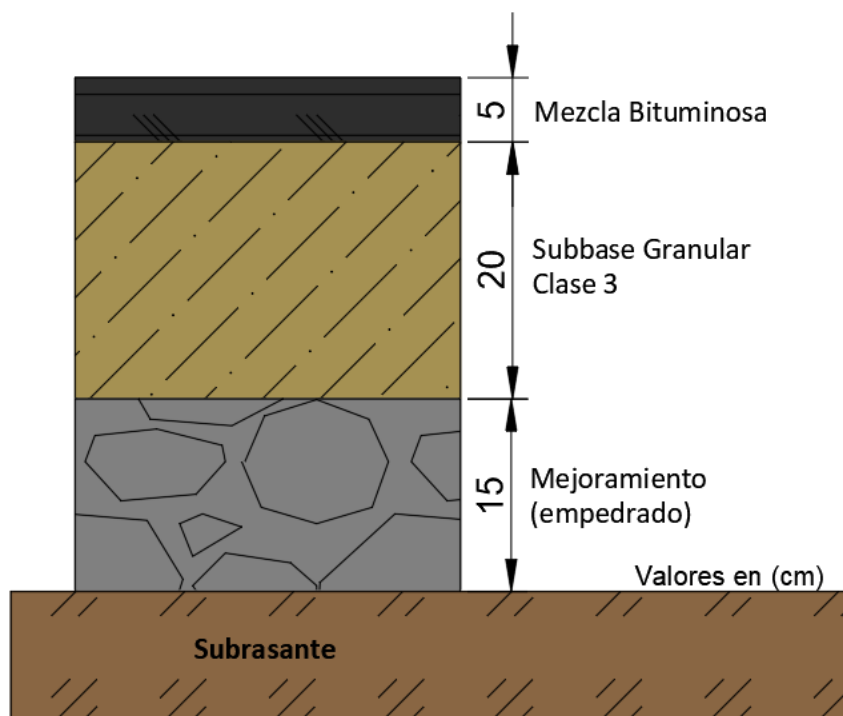


Figura 14 Estructura de pavimento final para los tramos empedrados en la vía CERCOPAMBA.

Fuente: AutoCAD – Elaboración Propia.

De esta forma, se ha propuesto dos estructuras de pavimento: una para los tramos sin empedrado y otra para los tramos que si cuentan con él. No obstante, el primer diseño para no zonas no empedradas contiene una base y subbase granular. Constructivamente, resulta más conveniente emplear el mismo tipo de material, por ello se replantea el diseño de la figura 13 cambiando la capa de base por una sola capa de subbase granular de 30 cm:

Tabla 41 Espesores y números estructurales modificados para tramos sin empedrado.

Capas	Coefficiente Estructural	Coefficiente de Drenaje	Espesores (cm)	Número Estructural (SN)
Rodadura	0.173	-	5.00	0.87
Subbase	0.043	1.00	30.00	1.30
			SN PROPUESTO	2.17

Fuente: Excel – Elaboración Propia.

A pesar de que el número estructural sea ligeramente menor que el requerido, se considera funcional esta estructura por los factores de seguridad que se ha tomado en cuenta a lo largo del diseño y la confiabilidad del proyecto. De esta manera, el pavimento modificado propuesto para las zonas sin empedrado sería como se muestra a continuación:

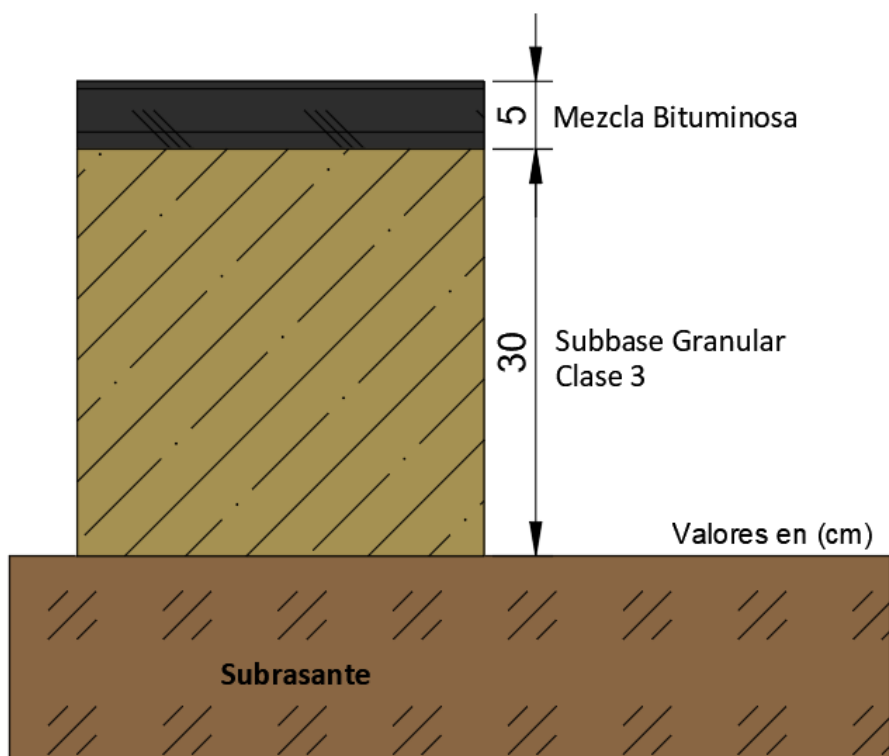


Figura 15 Estructura de pavimento modificada para las zonas sin empedrado de la vía CERCOPAMBA.

Fuente: AutoCAD – Elaboración Propia.

6. DISCUSIONES

Como ya se mencionó anteriormente, la metodología AASHTO 93 por el criterio multicapa considera la protección a esfuerzos en cada capa, por ello da como resultados espesores más grandes en comparación con el criterio posibilidad de construcción. Se demostró que el diseño por medio del método multicapa dio como resultado un $SN = 2.25$, lo cual cumplía con lo requerido. Sin embargo, no se empleó este diseño debido a que proponía una estructura de pavimento con una capa asfáltica de 10.75 cm inicialmente, lo cual no es conveniente, ni económico para una vía con un bajo flujo vehicular como la vía CERCOPAMBA.

En cambio, el criterio posibilidad de construcción, dio como resultado un $SN = 2.20$ que cumple con el valor requerido. Este método, como su nombre lo indica, propone un diseño que es posible de construir para esta vía tanto funcional como económicamente. En primer lugar, los espesores determinados son adecuados ya que cumplen con los espesores mínimos establecidos en la tabla 15. La base puede ser como mínimo de 10 cm y la subbase puede tomar valores en un rango de 15 – 60 cm (AASHTO, 1993), por lo cual, se escoge una de 10 cm y 20 cm, respectivamente. En segundo lugar, el método propone una capa asfáltica de 5 cm, a pesar de que el mínimo sea de 6 cm, ya que este valor es más usado en la práctica. Lo cual reduce costos y se ajusta a los diseños empleados en la realidad.

Considerando el estado actual de la vía CERCOPAMBA, se describió que esta contaba con tramos sin empedrado y empozamientos de agua. El diseño de la Fig. 13 se realizó precisamente para los tramos que no cuentan con la capa de empedrado original de la vía, pero es importante considerar esta capa ya que afecta directamente los niveles de rasante. Además, el empedrado

actúa como una capa de mejoramiento, lo que genera una modificación de los espesores del pavimento propuesto originalmente. Por ello, se propone otra estructura de pavimento compuesta de una rodadura de 5 cm, una subbase granular de 20 cm y una capa de mejoramiento de 15 cm que corresponde al empedrado original de la vía. El número estructural de este diseño fue de 2.25 que cumple con lo requerido. De esta forma, el pavimento para las zonas sin empedrado constaría de 3 capas (Fig. 13) y para los tramos con empedrado únicamente de las dos previamente mencionadas (Fig. 14).

No obstante, constructivamente resulta más conveniente emplear un mismo tipo de material de capas granulares para reducir costos. Por ello, se propone otro pavimento para las zonas que no cuentan con empedrado, que consiste en una capa de rodadura de 5 cm, pero elimina la capa de base y aumenta la capa de subbase a 30 cm (Fig. 15). El número estructural de esta estructura es ligeramente menor que el requerido; empero, se considera funcional por los factores de seguridad tomados en cuenta a lo largo del diseño. De esta manera, se unifican los materiales de construcción para que la ejecución de ambos pavimentos sobre esta vía sea más factible. Por tanto, los diseños finales para la vía CERCOPAMBA son los de las (Fig. 14 – 15).

Por otro lado, analizando el tipo capas propuestas para esta vía se debe usar una base granular clase 4 y una subbase granular clase 3 por que son las recomendadas para un flujo vehicular bajo según la (NEVI-12-MTOP, 2013). Los requisitos granulométricos y de calidad de los materiales para ambas capas se detallan en la Norma Vial Ecuatoriana (NEVI-12-MTOP, 2013), y son importantes considerarlos para determinar realmente la capacidad resistente de cada una. Para la capa de rodadura se recomienda utilizar una mezcla asfáltica en caliente tipo A o un tratamiento bituminoso superficial tipo I, ambos para bajos volúmenes de tránsito (NEVI-12-

MTOP, 2013). Asimismo, los requisitos y propiedades que deben tener los materiales de la rodadura están descritos en la Norma Vial Ecuatoriana. Finalmente, es importante mencionar que la subrasante tiene una buena capacidad resistente y debe compactarse y consolidarse antes de la construcción de la estructura de pavimento propuesta.

7. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo de investigación fue el diseño de pavimentos por medio de la programación de una interfaz interactiva que resuelva las ecuaciones de la AASHTO 93. En efecto, se logró programar una aplicación, mediante la extensión “App Designer” en MATLAB, que resuelva las ecuaciones para pavimentos flexibles como rígidos de acuerdo con este método de diseño. Se demostró que el software creado es totalmente funcional porque determina los mismos resultados que se obtendría resolviendo las ecuaciones manualmente por medio de los monogramas presentados en el anexo 9.2. La aplicación resuelve las ecuaciones no lineales [7] y [8] por medio de métodos numéricos, y da soluciones más exactas de manera rápida y eficaz. Por tanto, se puede concluir que se ha realizado un aporte a la comunidad académica de gran valor y de autoría totalmente ecuatoriana.

Por otro lado, se cumplió con el segundo objetivo principal de comprobar la funcionalidad de la aplicación por medio de un diseño de pavimento para un caso de estudio real: la vía CERCOPAMBA ubicada en la parroquia Guayllabamba, perteneciente al cantón Quito, provincia de Pichincha. CERCOPAMBA es una carretera rural – local que nace de la vía colectora E28B y conecta al barrio Santa Mónica con otros sectores de la parroquia en una distancia total de 3+225 kilómetros. El pavimento actual de la vía es de tipo empedrado, el cual se encuentra en malas

condiciones debido a pérdidas de este en varios tramos y empozamientos de agua. El clima donde está ubicado este camino es generalmente templado – cálido, con precipitaciones que varían de 30 a 90 mm. El estudio del tráfico en esta vía dio como resultado una proyección del TPDA inicial de 50 vehículos pesados diarios en un año, y el estudio del suelo de la zona sugirió una resistencia portante del 12%. Con estos datos y las recomendaciones de la AASHTO, se propuso un diseño de pavimento por medio del criterio posibilidad de construcción.

Se utilizó este criterio debido a que los espesores determinados por el método multicapa no fueron adecuados para la vía de análisis. La estructura de pavimento diseñada por este criterio proponía una capa asfáltica muy grande, lo que cual no es factible, ni económico para una vía de bajo flujo vehicular. La propuesta realizada por el criterio posibilidad de construcción se considera más acertada, ya que el SN propuesto no estaba sobreestimando el valor requerido y los espesores de las capas base y subbase cumplían con los mínimos especificados. Además, el espesor de la capa de rodadura sugerida por este método era un valor mucho menor que el propuesto por el criterio multicapa. Específicamente se decidió utilizar una capa asfáltica de 5 cm, ya que es un valor empleado en la práctica y se ajusta a los requerimientos estructurales de CERCOPAMBA. Por tanto, se deduce que el criterio multicapa no es apropiado para vías locales/rurales con bajos volúmenes de tránsito pesado.

Para vías que presentan un pavimento de empedrado original, esta capa está actuando como mejoramiento en la estructura de pavimento. Por ello, se definen dos tipos de pavimentos para zonas con y sin empedrado. El diseño para los tramos empedrados cuenta de una capa asfáltica de 5 cm, una subbase de 20 cm y una capa de mejoramiento que corresponden al empedrado de la vía original. En cambio, el diseño para los tramos sin empedrado elimina la base y aumenta el

espesor de la subbase a 30 cm. Esto con la finalidad de emplear el mismo tipo de material granular porque resulta más conveniente y económico constructivamente.

7.1. Limitaciones

Una de las limitaciones de este trabajo fue el estudio de tráfico realizado. Por cuestión de tiempo, no se pudo obtener un volumen vehicular que represente realmente el tránsito sobre la vía CERCOPAMBA. Solo se pudo recolectar volúmenes de tráfico en dos intervalos horarios en un día particular, por lo cual, se tuvo que aplicar factores de expansión para tener una proyección del tráfico promedio diario anual sobre la vía. El empleo de estos factores pudo sobreestimar o subestimar el valor del TPDA real. Lo cual podría alterar los resultados del diseño de pavimento obtenidos para CERCOPAMABA.

De igual forma, otra de las limitaciones encontradas fue el estudio de suelo. En este trabajo, se realizó únicamente el ensayo DCP para la obtención de CBR en campo. Como este ensayo puede estar sujeto a varios errores aleatorios, se recomienda complementarlo con la obtención del CBR en laboratorio. Con ambos ensayos, se puede establecer una correlación entre el CBR de laboratorio y de campo, que permita obtener un valor de resistencia más real. No obstante, en esta investigación solo se pudo realizar el ensayo DCP, pero si se utilizó una correlación obtenida para los suelos de Guayllabamba para obtener un CBR más adecuado a nuestro problema.

7.2. Recomendaciones

Para futuras investigaciones en este tema se recomienda tomar en cuenta las limitaciones identificadas en este trabajo y aplicarlas. Es decir, se recomienda realizar un estudio de tráfico más representativo en la zona para obtener un tráfico promedio diario anual apropiado para

cálculos y diseño. Asimismo, se recomienda obtener el CBR del suelo en campo y laboratorio. Así, se reduciría el porcentaje de error de los datos obtenidos en campo, y finalmente, se podría obtener un valor de CBR más apropiado por medio de una correlación entre ambos ensayos.

Otra recomendación importante para este trabajo final es mejorar la interfaz gráfica creada añadiéndole un panel o pestaña que permita calcular los espesores de un pavimento flexible por medio de los criterios multicapa o posibilidad de construcción. Como se había mencionado anteriormente, el método AASHTO 93 no diseña la estructura de pavimento flexible. Para pavimentos rígidos determina directamente el espesor de la losa de hormigón que requiere la vía, mientras que, para pavimentos flexibles devuelve el número estructural SN. Este valor es necesario para diseñar este tipo de pavimentos. Por ello, para un futuro avance en este tema, se recomienda implementar el diseño de pavimentos flexibles generando así un software totalmente completo que aplique la metodología AASHTO 93.

8. REFERENCIAS

1. AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. ACI 318-19. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*.
3. ASTM. (2018). *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*. <https://www.astm.org/d6951-03.html>
4. Barreno, J. D. (2021). *Estudio de la correlación entre los ensayos (DCP) penetrómetro dinámico de cono y (CBR) relación de soporte californiana en vías rurales de bajo volumen de tránsito*. Universidad San Francisco de Quito.
5. Boada, G. (2020). *Diseño de Pavimentos Rígidos: Método AASHTO 93*.
6. Climate-Data.org. (s. f.). *Clima Guayllabamba: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Guayllabamba—Climate-Data.org*. Recuperado 26 de noviembre de 2021, de <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-de-pichincha/guayllabamba-178867/>
7. EPMMOP, ASTEC, Romo, F., & León & Godoy. (2011). *Estudios de Ingeniería Definitivos del Proyecto Ruta Sur—Vía Aeropuerto*. [http://www.epmmop.gob.ec/doc_solucion_guayasamin/2.%20ANTECEDENTES/Ruta%20Viva%20sur/RUTA%20VIVA/1.%20Estudios%20ambientales/3.%20INFORME%20FUENTE%20DE%20MATERIALES%20\(10p\).pdf](http://www.epmmop.gob.ec/doc_solucion_guayasamin/2.%20ANTECEDENTES/Ruta%20Viva%20sur/RUTA%20VIVA/1.%20Estudios%20ambientales/3.%20INFORME%20FUENTE%20DE%20MATERIALES%20(10p).pdf)
8. Fuentes, J. (2017). *MÉTODO AASHTO 93 PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS*.

9. GAD Guayllabamba. (s. f.). *Datos generales – Guayllabamba*. Recuperado 26 de noviembre de 2021, de <https://gadguayllabamba.gob.ec/datos-generales/>
10. Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2009). *Traffic & Highway Engineering* (Fourth Edition). Cengage Learning.
11. Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (Second Edition). Pearson Prentice Hall.
12. López Lindao, G., & DESAE. (2010). *Población y Tasas de Crecimiento Intercensal de 2010-2001-1999 por sexo, según Parroquias*. Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC).
13. Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2013). *PAVEMENT ENGINEERING Principles and Practice* (Second). CRC Press.
14. MathWorks. (1994). *MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico*. <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
15. Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (Segunda). Universidad Católica de Colombia.
16. NEVI-12-MTOP. (2013). *Volumen N°3 Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*. 12, 1028.
17. Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2007). *Pavement Design and Materials*. John Wiley & Sons, Inc.
18. Rico, A., & Del Castillo, H. (1981). *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas* (Vol. 2). LIMUSA.

19. Seminario, R. (s. f.). *METODOS NUMERICOS PARA INGENIERIA*.
<https://disi.unal.edu.co/~lctorress/MetNum/LiMetNu2.pdf>
20. Silva, E. (2018). *Estudio de Asfaltado Avenida San José*. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Pastaza.
21. Solis Valarezo, W., & MTOP. (2016). *Acuerdo Ministerial No. 018*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/02/LOTAIP_1_ACUERDO-MINISTERIAL-018-2016.pdf
22. Viscarra Agreda, F. (2005). *El Cono Dinámico de Penetración y su Aplicación en la Evaluación de Suelos*. Universidad Privada Boliviana.
<http://civil.upb.edu/files/2010/11/EL-CONO-DIN%3%81MICO-DE-PENETRACI%3%93N-Y-SU-APLICACI%3%93N-EN-LA-EVALUACI%3%93N-DE-SUELOS.pdf>
23. Weather Atlas, Y. M. G. (s. f.). *Guayllabamba, Ecuador—Información detallada del clima y previsión meteorológica mensual*. Weather Atlas. Recuperado 3 de diciembre de 2021, de <https://www.weather-atlas.com/es/ecuador/guayllabamba-clima>
24. Yáñez, G. (2012). *Diseño de Pavimentos—Maestría de Ingeniería Vial PUCE*.

9. ANEXOS

9.1. Estudio del Tráfico

9.1.1. Caracterización del tránsito según MTOP 2012

Tabla 42 Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones de Vehículos de Carga Pesada.

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESO BRUTO VEHICULAR MÁXIMO PERMITIDO (toneladas)	LONGITUDES MÁXIMAS PERMITIDAS (metros)		
				Largo	Ancho	Alto
2D			7	5,50	2,60	3,00
2DA			10	7,50	2,60	3,50
2DB			18	12,20	2,60	4,10
3-A			27	12,20	2,60	4,10
4-C			31	12,20	2,60	4,10
4-0 OCTOPUS			34	12,20	2,60	4,10
V2DB			18	12,20	2,60	4,10
V3A			27	12,20	2,60	4,10
T2			18	8,50	2,60	4,10
T3			27	8,50	2,60	4,10
R2			14	10,00	2,60	4,10
R3			21	10,00	2,60	4,10
S1			18	13,20	2,60	4,10
S2			27	13,20	2,60	4,10
S3			31	13,20	2,60	4,10
B1			14	10,00	2,60	4,10
B2			21	10,00	2,60	4,10
B3			28	10,00	2,60	4,10

Fuente: (Solis Valarezo & MTOP, 2016).

9.1.2. Factor Equivalente de Carga

$$F_{SS} = \left(\frac{L_{SS}}{6,6}\right)^4$$

*Ejes simples
Neumático simple*

$$F_{sd} = \left(\frac{L_{sd}}{8,2}\right)^4$$

*Ejes simples
Doble neumático*

$$F_t = \left(\frac{L_t}{15}\right)^4$$

Ejes tandem

$$F_{tr} = \left(\frac{L_{tr}}{23}\right)^4$$

Ejes tridem

Figura 16 Fórmulas para la determinación de los factores de ejes equivalentes.

9.2. Anexo Coeficientes estructurales

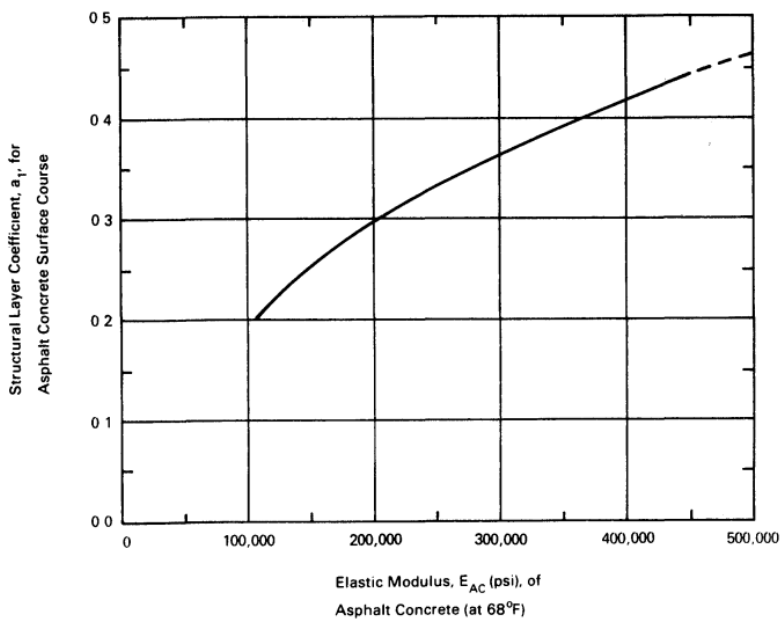


Gráfico 7 Coeficiente estructural (a_1) en función del módulo resiliente del concreto asfáltico.

Fuente: (AASHTO, 1993).

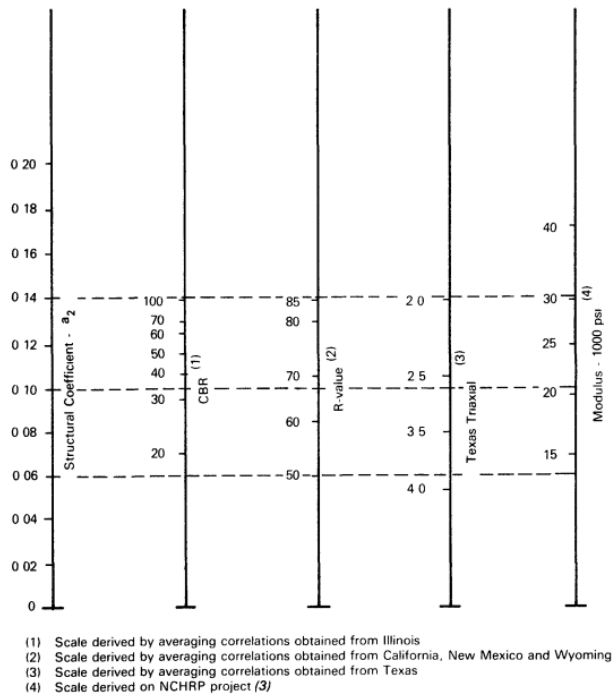


Gráfico 8 Coeficiente estructural (a_2) en función de varios parámetros de resistencia de la base granular.

Fuente: (AASHTO, 1993).

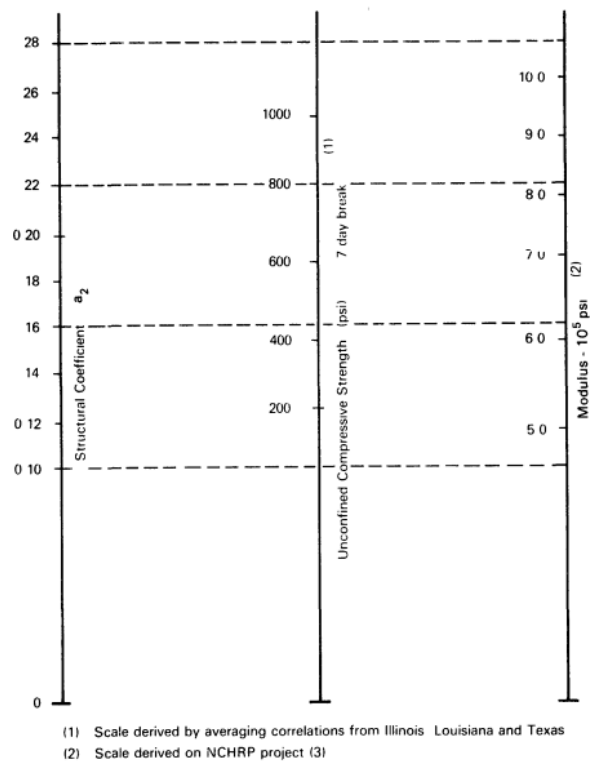


Gráfico 9 Coeficiente estructural (a_2) en bases tratadas con cemento para diferentes parámetros de resistencia.

Fuente: (AASHTO, 1993).

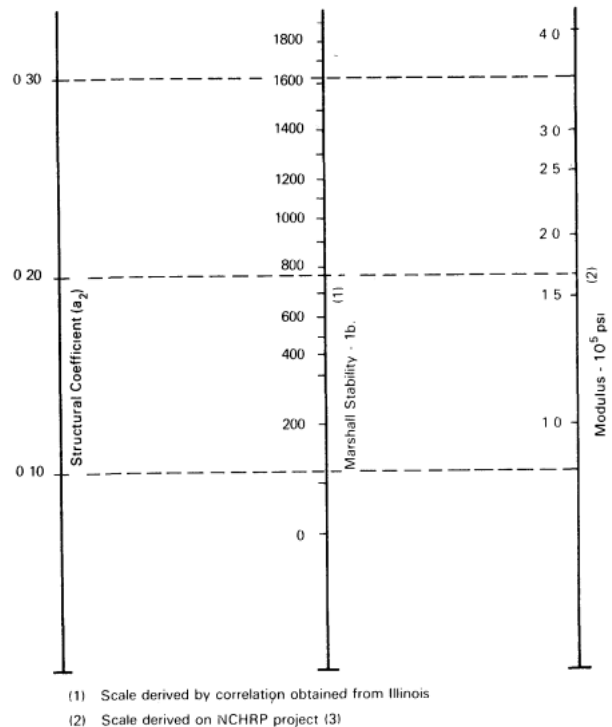


Gráfico 10 Coeficiente estructural (a_2) en bases tratadas con asfalto para diferentes parámetros de resistencia.

Fuente: (AASHTO, 1993).

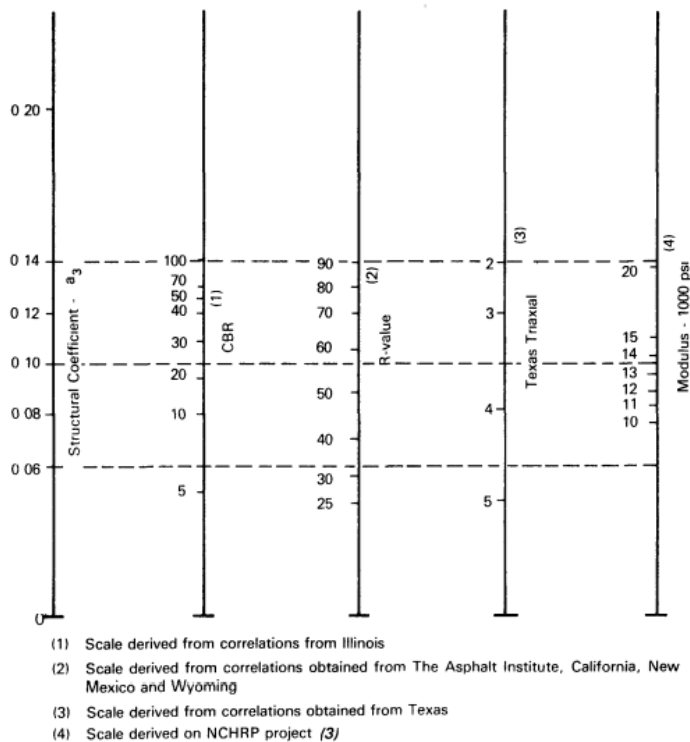


Gráfico 11 Coeficiente estructural (a_3) con diferentes parámetros de resistencia para la subbase.

Fuente: (AASHTO, 1993).

9.3. Anexo Monogramas de Solución

9.3.1. Pavimento Flexible

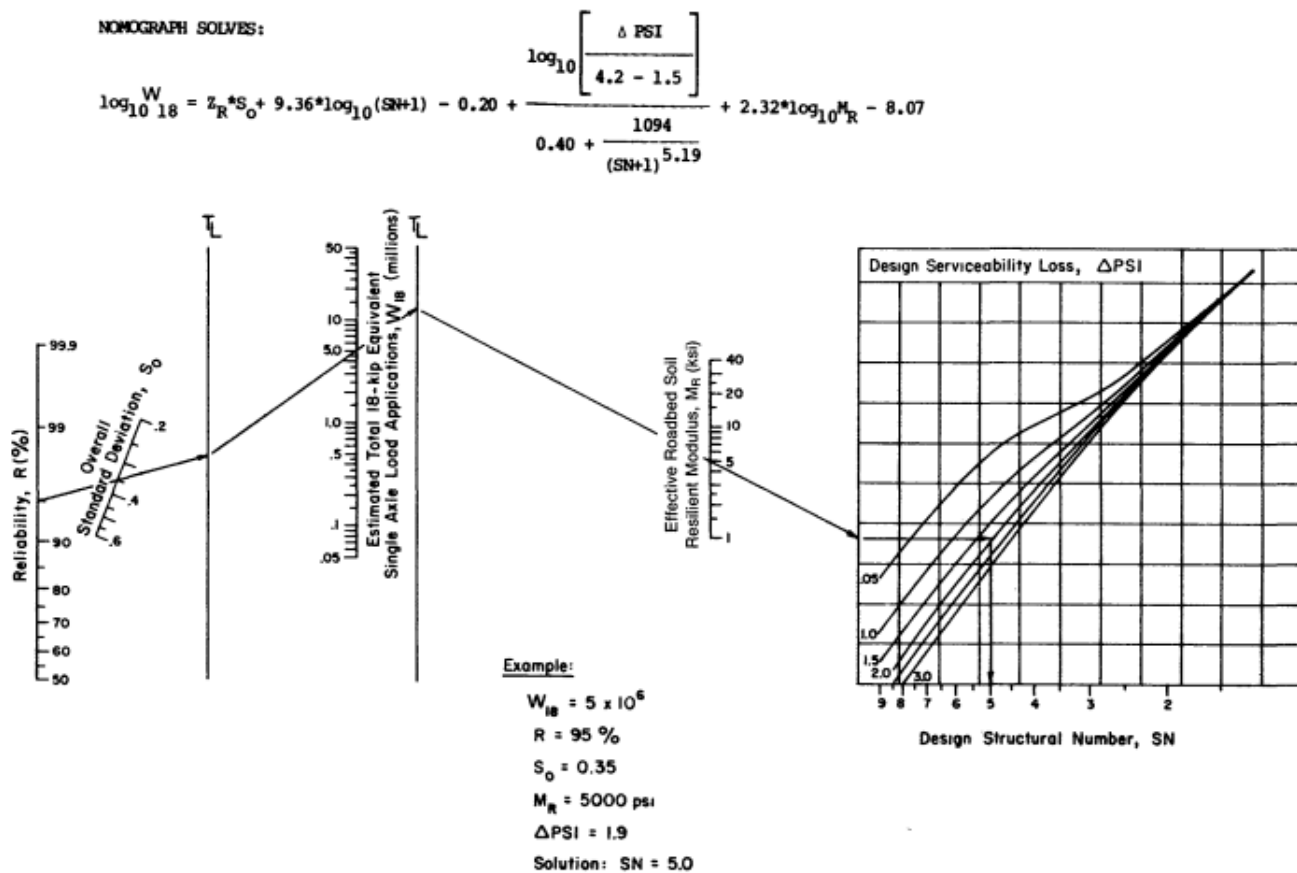


Figure 3.1. Design Chart for Flexible Pavements Based on Using Mean Values for Each Input

Figura 17 Cuadro de diseño para pavimentos flexibles basado en el uso de valores medios para cada entrada.

Fuente: (AASHTO, 1993).

9.3.2. Pavimento Rígido

NOMOGRAMA SOLVIBS:

$$\log_{10} \frac{W_{18}}{18} = Z_R \cdot S_0 + 7.35 \cdot \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta \text{PSI}}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \cdot 10^7}{(D+1)^{0.46}}} + (4.22 - 0.32 S_0) \cdot \log_{10} \left[\frac{S'_c + C_d \left[D^{0.75} - 1.132 \right]}{215.63 \cdot J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/\lambda)^{0.25}} \right]} \right]$$

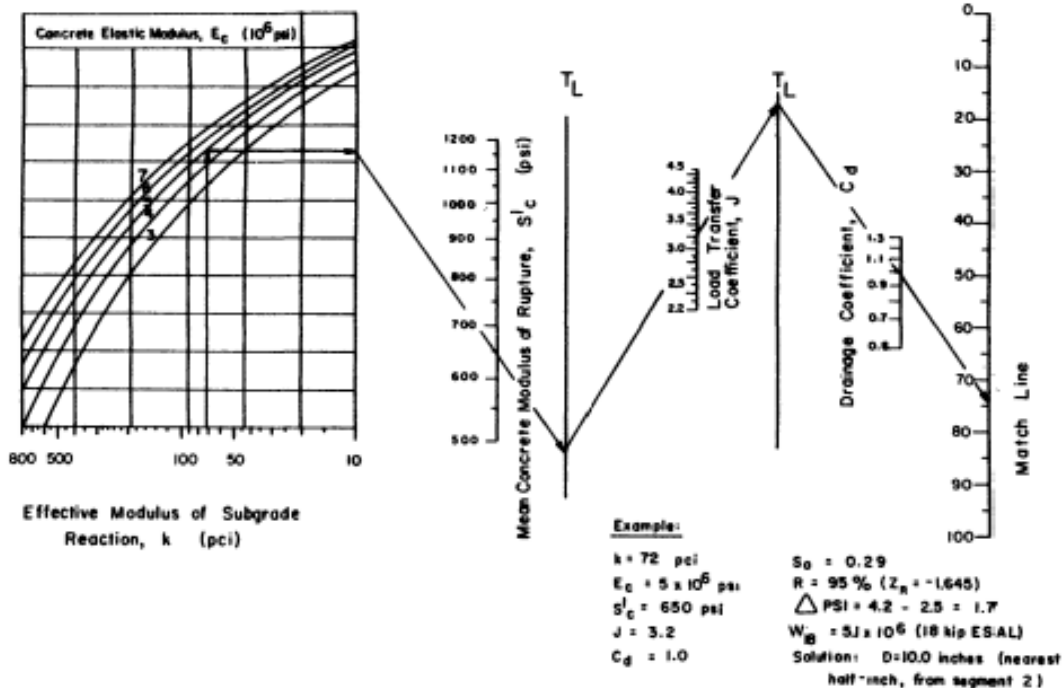


Figure 3.7. Design Chart for Rigid Pavement Based on Using Mean Values for Each Input Variable (Segment 1)

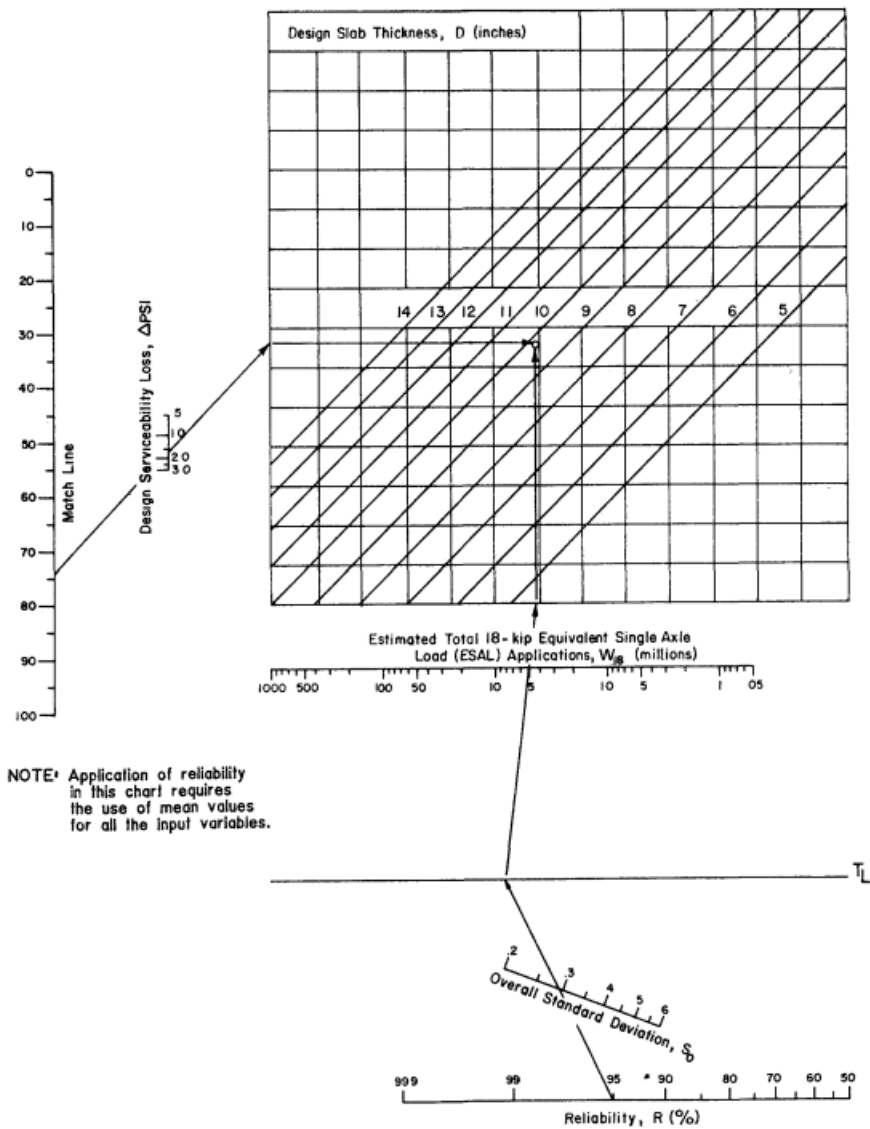


Figure 3.7. Continued—Design Chart for Rigid Pavements Based on Using Mean Values for Each Input Variable (Segment 2)

Figura 18 Cuadro de diseño para pavimentos rígidos basado en el uso de valores medios para cada entrada.

Fuente: (AASHTO, 1993).

9.4. Estado Actual Vía CERCOPAMBA



0+050 km



0+500 km



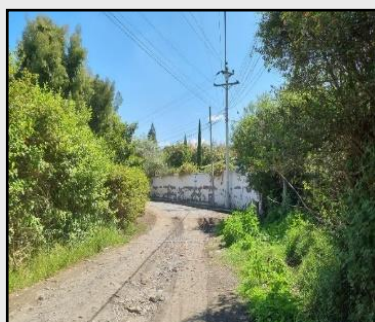
0+700 kmm



1+100 km



1+600 km



1+700 km

9.5. Estudio de Tráfico

9.5.1. Factores de Expansión del Tráfico

Tabla 43 Factores de expansión horarios para una carretera rural primaria.

<i>Hour</i>	<i>Volume</i>	<i>HEF</i>	<i>Hour</i>	<i>Volume</i>	<i>HEF</i>
6:00–7:00 a.m.	294	42.00	6:00–7:00 p.m.	743	16.62
7:00–8:00 a.m.	426	29.00	7:00–8:00 p.m.	706	17.49
8:00–9:00 a.m.	560	22.05	8:00–9:00 p.m.	606	20.38
9:00–10:00 a.m.	657	18.80	9:00–10:00 p.m.	489	25.26
10:00–11:00 a.m.	722	17.10	10:00–11:00 p.m.	396	31.19
11:00–12:00 p.m.	667	18.52	11:00–12:00 a.m.	360	34.31
12:00–1:00 p.m.	660	18.71	12:00–1:00 a.m.	241	51.24
1:00–2:00 p.m.	739	16.71	1:00–2:00 a.m.	150	82.33
2:00–3:00 p.m.	832	14.84	2:00–3:00 a.m.	100	123.50
3:00–4:00 p.m.	836	14.77	3:00–4:00 a.m.	90	137.22
4:00–5:00 p.m.	961	12.85	4:00–5:00 a.m.	86	143.60
5:00–6:00 p.m.	892	13.85	5:00–6:00 a.m.	137	90.14
Total daily volume = 12,350.					

Fuente: (Garber & Hoel, 2009).

Tabla 44 Factores de expansión diarios para una carretera rural primaria.

<i>Day of Week</i>	<i>Volume</i>	<i>DEF</i>
Sunday	7895	9.515
Monday	10,714	7.012
Tuesday	9722	7.727
Wednesday	11,413	6.582
Thursday	10,714	7.012
Friday	13,125	5.724
Saturday	11,539	6.510
Total weekly volume = 75,122.		

Fuente: (Garber & Hoel, 2009).

Tabla 45 Factores de expansión mensuales para una carretera rural primaria.

<i>Month</i>	<i>ADT</i>	<i>MEF</i>
January	1350	1.756
February	1200	1.975
March	1450	1.635
April	1600	1.481
May	1700	1.394
June	2500	0.948
July	4100	0.578
August	4550	0.521
September	3750	0.632
October	2500	0.948
November	2000	1.185
December	1750	1.354

Total yearly volume = 28,450.
Mean average daily volume = 2370.

Fuente: (Garber & Hoel, 2009).

9.6. Estudio de Suelo

9.6.1. Obtención de CBR por ensayo DCP aplicando la norma ASTM D-6951-03

La ASTM recomienda que se recolecten los datos como se muestra en las tablas a continuación para cada punto de análisis en la vía:

Tabla 46 Hoja de datos DCP - P1.

Cantidad de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor de mazo	Índice DCP (mm/golpe)	% CBR
0	55	--	--	--	--	--
7	140	85	12	1	12	18
8	210	70	9	1	9	25
12	275	65	5	1	5	48
7	310	35	5	1	5	48
7	350	40	6	1	6	39
7	390	40	6	1	6	39
6	420	30	5	1	5	48
7	480	60	9	1	9	25
4	510	30	8	1	8	28
8	610	100	13	1	13	17
					Promedio	34

Tabla 47 Hoja de datos DCP - P2.

Cantidad de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor de mazo	Índice DCP (mm/golpe)	% CBR
0	60	--	--	--	--	--
10	155	95	10	1	10	22
8	200	45	6	1	6	39
10	250	50	5	1	5	48
9	300	50	6	1	6	39
10	350	50	5	1	5	48
17	400	50	3	1	3	85
20	460	60	3	1	3	85
					Promedio	52

Tabla 48 Hoja de datos DCP - P3.

Cantidad de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor de mazo	Índice DCP (mm/golpe)	% CBR
0	70	--	--	--	--	--
6	155	85	14	1	14	15
6	270	115	19	1	19	11
7	345	75	11	1	11	20
8	400	55	7	1	7	33
8	455	55	7	1	7	33
6	500	45	8	1	8	28
6	555	55	9	1	9	25
					Promedio	24

Tabla 49 Hoja de datos DCP - P4.

Cantidad de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor de mazo	Índice DCP (mm/golpe)	% CBR
0	55	--	--	--	--	--
5	110	55	11	1	11	20
5	150	40	8	1	8	28
5	200	50	10	1	10	22
6	275	75	13	1	13	17
4	315	40	10	1	10	22
4	360	45	11	1	11	20
4	400	40	10	1	10	22
5	450	50	10	1	10	22
4	500	50	13	1	13	17
4	550	50	13	1	13	17
5	605	55	11	1	11	20
4	655	50	13	1	13	17
4	710	55	14	1	14	15
6	810	100	17	1	17	12
					Promedio	19

Tabla 50 Hoja de datos DCP - P5.

Cantidad de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor de mazo	Índice DCP (mm/golpe)	% CBR
0	65	--	--	--	--	--
7	150	85	12	1	12	18
6	200	50	8	1	8	28
6	250	50	8	1	8	28
7	305	55	8	1	8	28
9	400	95	11	1	11	20
5	450	50	10	1	10	22
4	500	50	13	1	13	17
5	560	60	12	1	12	18
4	610	50	13	1	13	17
4	665	55	14	1	14	15
2	700	35	18	1	18	11
4	765	65	16	1	16	13
2	800	35	18	1	18	11
4	865	65	16	1	16	13
Promedio						19

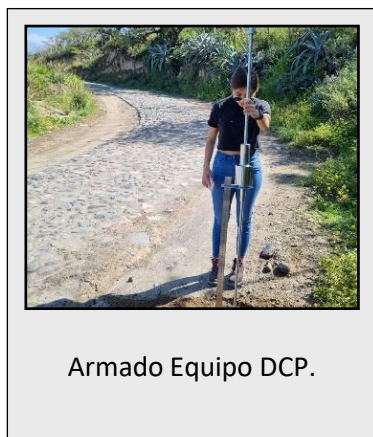
La fórmula empleada para obtener cada % CBR a través del método DCP es apta para todo tipo de suelo (granular o cohesivo) y se muestra a continuación (Viscarra Agreda, 2005):

$$\text{CBR} = \frac{292}{\text{DCP}^{1.12}} \quad (12)$$

Donde DCP precisamente es el índice DCP (mm/golpe) que se obtiene en cada tabla como:

$$\text{DCP} = \frac{\text{Penetración entre lecturas (mm)}}{\text{Cantidad de golpes}} \quad (13)$$

9.6.2. Fotografías ensayo DCP



9.7. Ejecutable aplicación AASHTO 93

Para descargar el ejecutable de la aplicación creada en este trabajo final abra el siguiente enlace y siga los siguientes pasos:

- 1) Descomprimir el archivo .zip y dirigirse a la carpeta “for – redistribution”.
- 2) Ejecutar como administrador el archivo ejecutable con nombre “MyAppInstaller_web.exe”.
- 3) Seguir la secuencia de pasos y escoger la carpeta de destino de su preferencia.
- 4) Se instalarán tres carpetas con los nombres de: “appdata”, “application” y “uninstall”.
- 5) Abrir la carpeta “application” y ahí se encontrará la aplicación instalada.

Enlace:

https://estudusfqedu-my.sharepoint.com/:u:/g/person/abedonb_estud_usfq_edu_ec/EY-tNzmpNm1AnFQGm_bOlqcBS7wpC1jAfewMdLwXGzHws?e=JaceOX

9.8. Números estructurales de la base y subbase

MATLAB App

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO
Diseño de Pavimentos utilizando la metodología AASHTO

ECUACIÓN AASHTO 1993

AASHTO

Tipo de Pavimento
 Pavimento Flexible Pavimento Rígido

Serviciabilidad y Desviación Estándar - So
 PSI inicial So
 PSI final

Confiabilidad - R
 Confiabilidad

CBR y Módulo Resiliente - Mr
 CBR %
 Módulo Resiliente (Mr) psi

Tipo de Análisis
 Número Estructural (SN)

Número de Ejes Equivalentes - W18
 TPDA inicial Ld
 TPDA final Dt
 Periodo de Diseño (n) años
 FCE
 W18

Adicionales para pavimentos rígidos
 Módulo de Elasticidad del Concreto (Ec) psi
 Módulo de Rotura del Concreto (Sc) psi
 Coeficiente de Transmisión de Carga (J)
 Coeficiente de Drenaje (Cd)

Figura 19 Solución del SN de la base con 80% de CBR por medio de la aplicación creada.

MATLAB App

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO
Diseño de Pavimentos utilizando la metodología AASHTO

ECUACIÓN AASHTO 1993

AASHTO

Tipo de Pavimento
 Pavimento Flexible Pavimento Rígido

Serviciabilidad y Desviación Estándar - So
 PSI inicial So
 PSI final

Confiabilidad - R
 Confiabilidad

CBR y Módulo Resiliente - Mr
 CBR %
 Módulo Resiliente (Mr) psi

Tipo de Análisis
 Número Estructural (SN)

Número de Ejes Equivalentes - W18
 TPDA inicial Ld
 TPDA final Dt
 Periodo de Diseño (n) años
 FCE
 W18

Adicionales para pavimentos rígidos
 Módulo de Elasticidad del Concreto (Ec) psi
 Módulo de Rotura del Concreto (Sc) psi
 Coeficiente de Transmisión de Carga (J)
 Coeficiente de Drenaje (Cd)

Figura 20 Solución del SN de la subbase con 30% de CBR por medio de la aplicación creada.