

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL

Tema: Codificación de una herramienta productiva en el lenguaje de programación Python para la elaboración de prediseños de pavimentos articulado (adoquinado), rígido y flexible en conformidad con las normativas técnicas vigentes en el Ecuador

AUTOR:

ESTEBAN SANTIAGO SALGADO REVELO

QUITO DM, DICIEMBRE DE 2023

Índice de contenido

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Justificación e importancia	4
1.2. Planteamiento del problema.....	4
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Alcance	6
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	6
2.1. Prediseño de pavimentos	6
2.1.1. Pavimento flexible.....	7
2.1.2. Pavimento articulado	7
2.1.3. Pavimento rígido	8
2.2. Análisis de Normativas Técnicas para prediseño de pavimentos	9
2.2.1. Guía para el diseño de estructuras de pavimento AASHTO, 1993	9
2.2.2. Manual de diseño para pavimentos de concreto PCA, 1984	17
3. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA	24
3.1. Desarrollo de algoritmos de calculo	24
3.1.1. AASHTO.....	24
3.1.2. PCA	25
3.2. Codificación de la herramienta	29
3.3. Pruebas y validación	29
3.4. Desarrollo de la interfaz de usuario	30
3.5. Documentación de la herramienta	31
4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS	33
4.1. Presentación de resultados	33
4.1.1. Resultados de cálculo	33
4.1.2. Cuantificación de tiempos de cálculo.....	40
4.2. Análisis de resultados	44
4.2.1. Resultados de cálculo	44
4.2.2. Cuantificación de ahorros de tiempos de cálculo	45
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
5.1. Conclusiones.....	46
5.2. Recomendaciones	48
6. BIBLIOGRAFÍA.....	49

Índice de tablas

Tabla 1: Niveles de confiabilidad.....	10
Tabla 2: Desviación estándar normal	11
Tabla 3: Desviación estándar.....	11
Tabla 4: Coeficientes de drenaje para base y subbase.....	17
Tabla 5: Efectos de una subbase de suelo granular en los valores de K.....	19
Tabla 6: Esfuerzo equivalente - sin bermas (eje simple / eje tándem)	20
Tabla 7: Factores de erosión - sin bermas (eje simple / eje tándem).....	22
Tabla 8: Error porcentual en el cálculo de a_1 usando ecuación 2	29
Tabla 9: Resultados cálculo manual pavimentos flexibles.....	37
Tabla 10: Resultados calculo manual pavimentos rígidos	40
Tabla 11: Variación de resultados en el cálculo manual y automático de pavimento flexible	44
Tabla 12: : Variación de resultados en el cálculo manual y automático de pavimento articulado	44
Tabla 13: Variación de resultados en el cálculo manual y automatico de pavimento rígido	45

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Estructura de un pavimento rígido	8
Ilustración 2: Nomograma para el cálculo del número estructural.....	12
Ilustración 3: Coeficiente estructural del asfalto	14
Ilustración 4: Coeficiente estructural de la base, suelo granular	15
Ilustración 5: Coeficiente estructural de la subbase, suelo granular.....	16
Ilustración 6: Interrelaciones aproximadas de clasificación de suelos y valores portantes. 18	
Ilustración 7: Análisis de fatiga	21
Ilustración 8: Análisis de erosión - sin bermas.....	23
Ilustración 9: Imagen de la interfaz de usuario.....	30
Ilustración 10: Grafica de resultados	31
Ilustración 11: Resultados pavimento articulado.....	37
Ilustración 12: Configuración de capas cálculo manual de pavimento articulado	38
Ilustración 13: Resultados pavimento rígido	39
Ilustración 15: Determinación de K.....	42
Ilustración 16: cálculo de repeticiones por fatiga.....	43
Ilustración 17: Cálculo de repeticiones por erosión	43

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación e importancia

La creación de una herramienta de productividad (programa) de prediseño de pavimentos surge en base a la necesidad de optimizar y agilizar la planificación y diseño de proyectos de infraestructura vial. La obtención de resultados a partir de cálculos automatizados y precisos supondrá una optimización de recursos y reducción de posibles errores humanos. La tecnología necesaria para desarrollar esta herramienta está disponible y es accesible en consecuencia su implementación es técnicamente factible.

La elaboración manual de prediseños de pavimentos puede ser un proceso laborioso, en especial si se presentan varias alternativas antes de la elección de una propuesta definitiva. Por consiguiente, la generación automatizada de prediseños puede acelerar la toma de decisiones dentro de una etapa inicial del proceso de planificación y diseño de proyectos de pavimentación.

Estos prediseños al estar desarrollados bajo el cumplimiento de parámetros y estándares establecidos por las normas técnicas vigentes del país, así como del dominio de los procedimientos-técnica de cálculo permitirán dar una referencia inicial sólida de resultados.

1.2. Planteamiento del problema

La elaboración de esta herramienta digital utilizando el lenguaje de programación Python, busca agilizar y optimizar el proceso de prediseño de infraestructura vial. Esta herramienta será capaz de generar prediseños de pavimentos articulados, rígidos y flexibles en estricto cumplimiento de las normativas técnicas vigentes en el país.

Será necesario la revisión y estudio de los métodos de diseño para cada tipo de estructura de pavimento, con la finalidad de identificar las características propias y consideraciones necesarias para la correcta elaboración de los prediseños. Se requerirá un nivel prolijo de dominio y manejo de las normativas y metodologías de diseño, de tal forma que se pueda sistematizar no solo el procedimiento, sino también la preparación y tratamiento de información empírica tabulada que tienen estos métodos.

Para el análisis de las metodologías de diseño para pavimento articulado se utilizará los procedimientos establecidos en la normativa AASHTO Guide for Design of Pavement Structures y las correcciones establecidas en la guía Structural Design of Interlocking

Concrete Pavement for Municipal Streets and Roadways ASCE/T&DI/ICPI 58-16, publicada en 2016. Para el análisis del diseño de pavimento rígido se utilizará los procedimientos establecidos en la metodología de PCA, Thickness design for concrete highway and street pavements, publicada en 1984. Para el análisis de las metodologías de diseño para pavimento flexible se utilizará los procedimientos establecidos en la normativa AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 4th Edition with 1998 Supplement, publicada en 1998.

Es necesario considerar también los parámetros de diseño nacionales para los tres tipos de pavimento, establecidos por Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12-MTOP Volumen N°2 – Libro A Norma para estudios y diseños viales, publicada en el 2013.

Por otro lado, se precisa el conocimiento y dominio de programación en Python en su tercera versión, conocimiento adquirido por investigación propia. Se considera este lenguaje apropiado para el desarrollo de este trabajo de integración curricular debido a que es de código abierto, multiplataforma y presenta múltiples librerías matemáticas y gráficas.

El dominio de las metodologías de diseño y el lenguaje de programación Python deberán ser integrados para garantizar el cumplimiento de las expectativas de este proyecto. Los resultados de los prediseños de tres modelos teóricos obtenidos mediante el uso de esta herramienta y mediante la resolución de cálculos manuales servirán para evidenciar la eficiencia y eficacia además de la precisión que se busca alcanzar con esta herramienta.

1.3.Objetivos

OBJETIVO GENERAL:

Codificación de una herramienta productiva en el lenguaje de programación Python para la elaboración de prediseños de pavimentos articulado (adoquinado), rígido y flexible en conformidad con las normativas técnicas vigentes en el Ecuador.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Determinar los prediseños de las estructuras de pavimento manualmente según parámetros impuestos de suelo, materiales y tráfico, para tres modelos teóricos.
- Codificar en el lenguaje Python (programar) los prediseños de las estructuras de pavimento según los métodos de diseño AASHTO, ASCE para pavimentos articulados; PCA para pavimentos rígidos; AASHTO para pavimentos flexibles y los requerimientos de la norma ecuatoriana NEVI-12.

- Comparar los prediseños manuales con los resultados obtenidos del uso del programa elaborado para los tres modelos teóricos usados.

1.4. Alcance

Este proyecto de integración curricular se limita a la creación de una herramienta tecnológica que permita a los profesionales de la ingeniería vial generar de forma precisa y eficiente prediseños de pavimentos articulados, rígidos y flexibles, con un estricto cumplimiento de los métodos de cálculo (AASHTO93, PCA, ASCE) y las regulaciones técnicas vigentes en Ecuador (NEVI-12 MTOP).

Este estudio no contempla las fases de construcción ni tampoco las condiciones económicas, sociales o técnicas más allá del prediseño de los pavimentos anteriormente mencionados.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Prediseño de pavimentos

La etapa de prediseño de pavimentos en un proyecto vial es un punto de partida de gran importancia en el proceso de planificación y construcción de carreteras o calles. Esta fase permite un análisis inicial de las características y parámetros que proporcionarán la base para el diseño final, permitirá también comprender las necesidades y objetivos del proyecto para garantizar su viabilidad y calidad.

Esta etapa permite el análisis preliminar de factores como el tráfico previsto, la carga que soportará el pavimento y la selección de materiales, se consideran también aspectos geotécnicos, como la capacidad de soporte del suelo y condiciones de drenaje.

Los resultados del prediseño proporcionan una base sólida para la fase de diseño, donde se detallan todas las especificaciones técnicas y parámetros definitivos para la construcción del pavimento.

El proceso de prediseño de pavimentos consiste en la estructuración de los componentes y sus características para la conformación de la infraestructura vial formada a partir de diferentes capas que trabajan en conjunto para dar soporte y resistencia al pavimento, estas capas dependiendo del tipo de pavimento y sus requerimientos son:

Subrasante, capa inferior conformada por suelo natural o excavado la cual aporta la capacidad de soporte inicial a partir de la cual se realizará el diseño de las capas superiores.

Subbase, capa conformada por material granular compactado situada sobre la subrasante utilizada para mejorar la estabilidad y propiedades de drenaje del pavimento.

Base, esta capa se compone de materiales finos como arena y grava, la cual proporciona una superficie resistente y nivelada que servirá como superficie de apoyo para la capa de rodadura.

Cama de arena, capa presente únicamente en pavimentos articulados, la cual facilitara el posicionamiento y nivelación de los adoquines, esta capa posee espesor de entre 3 y 5 centímetros.

Capa de rodadura, es la capa superior del pavimento. En Ecuador los tres principales pavimentos según la capa de rodadura son rígidos, flexibles y articulados. (MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR, 2013)

2.1.1. Pavimento flexible

Los pavimentos flexibles poseen una capa de rodadura compuesta por una mezcla bituminosa de asfalto, su uso es común y son utilizados en carreteras y calles en todo el mundo. Esta capa de rodadura proporciona una superficie de rodadura suave y resistente que se adapta a las cargas y el tráfico vehicular de diseño.

Para el prediseño de pavimentos flexibles en este trabajo de integración curricular, se utilizó la normativa AASHTO 93 la cual contempla ciertos criterios incluidos dentro del proceso de diseño y prediseño siendo los más importantes el tráfico, los materiales, el espesor del pavimento y la capacidad de carga. (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1993)

2.1.2. Pavimento articulado

Los pavimentos articulados o adoquinados son un tipo específico de pavimento flexible, su capa de rodadura se compone de adoquines, que son bloques de concreto o piedra diseñados para soportar el tráfico vehicular. Estos pavimentos presentan durabilidad, estética y capacidad de drenaje, por lo cual se usan comúnmente en áreas urbanas, plazas y calles históricas.

Para el cálculo de prediseños de pavimentos articulados se tomó en consideración los mismos criterios utilizados en el prediseño de pavimentos flexibles, la variación entre estos prediseños recae únicamente en la presencia de una capa de rodadura conformada por

adoquines prefabricados en lugar de una carpeta asfáltica. (American Society of Civil Engineers, 2016)

2.1.3. Pavimento rígido

Los pavimentos rígidos se distinguen por tener una capa de rodadura compuesta por losas de concreto hidráulico. Estas losas pueden ser diseñadas con o sin acero de refuerzo adicional dependiendo de las características del proyecto.

Las losas con formas geométricas no rectangulares, demasiado esbeltas, construidas sobre elementos nuevos o existentes de concreto o que contengan elementos adicionales como pozos de inspección, alcantarillado, sumideros, etc.; necesitan acero de refuerzo.

Las losas con acero de refuerzo se utilizan también cuando no se considera la inclusión de juntas y se contara con un refuerzo continuo en toda la extensión de la losa.

Dentro de su diseño se debe considerar la existencia de elementos adicionales como bermas o pasadores. La capa de concreto hidráulico descansa sobre una subrasante de material granular, que proporciona un soporte adecuado.

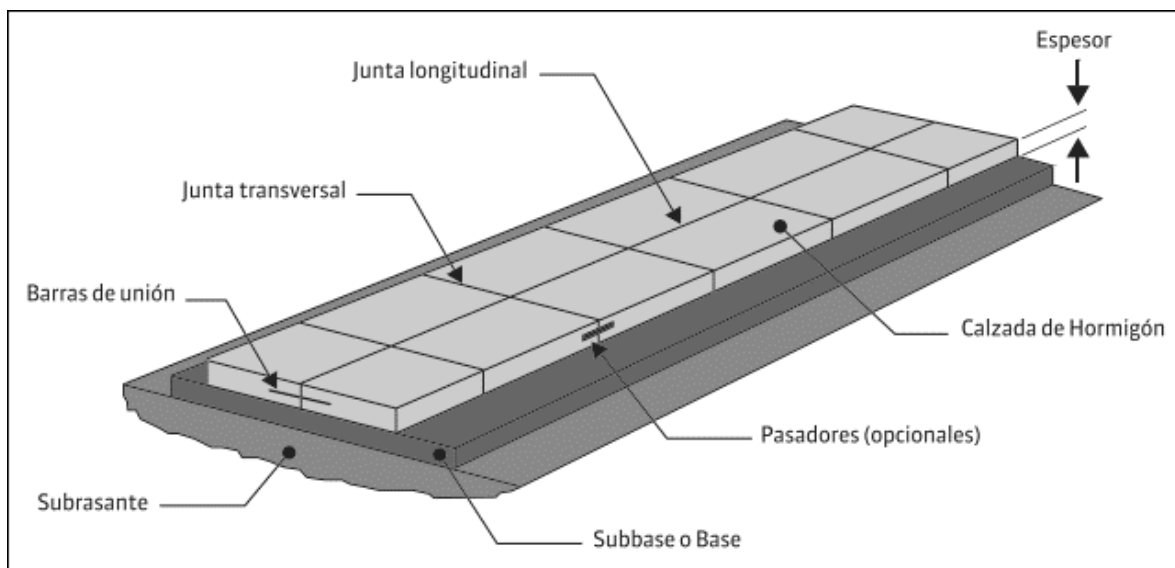


Ilustración 1: Estructura de un pavimento rígido

Fuente: (Manual de diseño y construcción de pavimentos de hormigón, 2014)

Los principales factores que se utilizan para la generación de prediseños de pavimento rígido son datos de tráfico, condiciones de suelo, resistencia del concreto, capacidad de carga y espesores de diseño. (Portland Cement Association (PCA), 1984)

2.2. Análisis de Normativas Técnicas para prediseño de pavimentos

El presente trabajo no pretende ser una guía detallada sobre la resolución de prediseños de pavimentos, el análisis de las normativas corresponde únicamente a los valores y parámetros que se utilizaron para el desarrollo de la herramienta productiva planteada. El uso de esta herramienta supondrá el conocimiento suficiente de las metodologías de planificación y construcción de carreteras utilizando los métodos señalados para cada tipo de pavimento.

2.2.1. Guía para el diseño de estructuras de pavimento AASHTO, 1993

Esta guía fue utilizada para la generación de prediseños de pavimentos flexibles y articulados.

El método AASHTO 93 considera el volumen y tipo de tráfico que circulará por la carretera además de las propiedades de los materiales que se utilizarán en su construcción.

Dentro de este análisis se evalúa la estructura del pavimento y los espesores necesarios para cada capa, incluyendo la capa de rodadura, la base y la subbase, para garantizar la capacidad de soporte requerida que garantice la seguridad y durabilidad del pavimento a lo largo de la vida útil del proyecto. Al evaluar pavimentos flexibles se considera que estos están contruidos por capas de asfalto u otros materiales que pueden flexionar bajo cargas.

Este método utiliza la siguiente ecuación para el cálculo de los diseños de pavimento flexible y articulado:

$$\log_{10} Wt18 = Z_r * S_o + 9.36$$
$$* \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} Mr - 8.07$$

Ecuación 1: Diseño de pavimentos flexibles AASHTO 93

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. I-5)

En donde:

Wt18 número de ejes equivalentes de 80 kN (18000 lb), en el periodo de diseño.

Zr desviación estándar normal, que está en función de la confiabilidad del diseño.

So desviación estándar por efecto del tráfico y de la predicción del comportamiento

SN número estructural requerido.

Δ PSI variación del índice de servicialidad.

Mr módulo de resiliencia de la subrasante en psi.

2.2.1.1. Parámetros de prediseño

Wt18

También conocido como número de ejes equivalentes, es el número de repeticiones de ejes simples de ruedas dobles para un período de tiempo determinado considerando que cada eje tendrá una carga estandarizada de 8.2 ton. o 18 kip. Este trabajo no contempla la evaluación del tráfico de un proyecto específico, los valores utilizados en los ejemplos son datos obtenidos de la bibliografía utilizada.

Zr

La desviación estándar normal o Zr se encuentra en función del nivel de confiabilidad del diseño (R). Su valor se obtiene de la siguiente tabla:

Clasificación funcional	Nivel recomendado de confiabilidad	
	Urbano	Rural
Interestatal y otras vías	85 - 99,9	80 - 99,9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectores	80 - 95	75 - 95
Local	50 - 80	50 - 80

Tabla 1: Niveles de confiabilidad

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. II-9)

Con el nivel de confiabilidad seleccionado a partir del tipo de clasificación de la carretera, se selecciona el valor de Zr utilizando la siguiente tabla:

Confiabilidad R, %	Desviación estándar normal, Zr
50	0
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037

90	-1.282
91	-1.34
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.09
99.99	-3.75

Tabla 2: Desviación estándar normal

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. I-62)

So

La desviación estándar S_o se encuentra en función de las posibles variaciones en las estimaciones del tráfico y la predicción de su comportamiento, su valor se obtiene a partir de la siguiente tabla:

Proyecto de pavimento	Desviación estándar total
Rango para pavimentos flexibles	0.40 - 0.50
Construcciones nuevas	0.4
Sobre capas	0.5

Tabla 3: Desviación estándar

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. I-62)

SN

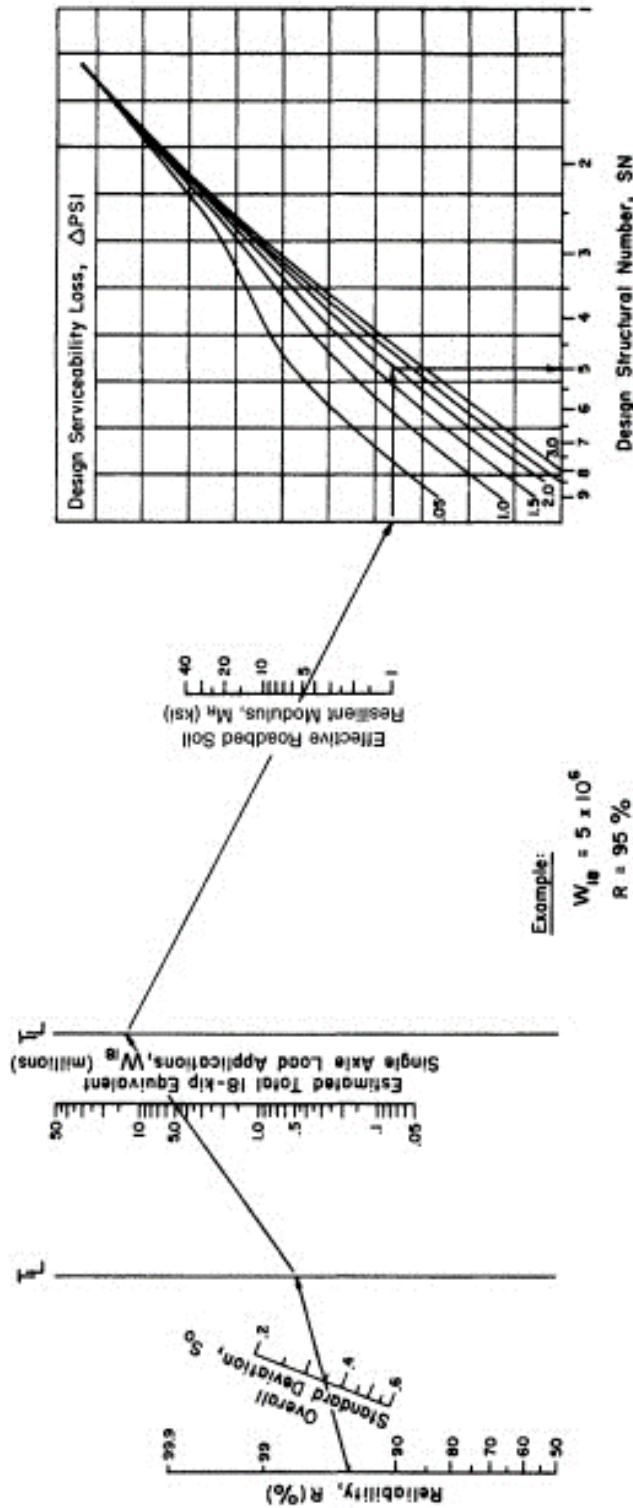
El número estructural (SN), es una medida utilizada para evaluar la capacidad estructural que necesita el pavimento para poder soportar las cargas del tráfico expresadas como W18 o ejes equivalentes.

El Número Estructural se calcula considerando la resistencia que aportan cada una de las capas individuales del pavimento y su interacción como conjunto. A medida que aumentan las cargas del tráfico, es necesario un número estructural más alto para garantizar un rendimiento adecuado del pavimento.

La guía AASHTO 93 recomienda el cálculo del valor del número estructural mediante la utilización de los parámetros W18, Mr, Zr, So, Δ PSI dentro del siguiente nomograma:

NOMOGRAPH SOLVES:

$$\log_{10} W = Z_R S_0 + 9.36 \log_{10} (SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1.094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10} M_R - 8.07$$



Example:

$$W_{18} = 5 \times 10^6$$

$$R = 95 \%$$

$$S_0 = 0.35$$

$$M_R = 5000 \text{ psi}$$

$$\Delta PSI = 1.9$$

$$\text{Solution: SN} = 5.0$$

Ilustración 2: Nomograma para el cálculo del número estructural

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. II-32)

ΔPSI

El índice de servicialidad, se define como la variación entre las condiciones de servicio iniciales y finales de una carretera para un periodo de tiempo determinado.

La guía AASHTO recomienda los siguientes valores para pavimentos flexibles:

Para condiciones iniciales (Po):

$$Po = 4.2$$

Para condiciones finales (Pf):

$$Pf = 2.0 \text{ Para vías de tránsito menor}$$

$$Pf = 2.5 \text{ Para vías de primer orden}$$

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. II-11)

El índice de servicialidad se calculará mediante el uso de la siguiente función:

$$\Delta PSI = Pf - Po$$

Ecuación 2: Índice de servicialidad

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. II-10)

Mr

El módulo de resiliencia, se define como la capacidad que presenta el suelo para soportar cargas dinámicas sin sufrir deformaciones permanentes, se obtiene mediante el uso de las siguientes ecuaciones en función de la capacidad portante (CBR).

Para CBR ≤ 10% (psi)

$$Mr = 1500 * CBR$$

Para CBR > 10% (psi)

$$Mr = 2555 * CBR^{0.64}$$

Ecuación 3: Cálculo del módulo de resiliencia

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. I-14)

CBR

El CBR (Californian Bearing Ratio) es utilizado para evaluar la calidad de un suelo mediante la determinación de su resistencia. Su valor se obtiene de un ensayo según el cual es medida la carga necesaria para penetrar 2.54 mm en el suelo con un pistón circular de 19.35 cm² a una velocidad de 1.27 mm/min; este valor se presentará como la relación de la carga obtenida

y la que se obtiene mediante el mismo procedimiento aplicado en una muestra estandarizada, por lo tanto, será adimensional y su valor será porcentual.

Espesores de capa

Para el cálculo de los espesores de cada capa se utiliza la siguiente ecuación, la cual deberá proveer valores para el numero estructural iguales o mayores a los calculados con la ecuación 1:

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

Ecuación 4: Calculo de los espesores de capa

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. I-6)

En donde:

- a_i** coeficientes estructurales o de Capas, adimensionales
- D_i** espesor requerido de la capa correspondiente (Pulgadas).
- m_i** coeficientes de drenaje para cada capa.

a₁

El coeficiente estructural de la capa de rodadura se calcula mediante el uso del módulo elástico del asfalto y la utilización de la siguiente tabla:

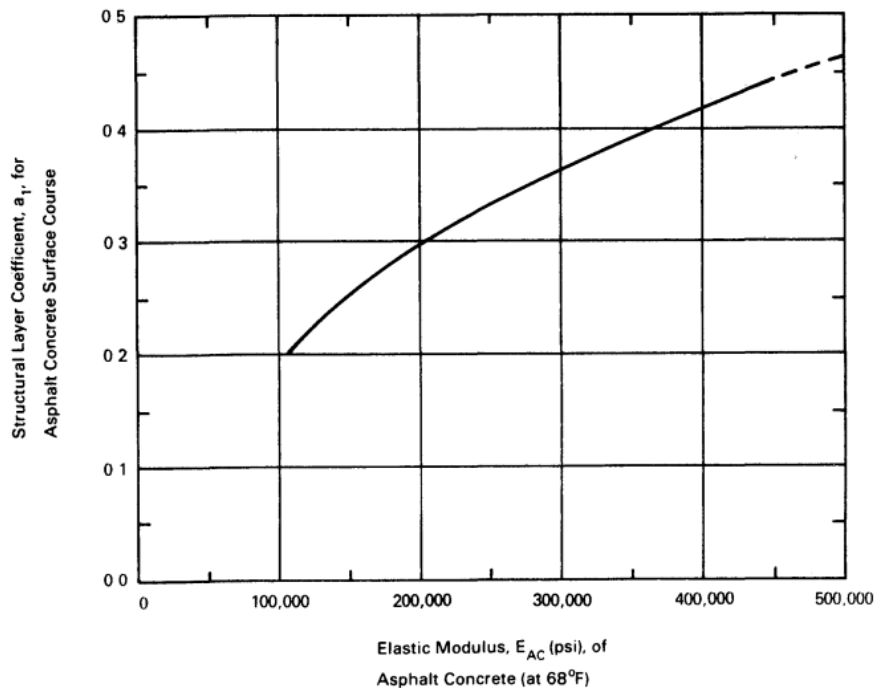


Ilustración 3: Coeficiente estructural del asfalto

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. ii-18)

Nota: El presente trabajo analiza únicamente suelos granulares naturales sin ningún tipo de estabilizantes para el cálculo de los coeficientes estructurales de las capas base y subbase.

a₂

El coeficiente estructural de la base se calcula mediante el uso del siguiente gráfico, utilizando el valor porcentual del CBR de la capa inferior:

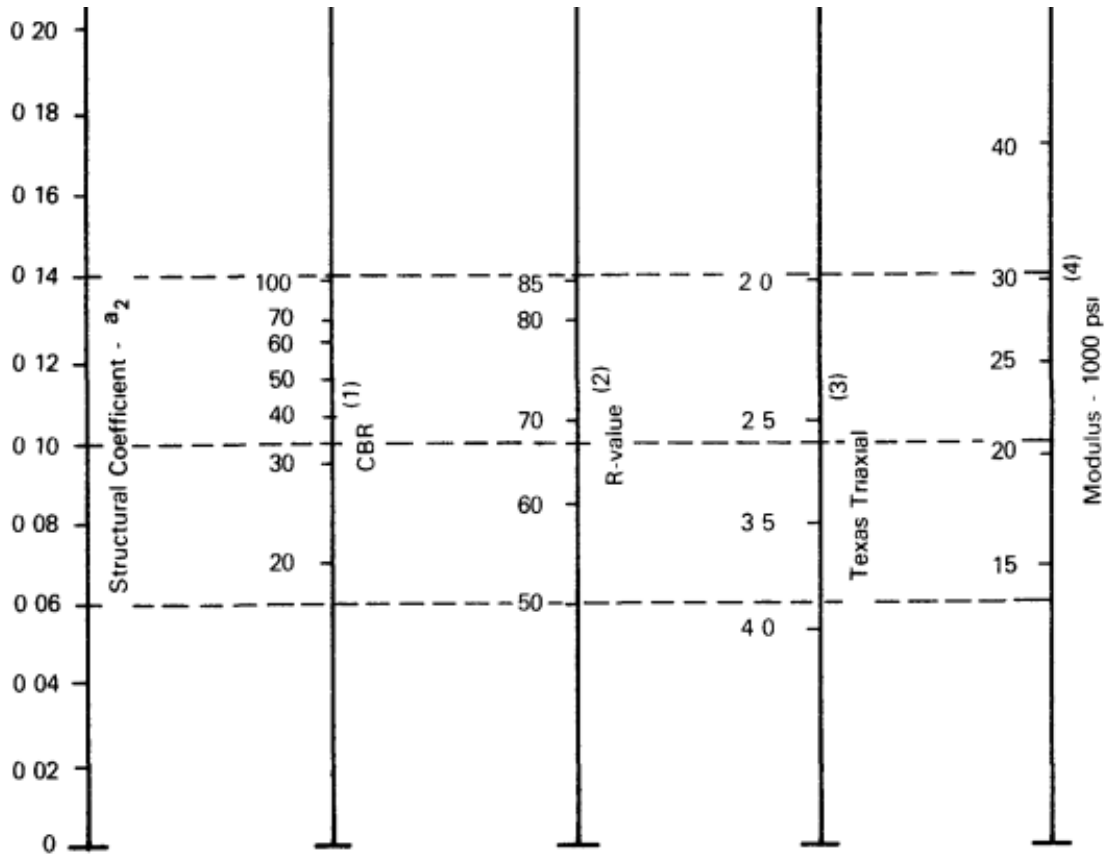


Ilustración 4: Coeficiente estructural de la base, suelo granular

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. II-19)

a3

El coeficiente estructural de la subbase se calcula mediante el uso del siguiente gráfico, utilizando el valor porcentual del CBR de la capa inferior:

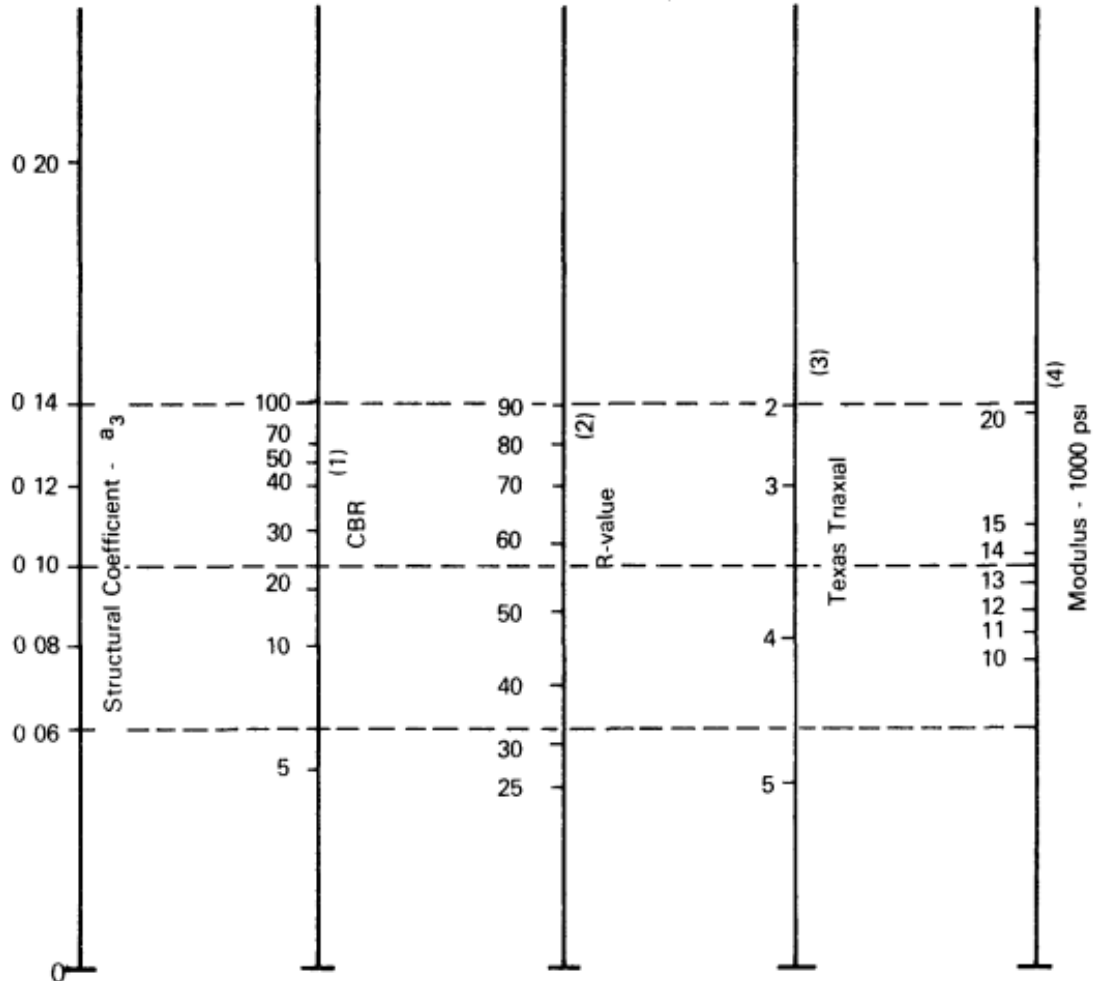


Ilustración 5: Coeficiente estructural de la subbase, suelo granular

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. II-21)

mi

Los coeficientes de drenaje estarán en función de las condiciones climáticas del lugar y la calidad del drenaje propuesta para el proyecto, para su cálculo se utilizará la siguiente tabla:

Calidad de drenaje	% de tiempo en que la estructura del pavimento es expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	< 1 %	1 - 5 %	5 - 25 %	> 25 %
Excelente	1,4 - 1,35	1,35 - 1,3	1,3 - 1,2	1,2
Bueno	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,15 - 1	1

Regular	1,25 - 1,15	1,15 - 1,05	1 - 0,8	0,8
Pobre	1,15 - 1,05	1,05 - 0,8	0,8 - 0,6	0,6
Muy pobre	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,4	0,4

Tabla 4: Coeficientes de drenaje para base y subbase

Fuente: (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, pp. II-25)

2.2.2. Manual de diseño para pavimentos de concreto PCA, 1984

En este trabajo de integración, se utilizó este manual para la generación de prediseños de pavimentos rígidos.

El método PCA (Portland Cement Association) desarrollado en 1984, es un guía de diseño para pavimentos rígidos la cual se centra en el uso de concreto hidráulico para la construcción de la capa de rodadura de infraestructura vial como carreteras y calles. PCA es una organización de la industria del cemento que ha desarrollado esta metodología para facilitar la utilización del concreto en pavimentos.

Mediante la evaluación de las cargas vehiculares, número de ejes equivalentes y patrones de tráfico a lo largo del tiempo, se dimensiona adecuadamente el pavimento considerando su capacidad de carga.

Dentro del diseño, se tendrá en cuenta la resistencia del concreto, el módulo de elasticidad, el espesor de las losas de concreto y el coeficiente de balasto de la subrasante para conformar una infraestructura vial que permita soportar las cargas previstas sin sufrir daños significativos.

En la realización de este trabajo, se consideró únicamente el análisis del espesor de losas de concreto para pavimentos rígidos sin bermas ni pasadores, además del uso de suelos únicamente granulares sin ningún estabilizante.

2.2.2.1. Parámetros de diseño

Resistencia a la flexión del hormigón M_r

Este factor es utilizado en el análisis de fatiga de la losa, en donde se considera el agrietamiento producido por las cargas vehiculares y las deformaciones producidas por efecto de la compresión y tracción que sufrirá esta capa frente a dichas cargas.

En este trabajo no se realizará un análisis de las diferentes metodologías para su obtención y se utilizará únicamente un valor puntual.

Coefficiente de balasto de la subrasante y la subbase K

Este coeficiente depende de la interacción suelo-estructura, para la obtención de K en la subrasante se utiliza el siguiente gráfico, el cual nos permitirá determinar este valor mediante el uso del CBR de la subrasante.

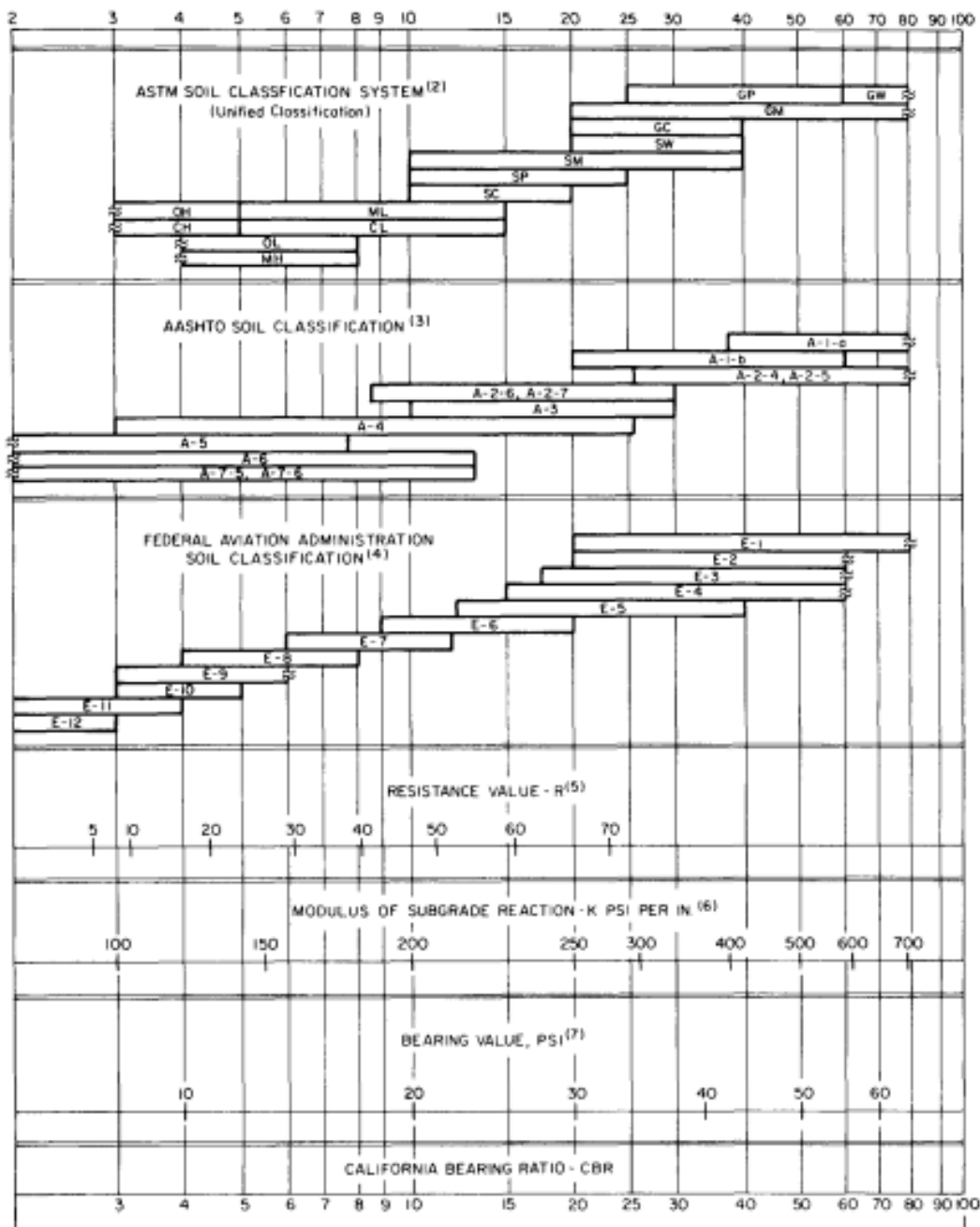


Ilustración 6: Interrelaciones aproximadas de clasificación de suelos y valores portantes

Fuente: (PCA Design manual for Concrete Pavements, 1984, pág. 7)

En el caso de poseer un CBR inicial muy bajo es posible la inclusión de una subbase que permita aumentar la capacidad portante del conjunto, la PCI propone el uso de la siguiente tabla para esta finalidad, considerando la altura de la subbase y el valor k de la subrasante.

K (psi) subrasante	K (psi) subbase			
	4 in	6 in	9 in	12 in
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Tabla 5: Efectos de una subbase de suelo granular en los valores de K

Fuente: (PCA Design manual for Concrete Pavements, 1984, pág. 6)

Análisis de tráfico

La metodología de la PCA requiere del análisis del tráfico vehicular en donde se especifique las cargas y las repeticiones esperadas para los diferentes tipos de ejes dentro de un periodo de tiempo.

Dentro de la información requerida para realizar un análisis de tráfico se encuentran los siguientes factores: tránsito pesado promedio diario anual, factor de sentido (unidireccionales, bidireccionales), factor de carril (número de carriles por sentido), factor de crecimiento anual, repeticiones esperadas para cada tipo de eje.

Factor de seguridad de carga FSC

Este factor se utiliza para considerar posibles sobrecargas en los vehículos utilizados en el análisis de tráfico realizado para el proyecto, recomendando los siguientes valores:

Vías de primer orden con altos volúmenes de vehículos pesados y flujos de tráfico continuos.

$$FSC = 1.20$$

Vías arteriales con volúmenes de vehículos pesados moderados.

$$FSC = 1.10$$

Vías y calles residenciales con bajo volúmenes de vehículos pesados.

$$FSC = 1.00$$

Fuente: (PCA Design manual for Concrete Pavements, 1984, pág. 10)

Análisis de fatiga

La fatiga del pavimento se determina mediante la utilización de factores de estrés equivalentes relacionados a los espesores de losa planteados y el valor de K.

Slab thickness, in.	k of subgrade-subbase, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	825/679	726/585	671/542	634/516	584/486	523/457	484/443
4.5	699/586	616/500	571/460	540/435	498/406	448/378	417/363
5	602/516	531/436	493/399	467/376	432/349	390/321	363/307
5.5	526/461	464/387	431/353	409/331	379/305	343/278	320/264
6	465/416	411/348	382/316	362/296	336/271	304/246	285/232
6.5	417/380	367/317	341/286	324/267	300/244	273/220	256/207
7	375/349	331/290	307/262	292/244	271/222	246/199	231/186
7.5	340/323	300/268	279/241	265/224	246/203	224/181	210/169
8	311/300	274/249	255/223	242/208	225/188	205/167	192/155
8.5	285/281	252/232	234/208	222/193	206/174	188/154	177/143
9	264/264	232/218	216/195	205/181	190/163	174/144	163/133
9.5	245/248	215/205	200/183	190/170	176/153	161/134	151/124
10	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
10.5	213/222	187/183	174/164	165/151	153/136	140/119	132/110
11	200/211	175/174	163/155	154/143	144/129	131/113	123/104
11.5	188/201	165/165	153/148	145/136	135/122	123/107	116/98
12	177/192	155/158	144/141	137/130	127/116	116/102	109/93
12.5	168/183	147/151	136/135	129/124	120/111	109/97	103/89
13	159/176	139/144	129/129	122/119	113/106	103/93	97/85
13.5	152/168	132/138	122/123	116/114	107/102	98/89	92/81
14	144/162	125/133	116/118	110/109	102/98	93/85	88/78

Tabla 6: Esfuerzo equivalente - sin bermas (eje simple / eje tándem)

Fuente: (PCA Design manual for Concrete Pavements, 1984, pág. 14)

Eje simple: aquel eje constituido por un solo eje no articulado a otro, motriz o no, direccional o no, anterior, medio o posterior

Eje tándem: aquel constituido por dos ejes articulados, con una separación inferior a 2.4 m

Los valores obtenidos anteriormente se dividirán para el módulo de ruptura del concreto M_r , para obtener las repeticiones permitidas

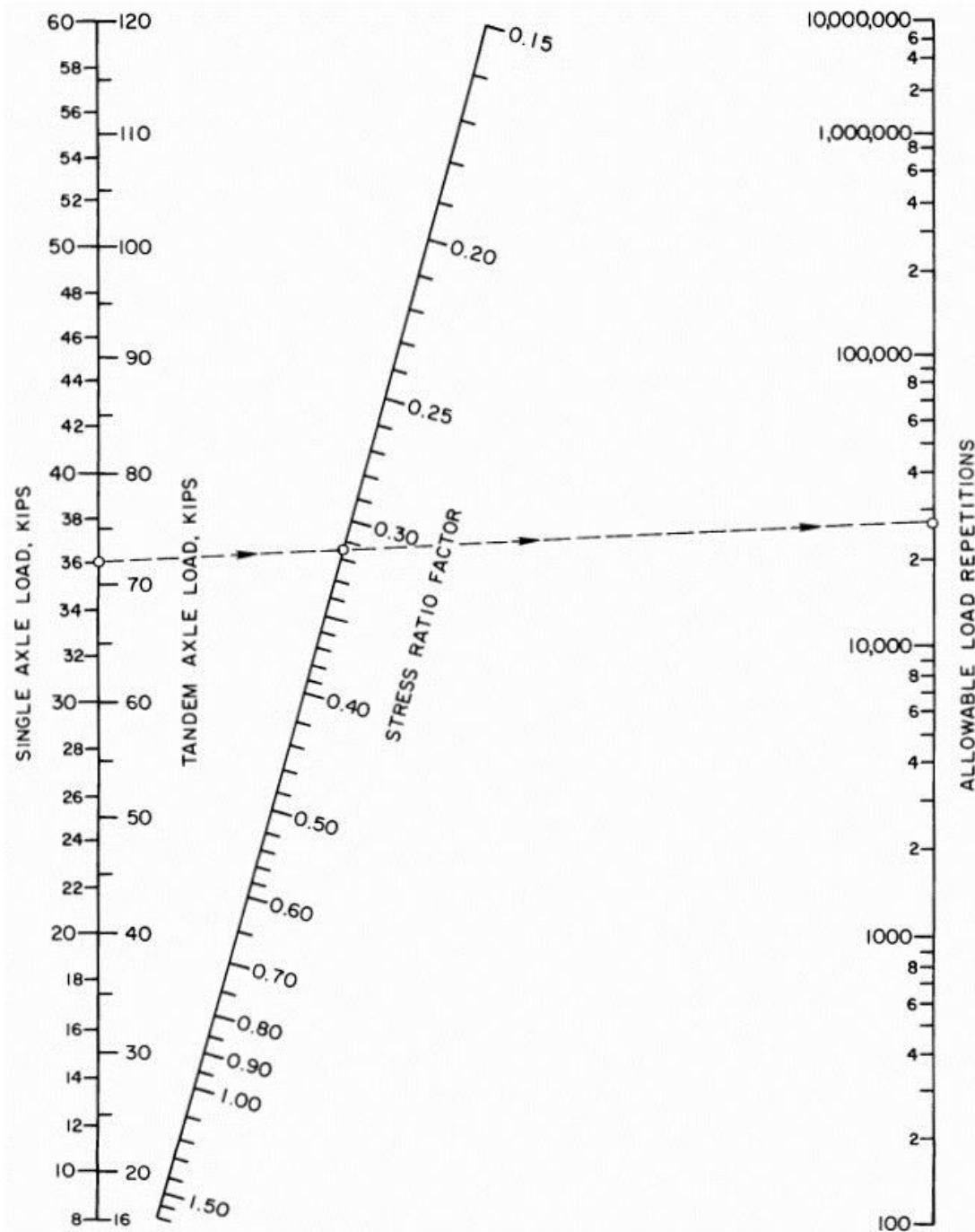


Ilustración 7: Análisis de fatiga

Fuente: (PCA Design manual for Concrete Pavements, 1984, pág. 15)

La sumatoria de los porcentajes obtenidos a partir de las repeticiones esperadas y las permitidas, para todas las cargas y ejes, determinara el valor de la fatiga. Mientras más cerca se encuentre el valor de fatiga al 100% (sin superar ese valor), más eficiente será el diseño.

Análisis de erosión

Para calcular los niveles de erosión existentes en una losa, se debe encontrar los factores de erosión utilizando la siguiente tabla, la cual relaciona el valor del espesor de losa y la capacidad portante K

Slab thickness, in.	k of subgrade-subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.74/3.83	3.73/3.79	3.72/3.75	3.71/3.73	3.70/3.70	3.68/3.67
4.5	3.59/3.70	3.57/3.65	3.56/3.61	3.55/3.58	3.54/3.55	3.52/3.53
5	3.45/3.58	3.43/3.52	3.42/3.48	3.41/3.45	3.40/3.42	3.38/3.40
5.5	3.33/3.47	3.31/3.41	3.29/3.36	3.28/3.33	3.27/3.30	3.26/3.28
6	3.22/3.38	3.19/3.31	3.18/3.26	3.17/3.23	3.15/3.20	3.14/3.17
6.5	3.11/3.29	3.09/3.22	3.07/3.16	3.06/3.13	3.05/3.10	3.03/3.07
7	3.02/3.21	2.99/3.14	2.97/3.08	2.96/3.05	2.95/3.01	2.94/2.98
7.5	2.93/3.14	2.91/3.06	2.88/3.00	2.87/2.97	2.86/2.93	2.84/2.90
8	2.85/3.07	2.82/2.99	2.80/2.93	2.79/2.89	2.77/2.85	2.76/2.82
8.5	2.77/3.01	2.74/2.93	2.72/2.86	2.71/2.82	2.69/2.78	2.68/2.75
9	2.70/2.96	2.67/2.87	2.65/2.80	2.63/2.76	2.62/2.71	2.61/2.68
9.5	2.63/2.90	2.60/2.81	2.58/2.74	2.56/2.70	2.55/2.65	2.54/2.62
10	2.56/2.85	2.54/2.76	2.51/2.68	2.50/2.64	2.48/2.59	2.47/2.56
10.5	2.50/2.81	2.47/2.71	2.45/2.63	2.44/2.59	2.42/2.54	2.41/2.51
11	2.44/2.76	2.42/2.67	2.39/2.58	2.38/2.54	2.36/2.49	2.35/2.45
11.5	2.38/2.72	2.36/2.62	2.33/2.54	2.32/2.49	2.30/2.44	2.29/2.40
12	2.33/2.68	2.30/2.58	2.28/2.49	2.26/2.44	2.25/2.39	2.23/2.36
12.5	2.28/2.64	2.25/2.54	2.23/2.45	2.21/2.40	2.19/2.35	2.18/2.31
13	2.23/2.61	2.20/2.50	2.18/2.41	2.16/2.36	2.14/2.30	2.13/2.27
13.5	2.18/2.57	2.15/2.47	2.13/2.37	2.11/2.32	2.09/2.26	2.08/2.23
14	2.13/2.54	2.11/2.43	2.08/2.34	2.07/2.29	2.05/2.23	2.03/2.19

Tabla 7: Factores de erosión - sin bermas (eje simple / eje tandem)

Fuente: (PCA Design manual for Concrete Pavements, 1984, pág. 16)

Con las cargas obtenidas del análisis de tráfico para cada tipo de eje y los factores de erosión, se procede a obtener las repeticiones admisibles, mediante el uso del siguiente grafico:

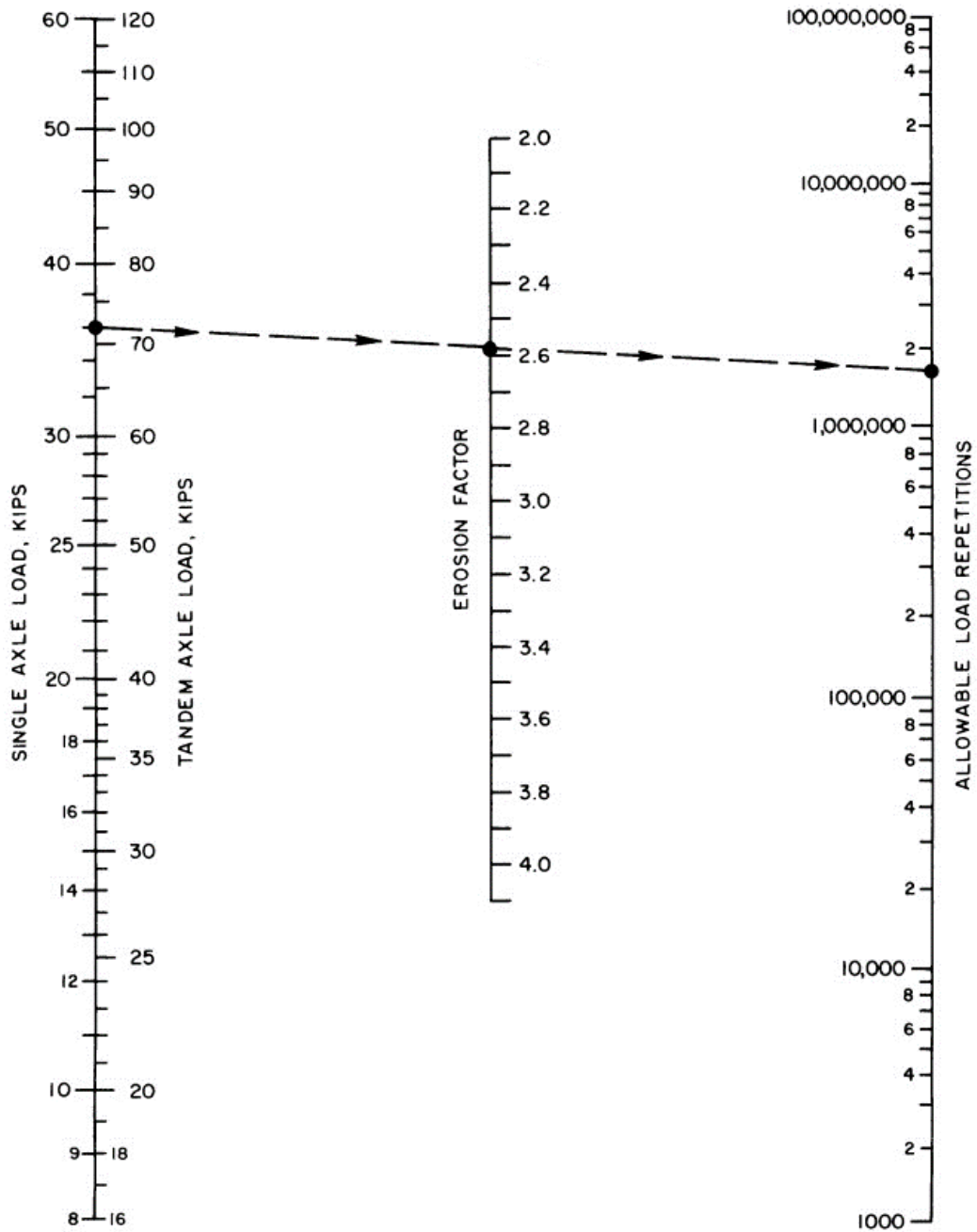


Ilustración 8: Análisis de erosión - sin bermas

Fuente: (PCA Design manual for Concrete Pavements, 1984, pág. 17)

La sumatoria de los porcentajes obtenidos a partir de las repeticiones esperadas y las permitidas, para todas las cargas y ejes, determinara el valor de la erosión. Mientras más cerca se encuentre el valor de la erosión al 100% (sin superar ese valor), más eficiente será el diseño.

3. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA

Para el desarrollo de esta herramienta productiva para el cálculo de prediseños de pavimentos se utilizó el lenguaje de programación Python, este lenguaje de programación es multiplataforma, de código abierto, gratuito y ofrece una gran versatilidad y capacidad para resolver tareas de cálculo y diseño. Presenta una gran cantidad de librerías, las cuales facilitan la resolución de operaciones matemáticas y generación de gráficos, adecuado para la implementación de algoritmos de cálculo y la resolución de prediseños. (Python Software Foundation, 2023)

3.1.Desarrollo de algoritmos de calculo

Los algoritmos son el conjunto de instrucciones lógicas y ordenadas previamente definidas que se utilizan para realizar una actividad determinada. (STEM, 2023)

A partir de las normas técnicas para cada prediseño de pavimentos, se desarrollaron algoritmos de cálculo utilizando las diferentes metodologías respectivas para cada tipo de pavimento.

3.1.1. Algoritmos para la metodología AASHTO 93

Cálculo del número estructural SN

Para la resolución de SN, se posee los siguientes valores: $Wt18$, Z_r , S_o , ΔPSI , Mr .

Mediante el uso de la Ecuación 1: Diseño de pavimentos flexibles AASHTO 93; se procede a despejar la incógnita buscada y mediante un proceso iterativo se calcula el valor de SN

$$\log_{10} Wt18 - Z_r * S_o + 0.20 - 2.32 * \log_{10} Mr + 8.07 = 9.36 * \log_{10}(SN + 1) + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}}$$

Ecuación 5: Modificación de la Ecuación 1 para resolución de SN

Cálculo de coeficientes estructurales a_1

Los valores del coeficiente estructural para la capa de rodadura se obtienen mediante el uso de la Ilustración 3: Coeficiente estructural del asfalto.

Mediante la medición manual de varios puntos, se determinó la siguiente fórmula.

$$a_1 = 0.17459 * \log_e E - 1.83235$$

Ecuación 6: Coeficiente estructural a_1

3.1.2. Algoritmos para la metodología PCA

Cálculo de la capacidad portante de la subrasante K

La guía PCA establece el uso de la Ilustración 5: Interrelaciones aproximadas de clasificación de suelos y valores portantes, para la obtención de K.

Para el cálculo de este parámetro se utilizaron las siguientes funciones empíricas:

Para $CBR < 10\%$

$$K = 2.55 + 52.5 * \log CBR$$

Para $CBR \geq 10\%$

$$K = 46 + 9.08 * (\log CBR)^{4.34}$$

Ecuación 7: Cálculo de la capacidad portante de la subrasante K

Fuente: (GUÍA PRÁCTICA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE CARRETERAS, 2019, pág. 453)

Análisis de fatiga

Como se señala en la sección 2.2.2.1 de este trabajo, la fatiga se calcula mediante la sumatoria del porcentaje obtenidos a partir de las repeticiones esperadas y las admisibles.

Para el cálculo de las repeticiones admisibles se utilizó la siguiente metodología planteada en PCAWIN (PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design, 2001) para losas de concreto sin bermas ni pasadores:

Cálculo del esfuerzo equivalente del concreto σ_{eq}

$$\sigma_{eq} = \frac{6Me}{h^2} * f1 * f2 * f3 * f4$$

Ecuación 8: Calculo del esfuerzo equivalente del concreto

Fuente: (PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design, 2001, pág. 294)

En donde:

Me para ejes simples sin bermas

$$Me = -1600 + 2525 * \log l + 24.42 * l * 0.204 * l^2$$

Me para ejes dobles sin bermas

$$Me = 3029 - 2966.8 * \log l + 133.69 * l - 0.0632 * l^2$$

l radio relativo de la rigidez del sistema losa-subrasante

$$l = \left(\frac{E * h^3}{12 * (1 - u^2) * K} \right)^{0.25}$$

E módulo de rigidez E = 4 Mpsi

u relación de Poisson u = 0.15

K capacidad portante de la subrasante

f1 factor de ajuste del efecto de las áreas de contacto y las cargas de los ejes

Ejes simples

$$f1 = \left(\frac{24}{SAL} \right)^{0.06} * \left(\frac{SAL}{18} \right)$$

Ejes dobles

$$f1 = \left(\frac{48}{TAL} \right)^{0.06} * \left(\frac{TAL}{36} \right)$$

SAL carga ejes simples

TAL carga ejes tándem

f2 factor de ajuste para losas sin bermas

$$f2 = 0.892 + \frac{h}{85.71} - \frac{h^2}{3000}$$

f3 factor de ajuste de estrés por el efecto de los camiones en las filos

$$f3 = 0.894$$

f4 factor de ajuste por el incremento de la fuerza del concreto pasado 28 días

$$f4 = \frac{1}{[1.235 * (1 - CV)]}$$

CV coeficiente de variación CV = 15%

Cálculo de las repeticiones admisibles

Para $\sigma_{eq}/Mr \geq 0.55$

$$\log N = 11.737 - 12.077 * \frac{\sigma_{eq}}{Mr}$$

Para $0.45 < \sigma_{eq}/Mr < 0.55$

$$N = \left(\frac{4.2577}{\frac{\sigma_{eq}}{Mr} - 0.4325} \right)^{3.268}$$

Para $\sigma_{eq}/Mr \leq 0.45$

$$N = \text{ilimitadas}$$

Ecuación 9: Calculo de las repeticiones admisibles por fatiga

Fuente: (PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design, 2001, pág. 295)

En donde:

Mr módulo de resiliencia

N número de repeticiones admisibles

Análisis de erosión

Para el cálculo de las repeticiones admisibles obtenidas por erosión se utilizó la siguiente metodología planteada en PCAWIN (PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design, 2001) para losas de concreto sin bermas ni pasadores:

Cálculo de la deflexión equivalente calculada en las esquinas δ_{eq}

$$\delta_{eq} = \frac{Pc}{K} * f5 * f6 * f7$$

Ecuación 10: Cálculo de la deflexión equivalente calculada en las esquinas

Fuente: (PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design, 2001, pág. 295)

En donde:

Pc Presión en la interfaz losa-cimentación

Para ejes simples, sin bermas y sin pasadores

$$Pc = 1.571 + \frac{46.127}{l} + \frac{4372.7}{l^2} - \frac{22886}{l^3}$$

Para ejes tándem, sin bermas y sin pasadores

$$Pc = 1.847 + \frac{65.108}{l} - \frac{1260.8}{l^2} + \frac{22989}{l^3}$$

f5 factor de ajuste por el efecto de las cargas de eje

Ejes simples

$$f5 = \left(\frac{SAL}{18} \right)$$

Ejes dobles

$$f5 = \left(\frac{TAL}{36} \right)$$

f6 factor de ajuste de rigidez por pasadores

$$f6 = 0.95$$

f7 factor de ajuste de estrés por el efecto de los camiones en las filos

$$f7 = 0.896$$

Cálculo de la Tasa de trabajo o potencia P

$$P = 268.7 * \left(\frac{K^{1.27} * \delta_{eq}^2}{h} \right)$$

Ecuación 11: Calculo de la tasa de trabajo

Fuente: (PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design, 2001, pág. 295)

Cálculo de las repeticiones admisibles

Para $C1 * P > 9$

$$\log N = 14.524 - 6.777 * (C1 * P - 9)^{0.103} - \log C2$$

Para $C1 * P \leq 9$

$$N = \text{ilimitadas}$$

Ecuación 12: Cálculo de las repeticiones admisibles por erosión

Fuente: (PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design, 2001, pág. 296)

En donde:

C1 factor de ajuste

$$C1 = 1 - \left(\frac{K}{2000} * \frac{4}{h} \right)^2$$

C2 constante de ajuste por bermas

$$C2 = 0.06$$

3.2.Codificación de la herramienta

El código desarrollado para la elaboración de esta herramienta productiva se encuentra en los anexos, para lograr una mejor comprensión de la estructura de la codificación del programa se requiere iniciar con el archivo main.txt

3.3.Pruebas y validación

Los siguientes parámetros fueron determinados mediante el uso de ecuaciones empíricas calculadas a partir de datos obtenidos mediante una medición manual.

Cálculo de coeficientes estructurales a_1

En un análisis comparativo de los puntos medidos y calculados mediante el uso de la *Ecuación 13: Coeficiente estructural a_1* se obtuvo los siguientes errores:

E	a_1 Medido	a_1 Calculado	Error %
110000	0.200	0.194	2.83
200000	0.295	0.299	-1.26
205000	0.300	0.303	-1.01
300000	0.365	0.369	-1.23
360000	0.400	0.401	-0.33
400000	0.420	0.420	0.07
500000	0.465	0.459	1.36

Tabla 8: Error porcentual en el cálculo de a_1 usando ecuación 2

Cálculo de la capacidad portante de la subrasante K

En un análisis comparativo de los puntos medidos y calculados mediante el uso de la *Ecuación 14: Cálculo de la capacidad portante de la subrasante K*

CBR	K Medido	K Calculado	Error %
3	100	101.84	-1.84
6	160	160.16	-0.10
9	190	194.27	-2.25
15	230	237.48	-3.25
30	340	351.87	-3.49
45	460	466.67	-1.45

3.4.Desarrollo de la interfaz de usuario

Para facilitar la visualización de la información presentada y requerida por esta herramienta, se utilizó la librería de Python Tkbootstrap

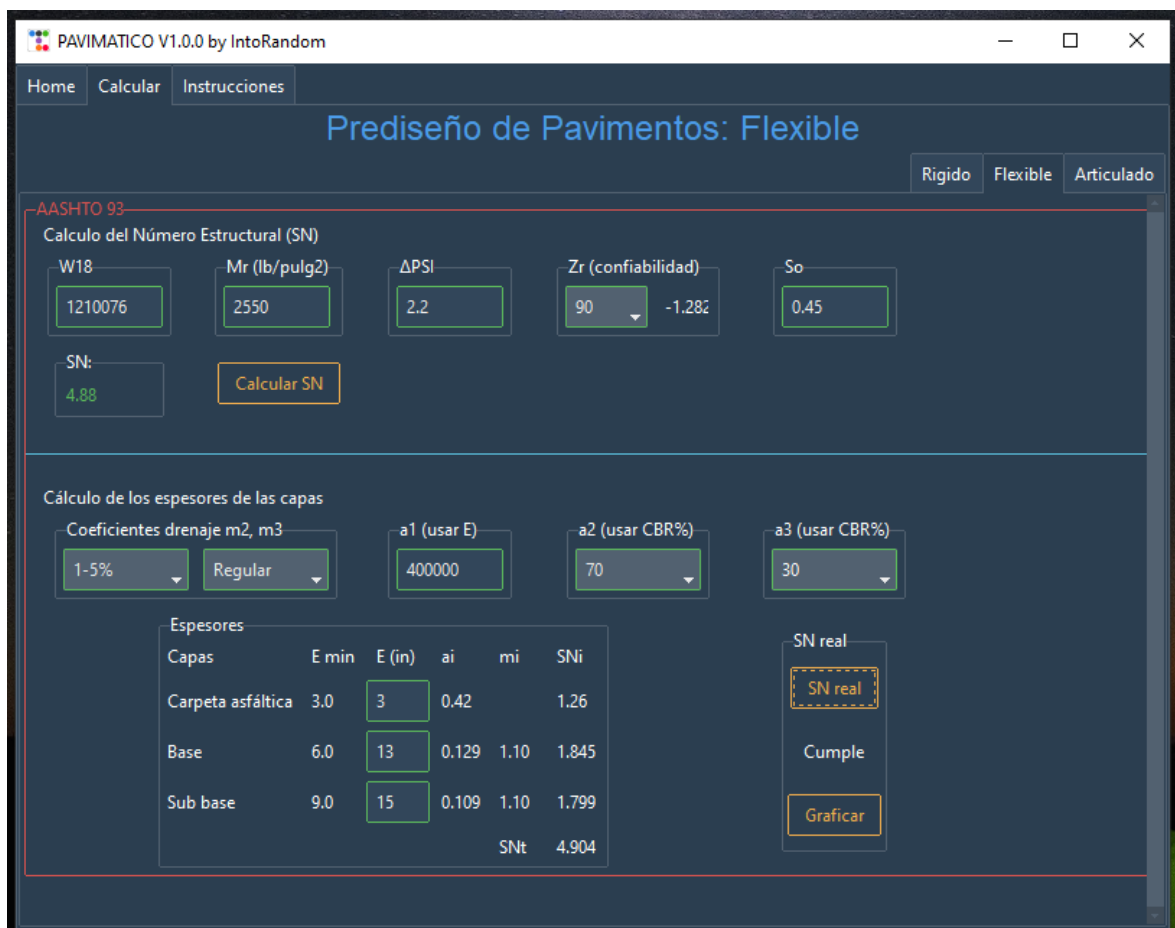


Ilustración 9: Imagen de la interfaz de usuario

Para graficar las configuraciones de capas obtenidas a partir de los datos ingresados y los cálculos realizados por el programa, se utilizó la biblioteca de Python Matplotlib.

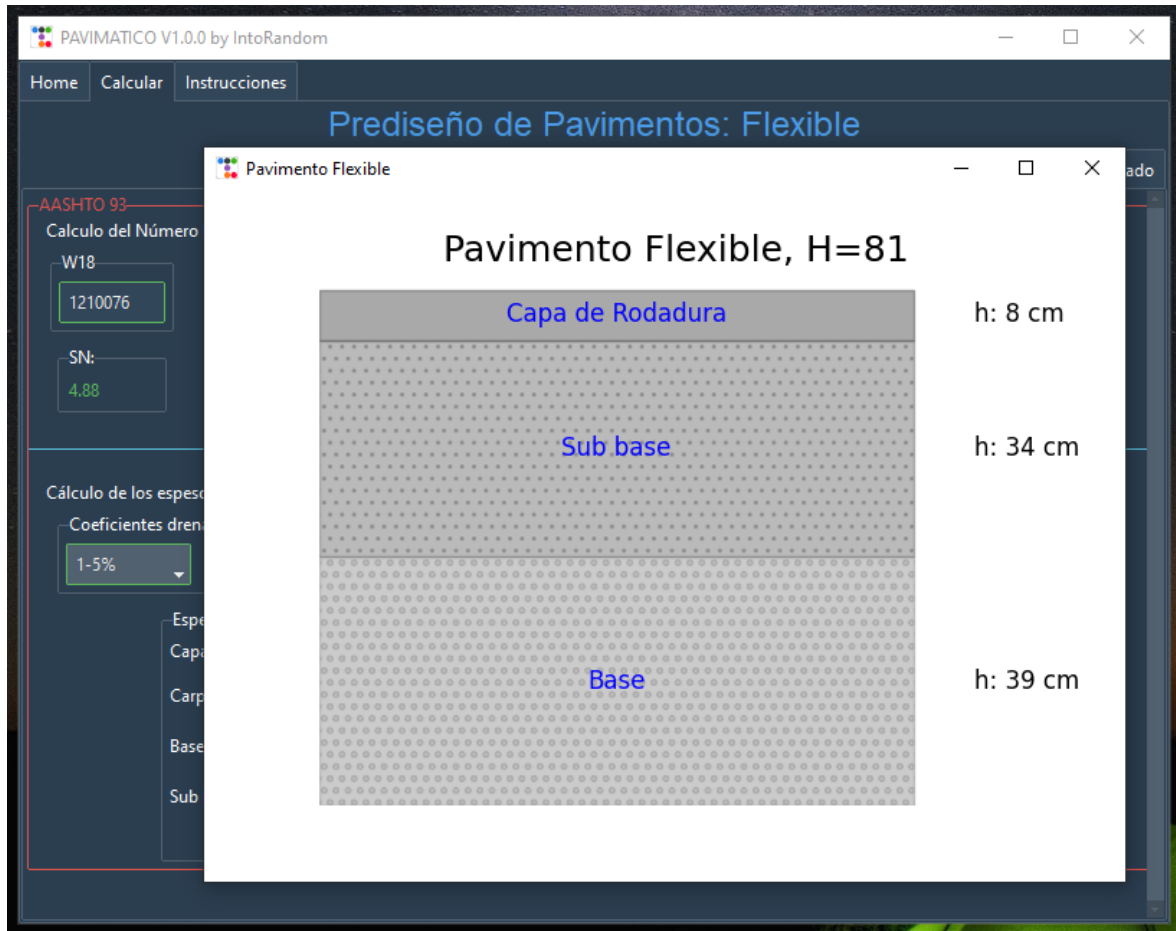


Ilustración 10: Grafica de resultados

3.5.Documentación de la herramienta

La herramienta contiene la siguiente documentación para facilitar su utilización:

Pavimento rígido

CBR subrasante	valor porcentual, utilizado para el cálculo de la capacidad portante K
Mr losa	psi, resistencia a la flexión del hormigón
Subbase	in, inclusión de subbase para el cálculo de K
FSC	factor de seguridad de carga 1.0 a 1.2
Espesor	in, espesor de losa
Carga	kips
Repeticiones	numero de repeticiones esperadas

4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Finalizada la programación en Python, que permite el prediseño de varios tipos de pavimentos dentro de los alcances de este trabajo de integración curricular y posterior puesta a prueba de la herramienta desarrollada, se han realizado las siguientes actividades:

- Comparación de los resultados obtenidos en la resolución de los modelos teóricos, utilizando el cálculo manual (investigador) y el automatizado (herramienta de prediseño de pavimentos) y la variación entre ellos.
- Cuantificación del tiempo ahorrado en la resolución de los modelos teóricos, utilizando el cálculo manual y el automatizado.

4.1. Presentación de resultados

4.1.1. Resultados de cálculo

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la generación de prediseños a partir de modelos teóricos para cada uno de los pavimentos propuestos, mediante su resolución manual y utilizando la herramienta propuesta.

4.1.1.1. Pavimento Flexible

Para el cálculo de este prediseño se utilizaron los siguientes parámetros:

Numero de ejes equivalentes o W18: 1210076

Índice de Servicialidad o Δ PSI: 2.2

Desviación estándar o S_o : 0.45

Módulo de elasticidad del asfalto $E(\text{psi})$: 400000

Módulo de resiliencia de la subrasante M_r (psi): 2550

Desviación estándar normal Z_r : 90%

Características de las capas inferiores:

Coefficiente de drenaje: 1 a 5% de saturación al año, drenaje regular

CBR subbase: 70%, CBR subrasante: 30%

Resultados obtenidos con el uso de la herramienta

PAVIMATICO V1.0.0 by IntoRandom

Home Calcular Instrucciones

Prediseño de Pavimentos: Flexible

Rigido Flexible Articulado

AASHTO 93

Calculo del Número Estructural (SN)

W18: 1210076 Mr (lb/pulg²): 2550 ΔPSI: 2.2 Zr (confiabilidad): 90 (-1.28z) So: 0.45

SN: 4.88 **Calcular SN**

Cálculo de los espesores de las capas

Coefficientes drenaje m², m³: 1-5% Regular

a1 (usar E): 400000 a2 (usar CBR%): 70 a3 (usar CBR%): 30

Capas	e min	e (in)	ai	mi	SNi
Carpeta asfáltica	3.0	3	0.42		1.26
Base	6.0	12	0.129	1.10	1.703
Sub base	9.0	16	0.109	1.10	1.918
					SNt: 4.881

SN real: **SN real** Cumple **Graficar**

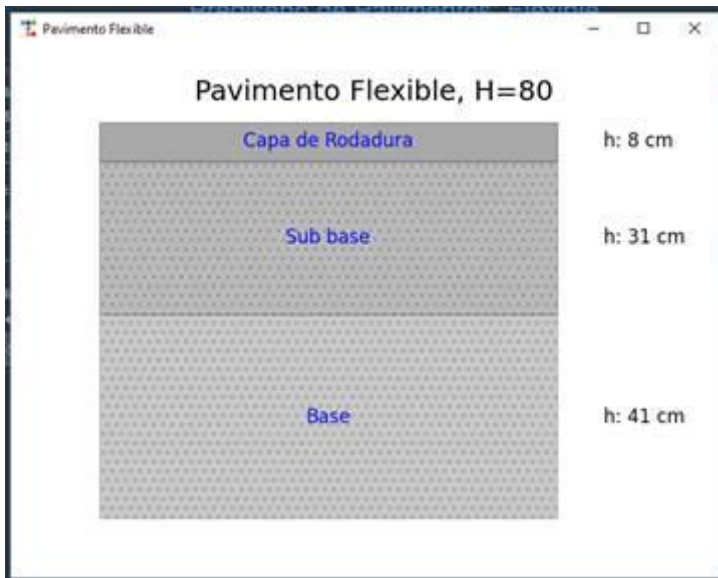


Ilustración 11: Resultados pavimento flexible

Resultados obtenidos del cálculo manual

Mediante el uso del nomograma propuesto por la AASHTO, *Ilustración 2: Nomograma para el cálculo del número estructural*, se determinó el número estructural para todo el conjunto y para cada capa.

Con los datos especificados para las capas inferiores se encontró los coeficientes de capa y de drenaje.

Con los datos anteriores es posible la determinación de los espesores de capa mediante la utilización de *Ecuación 4: Calculo de los espesores de capa*

El procedimiento utilizado y los recursos empleados en la resolución se encuentran en la parte 2.2.1 de este trabajo.

Capas	espesor (in)	Mi	ai	SN	
Capa Asfáltica	3	1	0.42	1.26	
Base	11.8	1.1	0.135	1.75	
Subbase	15.7	1.1	0.11	1.90	
				SN real	4.91

SN nomograma	4.88
Carpeta asfáltica	7.62 cm
Base	30 cm
Subbase	40 cm

Tabla 9: Resultados cálculo manual pavimentos flexibles

Para que los espesores de capa sean válidos y cumplan los requerimientos del modelo, el número estructural calculado usando el nomograma debe ser menor o igual que el número estructural calculado teniendo en consideración los espesores de cada capa.

$$H = 77.62 \text{ cm}$$

Carpeta Asfáltica	h = 7.62 cm
Base	h = 30 cm
Subbase	h = 40 cm

Ilustración 12: Configuración de capas cálculo manual de pavimento flexible

4.1.1.2. Pavimento Articulado

Para el cálculo de este prediseño se utilizaron los siguientes parámetros:

Numero de ejes equivalentes o W18: 1210076

Índice de Servicialidad o Δ PSI: 2.2

Desviación estándar o So: 0.45

Módulo de resiliencia de la subrasante Mr (psi): 2550

Desviación estándar normal Zr: 90%

Características de las capas inferiores:

Coefficiente de drenaje: 1 a 5% de saturación al año, drenaje regular

CBR subbase: 70%, CBR subrasante: 30%

Resultados obtenidos con el uso de la herramienta

PAVIMATICO V1.0.0 by IntoRandom

Home | **Calcular** | Instrucciones

Prediseño de Pavimentos: Articulado

Rígido | Flexible | **Articulado**

AASHTO 93

Calculo del Número Estructural (SN)

W18: 1210076 | CBR%: 1.7 | Δ PSI: 2.2 | Zr (confiabilidad): 90 | So: 0.45

SN: 4.88 | **Calcular SN**

Cálculo de los espesores de las capas

Coefficientes drenaje: 1-5% | Regular

a Sb (CBR%): 70 | a M (CBR%): 30

Capas	E min	E (in)	ai	mi	SNi
Adoquinado	3.15	3.15	0.45		1.42
Sub base	9.0	9.2	0.13	1.10	1.316
Mejoramiento	18.0	18	0.109	1.10	2.158
				SNt	4.894

SN real: **SN real** | Cumple | **Graficar**

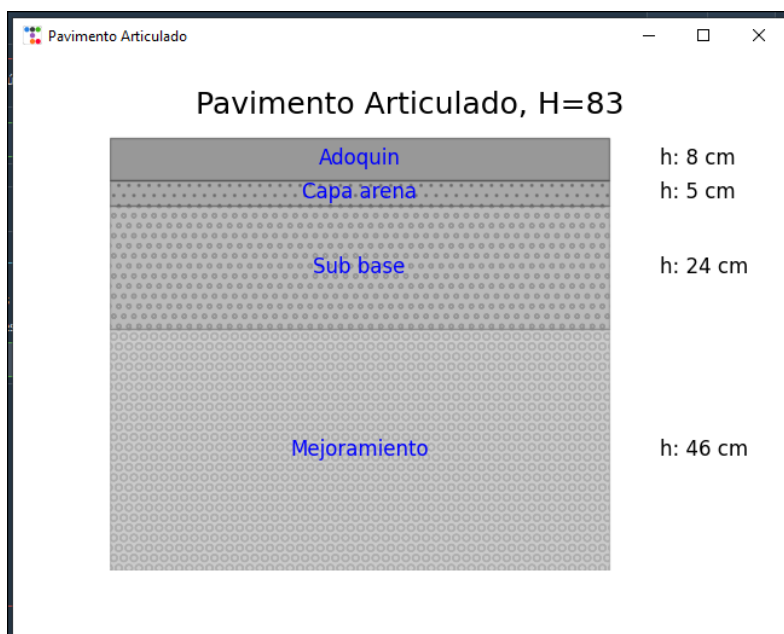


Ilustración 11: Resultados pavimento articulado

Resultados obtenidos del cálculo manual

Mediante el uso del nomograma propuesto por la AASHTO, *Ilustración 2: Nomograma para el cálculo del número estructural*, se determinó el número estructural para todo el conjunto y para cada capa.

Con los datos especificados para las capas inferiores se encontró los coeficientes de capa y de drenaje.

Con los datos anteriores es posible la determinación de los espesores de capa mediante la utilización de *Ecuación 4: Cálculo de los espesores de capa*

El procedimiento utilizado y los recursos empleados en la resolución se encuentran en la parte 2.2.1 de este trabajo.

Capas	espesor (in)	mi	Ai	SN	e. corregido (in)
Adoquinado	3.150	1	0.45	1.42	3.15
Subbase	5.993	1.1	0.135	0.89	9
Mejoramiento	21.435	1.1	0.109	2.57	18
			SN real	4.88	

SN nomograma	4.88
Adoquinado	8 cm
Subbase	22.86 cm
Mejoramiento	45.72 cm

Tabla 9: Resultados cálculo manual pavimentos flexibles

Para que los espesores de capa sean válidos se debe tomar en consideración el cumplimiento con los espesores mínimos que debe poseer cada capa, por tanto, se requirió corregir los espesores.

$$H = 81.58 \text{ cm}$$

Adoquinado	h = 8 cm
Cama arena	h = 5 cm
Subbase	h = 22.86 cm
Mejoramiento	h = 45.72 cm

Ilustración 12: Configuración de capas cálculo manual de pavimento articulado

4.1.1.3. Pavimento Rígido

Para el cálculo de este prediseño se utilizó el siguiente modelo:

Losa de concreto sin bermas ni pasadores, sin inclusión de subbase

CBR subrasante: 3%

Mr (psi): 650

FSC: 1.0

Espesor (in): 6.0

Cargas

Ejes simples		Ejes tándem	
Carga kips	Repeticiones	Carga kips	Repeticiones
22	130	36	550
20	550	32	9140
18	2080	28	9000
16	5000	24	5150
14	7370	20	7500
12	16290	16	9860
10	26930	12	18300
8	63500	8	11250

Resultados obtenidos con el uso de la herramienta

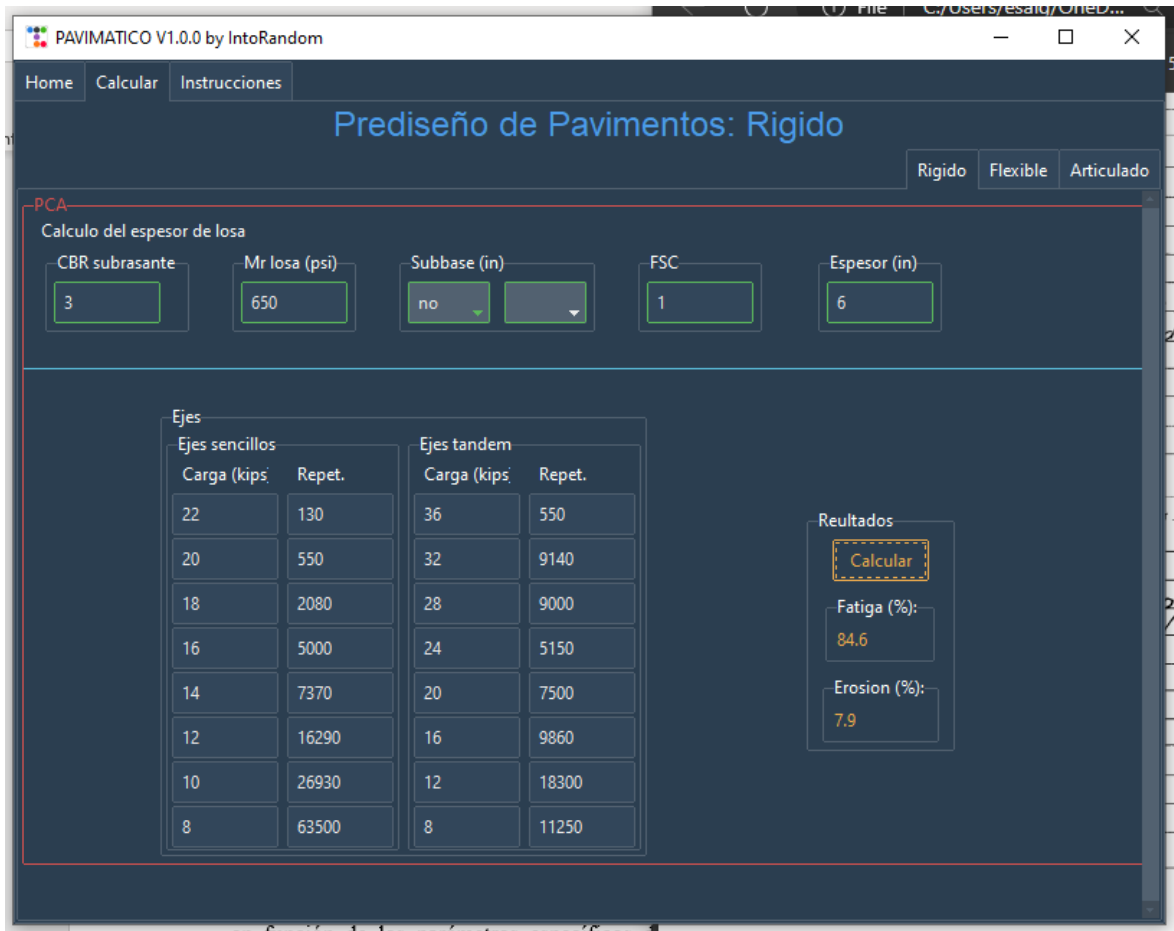


Ilustración 13: Resultados pavimento rígido

Fatiga: 84.6%, Erosión: 7.9%

Los valores de fatiga y erosión presentan valores inferiores al 100%, por tanto, el espesor de la losa satisface las necesidades del tráfico.

Resultados obtenidos del cálculo manual

Ejes simples						
Carga kips	Carga*FSC	Repeticiones	Rep. Adm.	Fatiga	Rep. Adm.	Erosión
22	22	130	340	38.2	120000	0.1
20	20	550	2000	27.5	210000	0.3
18	18	2080	13000	16	380000	0.5
16	16	5000	80000	6.2	740000	0.7
14	14	7370	800000	0.9	1600000	0.5
12	12	16290	Ilimitadas	0	4200000	0.4
10	10	26930	Ilimitadas	0	1500000	0.2
8	8	63500	Ilimitadas	0	Ilimitadas	0
Total				88.8	Total	2.7

Ejes tándem						
Carga kips	Carga*FSC	Repeticiones	Rep. Adm.	Fatiga	Rep. Adm.	Erosión
36	36	550	190000	0.3	160000	0.3
32	32	9140	2500000	0.3	310000	2.9
28	28	9000	Ilimitadas	0	660000	1.4
24	24	5150	Ilimitadas	0	1700000	0.3
20	20	7500	Ilimitadas	0	5400000	0.1
16	16	9860	Ilimitadas	0	26000000	0
12	12	18300	Ilimitadas	0	Ilimitadas	0
8	8	11250	Ilimitadas	0	Ilimitadas	0
Total				0.6	Total	5

Tabla 10: Resultados calculo manual pavimentos rígidos

Fatiga: 89.4%, Erosión: 7.2%

El procedimiento utilizado y los recursos empleados en la resolución se encuentran en la parte 2.2.2 de este trabajo.

4.1.2. Cuantificación de tiempos de cálculo

La variación en el tamaño de los proyectos viales hace que la determinación del tiempo empleado en la generación de prediseños mediante el cálculo manual y automatizado, este en función de los parámetros específicos de cada proyecto. Para obtener valores más representativos para el análisis de los resultados obtenidos en este trabajo se realizó la cuantificación del tiempo considerando un análisis de las partes más representativas dentro de los procesos de generación de prediseños.

Número estructural SN

La determinación del número estructural mediante el nomograma requiere un entendimiento del uso de este. El tiempo promedio utilizado en la obtención del valor estructural fue de alrededor de 4 minutos.

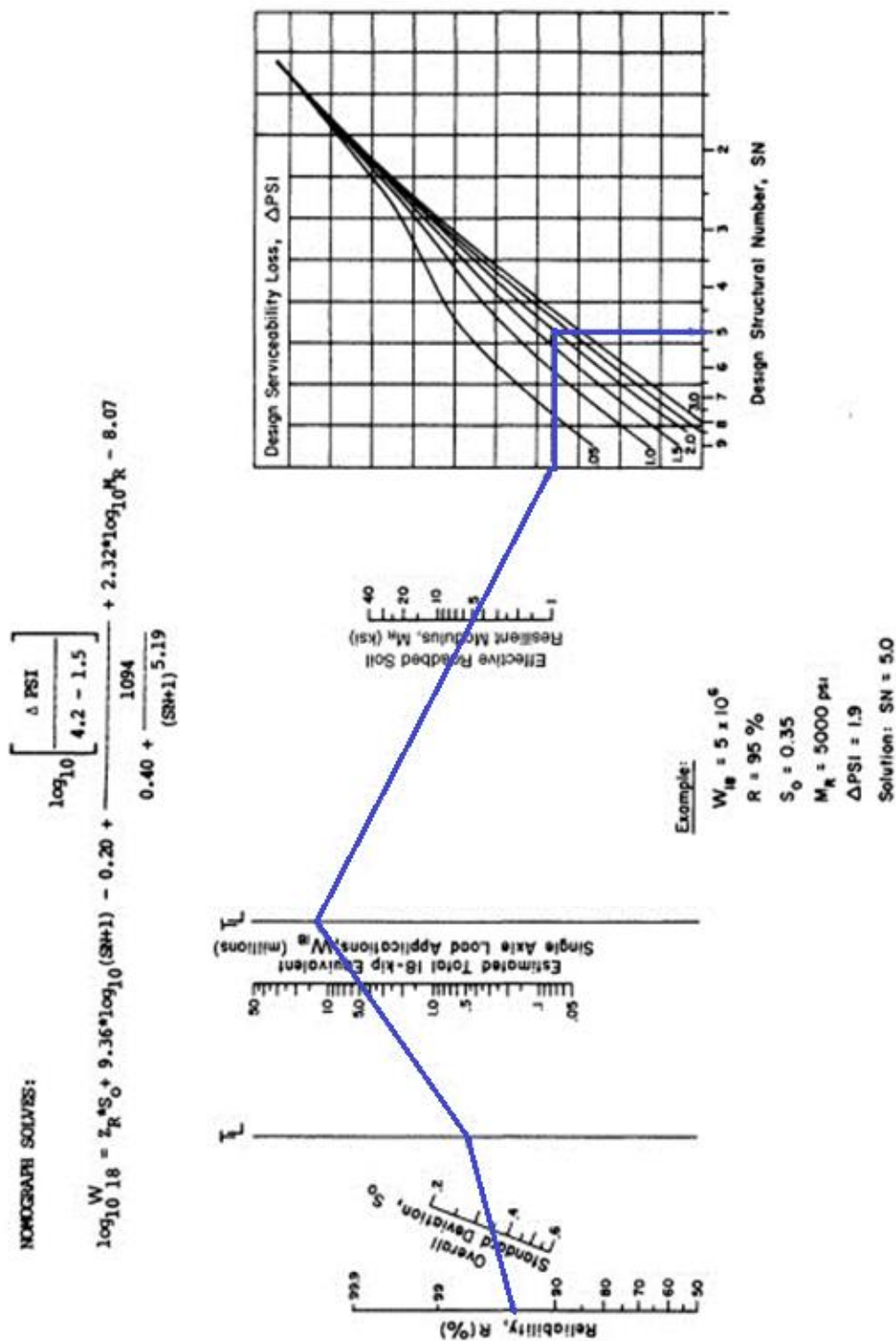


Ilustración : Utilización del nomograma

Capacidad portante de la subrasante K

La principal dificultad en la medición del valor K mediante el uso del gráfico propuesto por la PCA, radica en la presencia de gráficos con escalas no constantes, que pueden dificultar la lectura de este valor. Tiempo empleado 2 minutos.

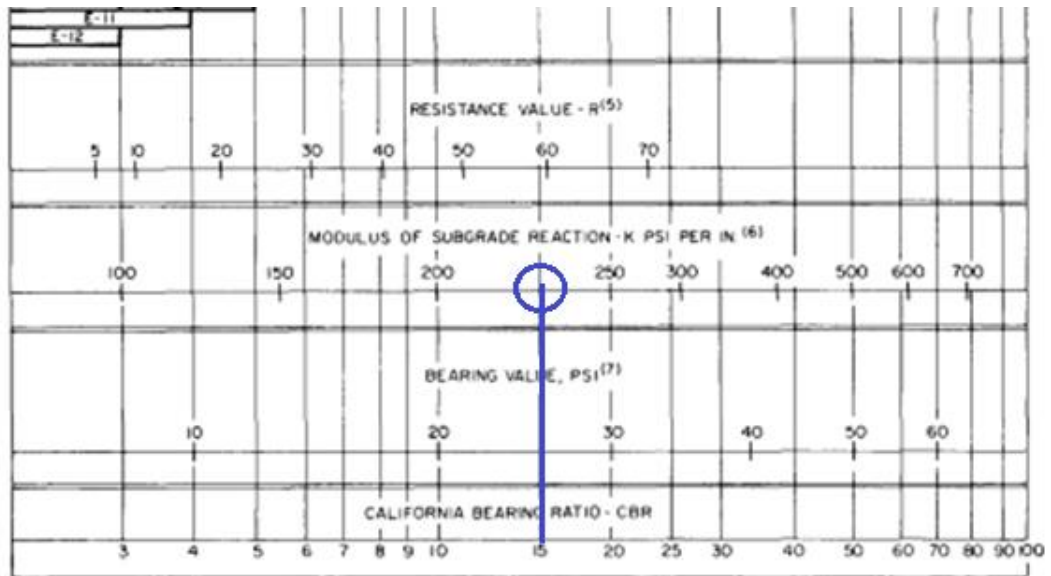


Ilustración 14: Determinación de K

Repeticiones admisibles por fatiga y erosión

La utilización de los siguientes gráficos es relativamente simple, el principal problema es que deben utilizarse para todas y cada una de las cargas consideradas en el análisis de tráfico para cada tipo de eje. El tiempo promedio utilizado en la medición de este parámetro fue de 1 minuto por gráfico.

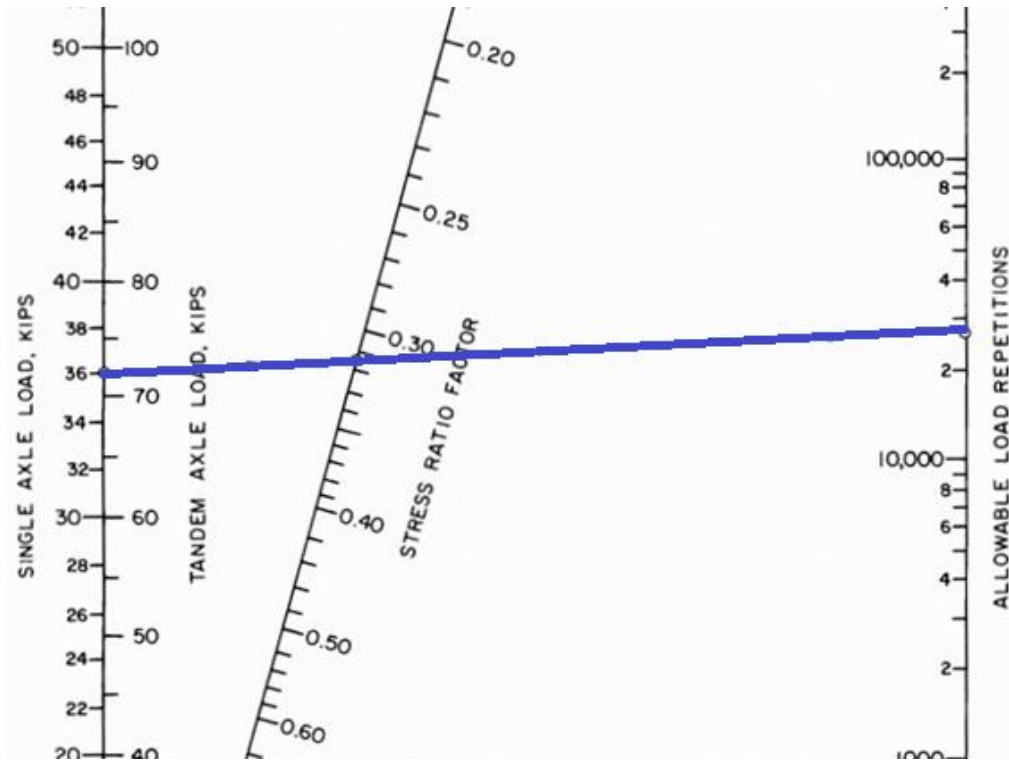


Ilustración 15: cálculo de repeticiones por fatiga

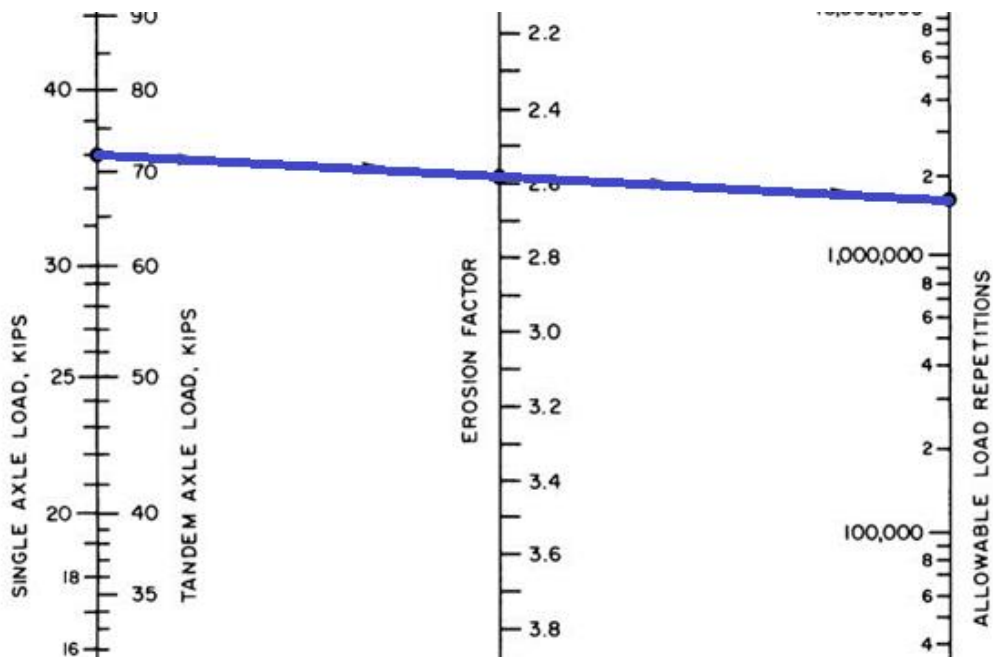


Ilustración 16: Cálculo de repeticiones por erosión

4.2. Análisis de resultados

4.2.1. Resultados de cálculo

4.2.1.1. Pavimento Articulado

Los valores de las alturas de las capas encontradas mediante el cálculo manual y utilizando la herramienta propuesta se muestran en la siguiente tabla:

Capas	Cálculo Herramienta (cm)	Cálculo Manual (cm)	Variación (cm)
Capa Asfáltica	8	7.62	0.42
Base	31	30	0.135
Subbase	41	40	0.11
Total	80	77.62	

Tabla 11: Variación de resultados en el cálculo manual y automático de pavimento flexible

Los valores de cada capa corresponden a los espesores mínimos que cada una de ellas debe tener, para cumplir con los requerimientos del modelo, la adopción de valores finales para el diseño definitivo dependerá del respectivo análisis por parte del diseñador, considerando también condiciones prácticas o constructivas, por tanto, la variación obtenida entre ambos métodos no es significativa.

4.2.1.2. Pavimento Flexible

Los valores de las alturas de las capas encontradas mediante el cálculo manual y utilizando la herramienta propuesta se muestran en la siguiente tabla:

Capas	Cálculo Herramienta (cm)	Cálculo Manual (cm)	Variación (cm)
Adoquinado	8	8	0.42
Subbase	24	22.86	0.135
Subrasante	46	45.72	0.11
Total	78	76.58	

Tabla 12: Variación de resultados en el cálculo manual y automático de pavimento articulado

La variación encontrada entre ambas formas de cálculo es aceptable, los valores aportados son admisibles dentro de un nivel de prediseño.

4.2.1.3. Pavimento Rígido

La variación de los resultados encontrados mediante el cálculo manual y utilizando la herramienta propuesta se muestran en la siguiente tabla:

	Cálculo Herramienta	Cálculo Manual	Variación
Fatiga	84.6	89.4	4.8
Erosión	7.9	7.2	0.7

Tabla 13: Variación de resultados en el cálculo manual y automatico de pavimento rígido

La variación encontrada entre las dos formas de cálculo es muy pequeña y puede considerarse como despreciable dentro de la etapa de prediseño de un proyecto vial.

4.2.2. Cuantificación de ahorros de tiempos de cálculo

La determinación de los tiempos empleados en la resolución de prediseños de pavimentos puede ser muy ambiguo, debido a la diferente capacidad, habilidad y dominio de las metodologías del diseñador.

Se determinó el ahorro de los siguientes tiempos en la resolución de los modelos utilizados para los prediseños:

Modelo planteado en 4.1.1.1 Prediseño de pavimento flexible

Utilización del nomograma: el cálculo del número estructural se realiza tanto para la estructura completa como para cada una de sus capas, número de veces utilizado 3

Ahorro de tiempo: 15 minutos

Modelo planteado en 4.1.1.2 Prediseño de pavimento articulado

Utilización del nomograma: el cálculo del número estructural se realiza tanto para la estructura completa como para cada una de sus capas, número de veces utilizado 3

Ahorro de tiempo: 15 minutos

Modelo planteado en 4.1.1.3 Prediseño de pavimento rígido

Cálculo del coeficiente de balasto k: este cálculo se realiza una vez.

Cálculo de la erosión: en el ejercicio resuelto, se utilizaron 10 cargas diferentes

Cálculo de la fatiga: en el ejercicio resuelto, se utilizaron 10 cargas diferentes

Ahorro de tiempo: 22 minutos

La presente herramienta puede resolver los modelos y entregar resultados para prediseños en fracciones de segundo, siendo el proceso que más tarda el ingreso de los parámetros utilizados en el cálculo.

Es importante señalar que los procesos de prediseño de pavimentos muchas veces son iterativos, debido a que buscan ser óptimos y eficientes, la herramienta propuesta puede facilitar la resolución de estos procesos con gran facilidad y rapidez.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La variación de los valores obtenidos en el cálculo de los diferentes parámetros y resultados aportados por esta herramienta en comparación con los obtenidos de un cálculo manual es despreciable, por tanto, su uso dentro de la generación de prediseños es recomendable.
- Los resultados calculados en el prediseño de pavimentos flexibles y articulados presentan variaciones aceptables dentro de los espesores de cada capa
- Los resultados calculados en el prediseño de pavimentos articulados son considerados como aceptables dentro de un nivel de prediseño que no requiere demasiado detalle debido a su escasa variación.
- Los resultados calculados en el prediseño de pavimentos rígidos presentan ligeras variaciones las cuales pueden considerarse como aceptables dentro de un nivel de prediseño que no requiere demasiada precisión.

- Los resultados aportados por esta herramienta son un punto seguro de partida para realizar un análisis más profundo, estos valores deberán ser analizados e interpretados por personas capacitadas en este campo y no tomados como definitivos.
- La diferencia de tiempo entre el cálculo de prediseños de forma manual y de forma automatizada es significativamente alto, esta herramienta de productividad permite la obtención instantánea de resultados. Presenta una gran utilidad en el análisis de prediseños que busquen optimizar los valores de los parámetros de cálculo en un análisis iterativo.
- Los resultados de los parámetros obtenidos mediante la utilización de nomogramas o gráficos pueden presentar errores de apreciación. La lectura de valores en un gráfico dependerá de la habilidad y percepción del observador; la presencia de escalas ambiguas o el tamaño de la impresión del gráfico utilizado, pueden influir en la interpretación de los resultados.
- Esta herramienta no necesita de ningún recurso técnico adicional, su funcionamiento requiere únicamente parámetros iniciales básicos de cálculo a partir de los cuales desarrollará prediseños para los diferentes tipos de pavimentos planteados siguiendo la metodología correspondiente a cada uno de ellos.
- La herramienta productiva para el prediseño de pavimentos desarrollada presenta una gran facilidad de uso y ejecución, la interfaz de la herramienta ha sido diseñada de manera intuitiva, permitiendo a los usuarios realizar el prediseño de pavimentos con facilidad.
- La herramienta desarrollada destaca por su portabilidad en entornos de Windows, presenta un uso eficiente sin necesidad de recursos computacionales adicionales, instalaciones complejas ni configuraciones específicas.
- La herramienta desarrollada tiene la versatilidad de poder ser compilada para diferentes sistemas operativos, ampliando su utilización más allá de la plataforma

Windows. La capacidad de generar archivos ejecutables a partir del código fuente facilita la distribución y uso de este programa en diferentes sistemas operativos.

5.2.Recomendaciones

- Para la generación de diseños definitivos de pavimentos se requiere un análisis más detallado que el de prediseño, la inclusión de una mayor cantidad de parámetros involucrados en la generación de resultados es necesario con la finalidad de abarcar posibles variaciones dentro de un proyecto.
- Se debe incorporar medios de cálculo directo para obtener ciertos parámetros en lugar del uso de tablas predefinidas. La implementación de métodos de cálculo brinda mayor flexibilidad y precisión de los resultados en el diseño de pavimentos.
- Se recomienda crear un repositorio para compartir el código fuente de la herramienta, permitiendo la integración de colaboradores que aporten al desarrollo futuro de la herramienta, facilitando el control de versiones y actualizaciones. Esta práctica promueve una comunidad comprometida y enfocada en mejorar la calidad de este software de prediseño.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Python Software Foundation. (05 de Septiembre de 2023). *Python 3.11.5 documentation*. Obtenido de <https://docs.python.org/3/>
- AASHTOWare. (05 de Septiembre de 2023). *AASHTOWare Pavement ME Design*. Obtenido de <https://www.aashtoware.org/products/pavement/pavement-me-design/>
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*.
- American Society of Civil Engineers. (2016). *Structural Design of Interlocking Concrete Pavement for Municipal Streets and Roadways 58-16*.
- AUQUI JUAN, R. D. (2019). *GUÍA PRÁCTICA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE CARRETERAS*. Quito: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.
- Churchville, F. (05 de Septiembre de 2023). *ComputerWeekly.es*. Obtenido de <https://www.computerweekly.com/es/definicion/Interfaz-de-usuario-UI>
- Diego Calo, Edgardo Souza, Eduardo Marconi. (2014). *Manual de diseño y construcción de pavimentos de hormigón*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Instituto del Cemento Portland Argentino.
- INSTITUTO BOLIVIANO DEL CEMENTO Y EL HORMIGON. (05 de Septiembre de 2023). *SOFTWARE DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DIPAV 3.0*. Obtenido de <https://www.ibch.com/producto/software-de-diseno-de-pavimentos-dipav-3-0/>
- MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR. (2013). *VOLUMEN N° 2 – LIBRO A NORMA PARA ESTUDIOS Y DISEÑOS VIALES NORMA ECUATORIANA VIAL NEVI-12 - MTOP*. Quito: SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE.
- Portland Cement Association (PCA). (1984). *PCA Design manual for Concrete Pavements*.
- STEM, F. . (05 de Septiembre de 2023). *ferrovial*. Obtenido de <https://www.ferrovial.com/es/stem/algoritmos/>
- Ying-Haur Lee, S. H. (2001). PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design. En *Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 4, No. 4* (págs. 293-300).