

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGÍAS EMPLEADAS PARA DISEÑO
DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN COLOMBIA Y AUSTRALIA**

JUAN CAMILO BARRIGA HERNÁNDEZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C
AÑO 2024

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGÍAS EMPLEADAS PARA DISEÑO
DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN COLOMBIA Y AUSTRALIA**

JUAN CAMILO BARRIGA HERNÁNDEZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Director: Msc. Ing. Juan Miguel Sanchez Duran



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
AÑO 2024

Autoridades Académicas

P. ÁLVARO JOSÉ ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. JAVIER ANTONIO HINCAPIÉ ARDILA, O.P.

Decano división de ingenierías

Esp. Luz Patricia Rocha Caicedo

Secretaria de división de ingeniería

Esp. Sandra Judith Rodríguez Murcia

Secretaria de la facultad de Ingeniería civil

ING. CARLOS ALBERTO GONZALEZ CAMARGO

Decano Facultad de Ingeniería Civil

NOTA DE ACEPTACIÓN

JUAN MIGUEL SANCHEZ DURÁN

Director trabajo de grado

CARLOS EDUARDO TORRES ROMERO

Jurado 1 trabajo de grado

JULY ESTEFANY CARMONA ÁLVAREZ

Jurado 2 trabajo de grado

DEDICATORIA:

Este trabajo es dedicado, primeramente, a Dios, por bendecirme y darme la oportunidad de estudiar esta hermosa carrera. En segunda instancia, a mis padres y a mi hermano por todo el amor, comprensión y apoyo que me brindan día a día. Finalmente, quiero expresar mi gratitud a cada docente que colaboró conmigo, compartiendo su conocimiento y acompañándome en este proceso para lograr el sueño de ser Ingeniero Civil.

Juan Camilo Barriga Hernández

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco, en primer lugar, a Dios por guiarme y darme la fortaleza para nunca rendirme. En segundo lugar, mi profundo agradecimiento se dirige a mis padres y a mi hermano, quienes son el motor de mi vida. De igual forma, quiero expresar mi gratitud a mis amigos por acompañarme y motivarme en este proceso; también a mi gloriosa Universidad Santo Tomás por darme la oportunidad de formarme profesionalmente.

Quiero destacar y agradecer, especialmente la colaboración de mi director de grado, el Ing. Msc. Juan Miguel Sánchez Durán. Gracias por confiar en mí, por guiarme y por acompañarme en este proceso. Su apoyo ha sido fundamental para el éxito de este trabajo.

Tabla de contenido

Glosario	11
Introducción	15
Formulación del Problema	16
Objetivos	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos	17
Justificación	18
Estado del Arte	20
Investigaciones internacionales	20
Investigaciones nacionales	25
Investigaciones locales (Universidad Santo Tomás)	28
Metodología	30
Desarrollo	31
Historia del diseño de vías y pavimentos en Colombia	31
Historia del diseño de vías y pavimentos en AUSTRALIA	33
Metodología de diseño de pavimentos en Colombia	34
Contenido manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito	34
Estimación del tránsito	36
Clasificación vehicular	36
Pesos brutos vehiculares máximos vigentes en Colombia	38
Cargas máximas por tipo de eje	38
Métodos de conteo vehicular	39
<i>Resumen de composición vehicula obtenida de la Red Vial Nacional</i>	41
Factor distribución direccional	41
Factor distribución carril	41
<i>Factor de distribución por carril según NCHRP</i>	42
Cuantificación de la variable tránsito determinada con tránsito equivalente	42
Factor de equivalencia de carga	42
Factores ambientales y climáticos	42
• <i>Factores externos</i>	43
• <i>Factores internos</i>	43

• <i>Variables ambientales</i>	43
• <i>Variables climáticas</i>	43
• <i>Consideraciones de los efectos del cambio de humedad sobre la estructura del pavimento:</i> ..	43
<i>Clasificación según índice de Thornthwaite</i>	44
<i>División de Colombia según índice Thornthwaite</i>	45
<i>Evaluación de la subrasante</i>	46
<i>Mapas de suelos de Colombia</i>	47
Caracterización de la subrasante para el diseño de pavimentos	48
1. <i>Estudio Preliminar</i>	48
2. <i>Definición de tramos homogéneos para la planeación de la exploración geotécnica definitiva del suelo</i>	49
3. <i>Estudio definitivo</i>	50
4. <i>Módulo resiliente de la subrasante</i>	50
Materiales viales	51
• <i>Materiales asfálticos</i>	51
• <i>Materiales tratados con cal</i>	51
• <i>Materiales granulares</i>	51
Diseño estructural	51
<i>Parámetros de entrada requeridos</i>	53
<i>Metodología de diseño:</i>	55
<i>Análisis estructural</i>	59
Metodología de diseño de pavimentos en Australia	61
<i>Contenido Guide to pavement technology part 2 of Austroads</i>	61
<i>Análisis de diseños</i>	80
Conclusiones	82
Recomendaciones	84
Referencias y/o bibliografía	86

Lista de figuras

Figura 1: Configuración vehicular 1	37
Figura 3: Configuración vehicular INVIAS	37
Figura 2: Configuración vehicular INVIAS II.....	37
Figura 4: Pesos brutos vehiculares máximos vigentes en Colombia	38
Figura 5: Cargas máximas por tipo de eje 1	38
Figura 6: Cargas máximas por tipo de eje 2	39
Figura 7: Resumen de composición vehicular obtenida de la Red Vial Nacional.....	41
Figura 8: Factor de distribución por carril según NCHRP	42
Figura 9: Clasificación según índice de Thornthwaite	44
Figura 10: División de Colombia según índice Thornthwaite	45
Figura 11: Mapas de suelos de Colombia	47
Figura 12: Espaciamiento y profundidad mínima de sondeos	48
Figura 13: Ensayos necesarios para el estudio preliminar de la subrasante	49
Figura 14: Procesamiento de la variable tránsito	53
Figura 15: Procesamiento de la variable clima	54
Figura 16: Metodología de diseño del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con medios y altos volúmenes de tránsito	55
Figura 17: Diagrama de números estructurales requeridos.....	58
Figura 18: Ecuaciones diseño estructural	58
Figura 19: Puntos de análisis diseño de pavimentos.....	60
Figura 20: Determinación del tráfico de diseño.....	64
Figura 21: Factor de distribución carril	66
Figura 22: Grupos de ejes con neumáticos dobles.....	68

Figura 23: Grupos de ejes con neumáticos simples	69
Figura 24: Configuración vehicular AUSTROADS	70
Figura 25: Procedimiento diseño de pavimentos AUSTROADS	72
Figura 26: Eje con neumáticos simples	74
Figura 27: Eje con neumáticos dobles	74
Figura 28: Requisitos de entrada AUSTROADS.....	75
Figura 29: Calculo de deformaciones críticas AUSTROADS.....	76
Figura 30: Calculo de deformaciones críticas II AUSTROADS	77
Figura 31: Analisis e interpretación de resultados I.....	77
Figura 32: Análisis e interpretación de resultados II	78
Figura 33: Análisis e interpretación de resultados III.....	79

Glosario

Base granular: Se compone comúnmente de agregados como lo son grava y piedra, se encuentra ubicada entre la carpeta asfáltica y la subbase granular; proporciona una base estable para la capa de rodadura, mejorando a su vez la resistencia del pavimento a fatiga y deformaciones.

Bitumen: Es un material pegajoso y viscoso que es utilizado en pavimentos, este producto es importante en las mezclas asfálticas, necesario para construir las denominadas capas de rodadura.

Carpeta asfáltica: Es aquella capa superior del pavimento asfáltico, brinda una lisa superficie y resistente al tráfico de vehículos; debe ser capaz de soportar cargas y demás esfuerzos que genera el tránsito de vehículos.

CBR: Su nombre original es “California bearing ratio” y sirve de medida de la capacidad portante de un suelo.

Deflexión: Es la cantidad de flexión que experimenta el pavimento bajo cargas de tráfico, se suele medir con deflectógrafos o deflectómetros

Módulo de elasticidad: Es conocido también como el módulo de Young y es la propiedad mecánica del material, que ayuda a describir la capacidad de deformación de forma elástica al momento de aplicar cargas.

Modulo resiliente: Es aquella medición de capacidad de algún material para absorber y almacenar cierta energía sin que se genere una permanente deformación.

Pavimento: Es una base horizontal que constituye el suelo de cualquier construcción y sirve de apoyo para vehículos, personas y demás.

Subbase granular: Es una capa del pavimento que se encuentra ubicada entre la subrasante y la base granular.

Subrasante: Es el denominado terreno natural, el cual se encuentra debajo de las capas de pavimento.

Tránsito: Es el movimiento de peatones y vehículos sobre alguna superficie, este componente es muy importante al momento de diseñar de pavimentos, porque la cantidad de tránsito va directamente relacionada con la durabilidad y rendimiento del pavimento.

Resumen

Esta monografía se enfocó en realizar una investigación detallada de las metodologías actuales de diseño de pavimentos flexibles en Australia y Colombia, específicamente del *"Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito"* del INVIAS y la *"Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design"* de AUSTROADS. Se pretendía encontrar divergencias y convergencias en ambas metodologías, con el fin de analizar posibles áreas de mejora y cuyo fin es contribuir de forma efectiva a la optimización de diseño de pavimentos flexibles más sostenibles y eficientes en Colombia.

Se evidenció una variación significativa en las configuraciones vehiculares entre los documentos analizados, destacando la importancia de considerar estas clasificaciones en el diseño de pavimentos para influir en la resistencia del pavimento, su vida útil y la gestión del tráfico.

Finalmente se analiza que ambos manuales carecen de información sobre sostenibilidad y materiales sustentables, se observó que la *"Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design"* de AUSTROADS incluye una comparación económica, mientras que el *"Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito"* del INVIAS no aborda este análisis.

Ambas metodologías implementan el método mecanicista-empirista, combinando el diseño mecanicista basado en la respuesta del pavimento a cargas mediante modelación matemática con el enfoque empírico que relaciona respuestas con el desempeño, basándose en resultados experimentales y conocimiento profesional. Cada deterioro del pavimento se vincula a una respuesta crítica específica, destacando la importancia de comprender y abordar estas respuestas para un diseño efectivo de pavimentos flexibles.

Palabras claves: Pavimento flexible, CBR, AUSTROADS, INVIAS, Diseño, Subrasante

Abstract

This monograph focused on conducting a detailed investigation of the current flexible pavement design methodologies in Australia and Colombia, specifically the INVIAS " *Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito* " and the " *Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design* " by AUSTROADS. The aim was to find divergences and convergences in both methodologies, in order to analyze possible areas of improvement and whose purpose is to contribute effectively to the optimization of the design of more sustainable and efficient flexible pavements in Colombia.

A significant variation in vehicular configurations between the analyzed documents was evident, emphasizing the importance of considering these classifications in pavement design to influence pavement strength, lifespan, and traffic management.

Ultimately, it was observed that both manuals lacked information on sustainability and sustainable materials. It was noted that the " *Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design* " from AUSTROADS includes an economic comparison, whereas the " *Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito* " from INVIAS does not address this analysis.

Both methodologies implement the mechanistic-empirical method, combining mechanistic design based on pavement response to loads through mathematical modeling with an empirical approach that relates responses to performance, relying on experimental results and professional knowledge. Each pavement deterioration is linked to a specific critical response, emphasizing the importance of understanding and addressing these responses for effective flexible pavement design

Keyword: Pavement flexible, CBR, AUSTROADS, INVIAS, Design, Subgrade

Introducción

En ingeniería civil, el diseño de pavimentos flexibles constituye una parte fundamental para garantizar la durabilidad y funcionalidad de las infraestructuras viales, especialmente en vías con elevados volúmenes de tránsito. En este contexto, la monografía mostrada a continuación se centra en comparar dos metodologías de diseño de pavimentos flexibles, en base al *"Manual de Pavimentos Asfálticos para Vías de Medios y Altos Volúmenes de Tránsito"* del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y la *"Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design"* desarrollada por AUSTROADS.

Este análisis abarca diversas variables y parámetros esenciales para el diseño eficiente de pavimentos flexibles, destacando similitudes y diferencias entre ambas metodologías. La investigación revela que ambas guías comparten un enfoque mecanicista-empírico, orientado a garantizar el rendimiento estructural de los pavimentos, y comparten un diseño para cargas estándar de 80 kN. Sin embargo, un hallazgo significativo es la ausencia de consideraciones relacionadas con la sostenibilidad en ambas metodologías, planteando interrogantes sobre la integración de prácticas más sostenibles en el diseño de pavimentos.

Además, se ha escogido la metodología de diseño de pavimentos de Australia, ya que este país oceánico es referente internacional en diseño de pavimentos e ingeniería civil en general. La elección de este país se fundamenta en la reconocida calidad de los pavimentos diseñados en Australia, lo que convierte a esta metodología en un punto de referencia valioso para mejorar continuamente en el diseño de pavimentos flexibles. Esta investigación busca, por ende, no solo destacar las convergencias y divergencias entre las metodologías estudiadas, sino también explorar la necesidad de integrar consideraciones sostenibles en el diseño de pavimentos para promover la resiliencia y la eficiencia a largo plazo de las infraestructuras viales.

Formulación del Problema

Se pretende realizar una evaluación comparativa entre la metodología de diseño de pavimentos flexibles en Colombia y Australia, dado que este último país se destaca a nivel internacional en el campo de la infraestructura vial. Un ejemplo notable de su eficiencia y calidad en la construcción de carreteras se evidenció en 2017, cuando completaron un tramo de aproximadamente 5 kilómetros en tan solo dos días, con un presupuesto de 300.000 euros, destacándose por su efectividad y excelencia en la construcción de carreteras a nivel internacional. (Eadic, 2017)

Además, Australia tiene un enfoque constante en innovación y sostenibilidad, particularmente a través del reciclaje, con el propósito de disminuir los efectos del cambio climático. Durante la pandemia, Australia introdujo una iniciativa ingeniosa donde los tapabocas desempeñaron un papel esencial en el proceso de pavimentación. El Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT) desarrolló esta propuesta sostenible, que implica la combinación de triturados de tapabocas con los escombros previamente procesados de la construcción, y posteriormente utilizar el material resultante como base o sub-base granular para pavimentos.

Es interesante realizar una comparación de ambas metodologías de diseño de pavimentos, ya que ambos países se encuentran localizados en continentes diferentes, con condiciones de entorno, normativa y métodos de construcción distintos. Actualmente estas diferencias no se han investigado, ya que no suele ser muy llamativo comparar la metodología de diseño de pavimentos de Colombia con un país oceánico, ¿Cuáles serán las principales diferencias y similitudes entre la metodología de diseño de pavimentos de Australia y Colombia teniendo como base principal la normativa, las condiciones del entorno y el método de diseño?

Objetivos

Objetivo general

Realizar un estudio exhaustivo, comparando y analizando críticamente las metodologías de diseño de pavimentos flexibles utilizadas en Colombia y Australia.

Objetivos específicos

- Realizar una investigación detallada de las metodologías actuales de diseño de pavimentos asfálticos en Australia y Colombia.
- Analizar de manera individual el “*Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito*” del INVIAS y el documento “*Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design*” of AUSTROADS.
- Identificar similitudes, diferencias, prácticas y posibles áreas de mejora en ambas metodologías, con el fin de contribuir al desarrollo y la optimización de diseños de pavimentos flexibles más eficientes y sostenibles en el contexto colombiano.

Justificación

En la publicación titulada "*Desarrollo de infraestructura y crecimiento económico: revisión conceptual*" de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), se destaca la importancia de concebir pavimentos que sean tanto económicos como duraderos. Esto se debe a que la eficacia de tales pavimentos influye directamente en el progreso socio económico de un país. Por consiguiente, resulta beneficioso examinar diversas metodologías de diseño de pavimentos con el fin de identificar posibles ventajas o problemas en la infraestructura vial que podrían pasar desapercibidos.

Es relevante también poner énfasis en las discrepancias entre los materiales de construcción, los costos operativos y la exploración de nuevas estrategias de mantenimiento a corto o largo plazo. Este enfoque busca garantizar la longevidad del pavimento y abordar eficientemente aspectos como la vida útil del mismo.

Es fundamental contar con un estándar internacional de excelencia en el diseño de pavimentos, ya que proporciona un punto de comparación para evaluar los estándares y enfoques de diseño de pavimentos en Colombia.

Se pretende hacer un análisis comparativo de la metodología de diseños de pavimentos asfálticos de Colombia con Australia, ya que este país oceánico es potencia mundial en infraestructura vial, ya que en el año 2017 completó un tramo vial de aproximadamente 5 kilómetros en dos días, con un presupuesto de 300.000 euros; sobresaliendo en un contexto internacional en efectividad y calidad de construcción de carreteras. (Eadic, 2017)

A su vez este país ubicado en el hemisferio sur, siempre busca innovar a través del reciclaje, con el fin de disminuir efectos del cambio climático. Durante la pandemia Australia utilizó los tapabocas como parte esencial del proceso de pavimentación. El Royal Melbourne Institute of

Technology (RMIT) desarrolló esta propuesta sustentable donde se mezcla trituraciones de tapabocas con los escombros ya procesados de construcción, como material resultante de base o sub-base granular.

Australia cuenta con destacados profesionales en ingeniería civil que han introducido ideas innovadoras en la construcción de carreteras a nivel global. Uno de los científicos más reconocidos en este ámbito es Geoff Jameson. Durante su visita a la Universidad del Desarrollo de Chile, Jameson enfatizó la importancia del trabajo colaborativo entre empresas públicas y privadas, instituciones educativas y el gobierno. Esta colaboración tiene como objetivo generar diseños innovadores y llevar a cabo proyectos de investigación en pavimentos, con el fin de asegurar la durabilidad y eficacia de los pavimentos en Latinoamérica y otras regiones a nivel internacional.

La finalidad de esta monografía consiste en realizar una evaluación comparativa entre *el "Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías de medios y altos volúmenes de tránsito"* del INVIAS y el documento *"Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design"* de AUSTROADS. El propósito es comprender ambas metodologías de diseño, identificar procedimientos constructivos similares y explorar la viabilidad de adoptar las respectivas diferencias.

Estado del Arte**Investigaciones internacionales**

Título: Adaptation of the AUSTROADS pavement design guide for New Zealand conditions

Autor: M. Gribble, J. Patrick

Año de publicación: 2008

Idioma: inglés

Objetivo: Resumir la literatura de diseño de pavimentos publicada en Nueva Zelanda, donde se compara con la guía de diseño de pavimentos publicada por AUSTROADS. Además en este texto se analizan capas granulares ligadas y no ligadas en un contexto internacional.

Palabras claves: Pavement, subgrade, design, AUSTROADS, base course.

Conclusiones: Se observa que la deformación plástica se suele acumular en la base, subbase granular y la subrasante. En Nueva Zelanda el diseño de pavimentos depende del CBR de la subrasante, el criterio de deformación de la subrasante en la guía de AUSTROADS es más conservador, se recomienda que en la guía de AUSTROADS se incorpore el modelo sudafricano ya que se utilizan modelos de rendimientos de capas determinados de manera empírica para capas granulares no ligadas.

Bibliografía: Gribble, M., Patrick, J. 2008. Adaptation of the AUSTROADS Pavement Design Guide for New Zealand conditions. Land Transport New Zealand Research Report 305.72pp.

Recuperado de:

<https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/305/docs/305.pdf>

Título: Guide to Pavement Technology Part 1: Introduction to Pavement Technology

Autor: AUSTROADS

Año de publicación: 2009

Idioma: Inglés

Objetivo: Proporcionar información sobre el funcionamiento, tipos, componente y materiales de pavimentos que se utilizan hoy en día en Australia; además de esto brinda teoría introductoria a los fundamentos del comportamiento de los pavimentos.

Palabras claves: Pavement, CBR, subgrade, asphalt, wearing Surface, stabilization, drainage, transport.

Conclusiones: La primera parte de la guía de pavimentos de la AUSTROADS publicada en 2009, es básica para entender el método de diseño, ya que en ella se observan los diferentes materiales empleados en el diseño de pavimentos como: roca triturada, grava, mezcla asfáltica densa, mezcla asfáltica abierta, asfalto de masilla de piedra, hormigón sin refuerzo, hormigón reforzado con fibras, materiales químicamente modificados y otros materiales modificados con cal, cemento y escoria. Además, se explica el comportamiento de cada material acompañado de sus características; se mencionan a su vez cuales son los parámetros de entrada para el diseño de pavimentos; como son el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y el grado de anisotropía, entre otra información relevante.

Finalmente se concluye que la primera parte de la guía de diseño de pavimentos que propone la AUSTROADS es la base del diseño de pavimentos de Australia y de manera indirecta también de Nueva Zelanda.

Bibliografía: Sharp, K. G. (2009). Guide to Pavement Technology: Introduction to pavement technology.

Recuperado de: <https://AUSTROADS.com.au/publications/pavement/agpt01>

Título: Improved Design Procedures for Asphalt Pavements

Autor: AUSTROADS

Año de publicación: 2016

Idioma: English

Objetivo: Validar las diferentes propuestas de caracterización de la mezcla asfáltica, módulos asfálticos y rendimiento de fatiga de los pavimentos asfálticos; es importante mencionar que se toma como idea central los planteamientos propuestos de la guía de pavimentos parte 1 y 2 de AUSTROADS.

Palabras claves: Asphalt, resilient modulus, fatigue, pavements, design.

Conclusiones: Se desarrolla un eficaz modelo para poder predecir cual es la temperatura del pavimento asfáltico. A partir de la temperatura del aire, se puede predecir a cualquier profundidad del pavimento y a cualquier hora del día. Es importante mencionar que en ese texto se logra hacer una introducción de una curva maestra sigmoideal que logra representar diferentes relaciones, como: temperatura vs tiempo de carga y temperatura vs módulo de flexión, para mezclas asfálticas.

Bibliografía: AUSTROADS. (2016). Improved Design Procedures for Asphalt Pavements.

Recuperado de: <https://AUSTROADS.com.au/publications/pavement/ap-r511-16>

Título: A Comparison between AUSTROADS Pavement Structural Design and AASHTO Design in Flexible Pavement.

Autor: Ainalem Nega

Año de publicación: 2013

Idioma: Inglés

Objetivo: Analizar la guía de pavimentos de Australia Parte 1 y el diseño de pavimentos flexibles por la metodología AASHTO, donde se pretenden encontrar beneficios, similitudes y diferencias de ambas metodologías de diseño. Además, este estudio recomienda algunas modificaciones para que los pavimentos en Australia sean más efectivos y duraderos.

Palabras claves: AUSTROADS, AASHTO, pavements, design, engineering.

Conclusiones: Se observa que las deformaciones que fueron calculadas por CIRCLY son más grandes que las que se calcularon con KENLAYER. Se encontró que la deformación crítica para la carpeta asfáltica es aproximadamente 4,34 veces más grande que la deformación tangencial de KENLAYER. A su vez el factor para la deformación crítica de la subrasante con relación a la deformación de compresión vertical de KENLAYER es 7,40. Esta diferencia se dio entre la metodología AASHTO y la australiana.

Bibliografía: Ainalem Nega. (2013). A Comparison between AUSTROADS Pavement Structural Design and AASHTO Design in Flexible Pavement.

Recuperado de:

https://www.academia.edu/37605733/A_Comparison_between_AUSTROADS_Pavement_Structural_Design_and_AASHTO_Design_in_Flexible_Pavement

Título: Análisis comparativo de las metodologías de diseño de firmes flexibles de nueva construcción y rehabilitación de carreteras y estudio de su implementación en un sistema de gestión de pavimentos.

Autor: Elena Diana Predeanu

Año de publicación: 2018

Idioma: Español

Objetivo: Acercamiento al diseño de los firmes flexibles, desde sus inicios hasta la actualidad, con enfoque en las principales metodologías utilizadas en los cinco continentes.

Palabras claves: flexible, pavimento, ICARO, infraestructura vial.

Conclusiones: Se observan múltiples diferencias y similitudes entre las diferentes metodologías: todas tienen la misma estructura de colocación de capas, considerando el tráfico y las características de los materiales como punto de origen. Pero es importante mencionar que aunque gran cantidad de datos de entrada son parecidos, su manera de medición y cálculo varía.

Se encuentra que la metodología UNAM da más importancia a las capas granulares, a diferencia de la metodología AASHTO que prioriza la mezcla bituminosa, se dice que este cambio se presenta por las características y recursos de cada nación.

Bibliografía: Predeanu D. (2018). Análisis comparativo de las metodologías de diseño de firmes flexibles de nueva construcción y rehabilitación de carreteras y estudio de su implementación en un sistema de gestión de pavimentos.

Recuperado de:

https://oa.upm.es/52785/1/TFM_ELENA_DIANA_PREDEANU.pdf

Investigaciones nacionales

Título: Evaluación de las metodologías de diseño de pavimentos flexibles para carreteras colombianas y brasileras.

Autor: Edwin Ariza, Oscar Ariza, Davis Castellano

Año de publicación: 2019

Idioma: Español

Objetivo: Analizar las variables presentes en los diseños de pavimentos en Brasil y en Colombia, para evaluar los diferentes aspectos técnicos y teóricos considerados en las metodologías de diseño de pavimentos de los métodos empíricos tradicionales de diseño adoptados por estos dos países sudamericanos.

Palabras claves: Pavimento, subrasante, CBR, tránsito.

Conclusiones: Se observa que en Colombia la AASHTO especifica un espesor de pavimento mínimo, mientras que en Brasil no se tiene en cuenta; es importante mencionar que en Brasil se prioriza la subbase y base granular, en este país se prefieren aumentar el espesor de estas capas y no aumentar la carpeta asfáltica. En Brasil se suelen mejorar estas capas granulares, mientras en Colombia se suele aumentar los espesores de base granular y carpeta asfáltica.

Bibliografía: Ariza-Merchán, O, Castellanos-Villalobos, D y Velasco-Ariza, E. (2019). Evaluación de las metodologías de diseño de pavimentos flexibles para carreteras colombianas y brasileras.

Recuperado de:

<https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/fdae0f4d-81a2-4cb9-b604-d5824fa5e2e0>

Título: Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones

Autor: Hugo Rondón, Freddy Reyes

Año de publicación: 2007

Idioma: Español

Objetivo: Analizar las diferentes metodologías de pavimentos flexibles y avances computacionales en un contexto internacional para discutir los comportamientos de las capas granulares.

Palabras claves: Pavimento, capas granulares, geotécnica, CBR

Conclusiones: Se deduce que al momento de emplear programas y/o software de elementos finitos para calcular deformaciones y esfuerzos de un pavimento se deben introducir ecuaciones constitutivas que tiendan a representar un comportamiento más real de cada material que tiene la estructura de pavimento. Además, se analiza que en las metodologías de diseño de pavimentos adoptadas en Colombia no se tiene en cuenta que las deformaciones permanentes del pavimento son la suma de la deformación individual de cada una de las capas de la estructura.

Bibliografía: Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 17(2), 41–65.

Recuperado de:

<https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1074>

Título: Comparación entre los métodos de diseño de pavimentos en Colombia, España e Italia.

Autor: Jhonny Mauricio Nieto Galvis

Año de publicación: 2016

Idioma: Español

Objetivo: Analizar los métodos y las especificaciones de diseño de pavimentos utilizados en Italia y España y compararlos con los de diseño de pavimentos en Colombia.

Palabras claves: Pavimentos, métodos, CBR, diseño, base granular.

Conclusiones: Se observa que el procedimiento de diseño con base en ejes equivalentes de diseño utilizado nacionalmente tanto por el IDU como por INVIAS, no son tan efectivos en el diseño de pavimentos, ya que las vías del territorio nacional no se encuentran en un buen estado y esto podría deberse porque el eje equivalente de diseño no es acorde con los vehículos y el tránsito actual.

Bibliografía: Nieto, JM (2016). Comparación entre los métodos de diseño de pavimentos en Colombia, España e Italia.

Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/15930>.

Investigaciones locales (Universidad Santo Tomás)

Título: Evaluación de metodología AASHTO y SHELL para el diseño de pavimento de la vía “Caracolí” que conecta a “La Carretera del Amor” en Villavicencio - Meta.

Autor: Carolina Cecilia Garzón Garzón

Año de publicación: 2020

Idioma: Español

Objetivo: Evaluar las metodologías SHELL y AASHTO, a través de un análisis comparativo para el diseño de pavimento de la vía “Caracolí” que conecta a “*La Carretera del Amor*” en el municipio de Villavicencio - Meta.

Palabras claves: Metodología SHELL, metodología AASHTO, pavimentos, CBR, diseño.

Conclusiones: Al momento de diseñar pavimentos, se debe tener en cuenta las temperaturas, ya que en algunas zonas del país las temperaturas son muy elevadas y esto puede perjudicar la construcción. Se encuentra que en Colombia la condición más crítica es la deformación permanente, principalmente por las altas temperaturas.

Bibliografía: Garzón Garzón, C. (2020). Evaluación de metodología AASHTO y SHELL para el diseño de pavimento de la vía “Caracolí” que conecta a “*La Carretera del Amor*” en Villavicencio - Meta.

Recuperado de:

<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/30437>

Título: Trabajo de monografía, análisis y diseño del pavimento flexible por medio del método de la AASHTO-93

Autor: Cristian Alexander Guerrero Martínez

Año de publicación: 2020

Idioma: Español

Objetivo: Diseñar una estructura de pavimentos flexible con el método Shell y el método AASHTO-93. A su vez se pretenden encontrar ventajas y limitaciones de las estructuras de los pavimentos flexibles.

Palabras claves: Estructura, pavimentos, método Shell, diseño.

Conclusiones: Se encuentra que para poder emplear el diseño por el método AASHTO se requiere de estudios de tránsito y suelos. Se observa que el método AASHTO relaciona diferentes variables como lo son: confiabilidad, factor de distribución carril y drenaje, entre otros. Se considera a su vez que las principales causas de fallas en los pavimentos flexibles se deben al proceso constructivo, tráfico, factores climáticos, mantenimientos ineficientes e irregularidades en la construcción de la estructura del pavimento.

Bibliografía: Guerrero Martínez, C. (2020). Trabajo de monografía, análisis y diseño del pavimento flexible por medio del método de la AASHTO-93.

Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/30367>

Metodología

Para este proyecto se hace una investigación mixta, donde se analizarán variables tanto cualitativas como cuantitativas y se hará la siguiente metodología:

- 1.) Búsqueda de investigaciones de diseño de pavimentos.
- 2.) Revisión teórica de investigaciones de metodología de diseño de pavimentos de Colombia.
- 3.) Revisión teórica de investigaciones de metodología de diseño de pavimentos de Australia y en otros países.
- 4.) Recopilación de información de las investigaciones encontradas.
- 5.) Estudio y extracción de información del “*Manual de pavimentos asfálticos de vías de medios y altos volúmenes del tránsito*” del INVIAS
- 6.) Estudio y extracción de información de “*Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design*” of AUSTROADS.
- 7.) Análisis comparativo de diferencias y similitudes de estos dos manuales.
- 8.) Planteamiento de ideas de mejora a partir de estos manuales.

Desarrollo

Historia del diseño de vías y pavimentos en Colombia.

En Colombia el diseño de pavimentos y corredores viales ha ido evolucionando con el tiempo, se han evidenciado cambios significativos en las últimas dos décadas, los cuales han sido impulsados por las necesidades de transportes, avances ingenieriles, crecimiento económico, inteligencia artificial, y demás factores.

En la década del siglo XX, las vías colombianas no eran pavimentadas, estaban en mal estado y la comunicación intermunicipal y nacional era deficiente, lo cual perjudicaba el desarrollo socio económico y el crecimiento del país.

“En el año 1994 se creó el INVIAS (Instituto Nacional de Vías), mediante el decreto 2171 del 30 de diciembre de 1992” (INVIAS, 2022), siendo esta la entidad encargada de la efectiva construcción y mantenimiento de los corredores viales de Colombia; este instituto ha desempeñado un papel importante en la planificación, crecimiento y avance de la infraestructura vial del país.

A finales del siglo XX, se empezó a realizar la pavimentación de las carreteras, con el fin de modernizar la red vial nacional, empezaron a diseñarse las carreteras de doble calzada, puentes, túneles y demás construcciones para mejorar la conectividad regional y nacional.

A medida del tiempo se adoptaron normas y especificaciones técnicas que con el tiempo se van actualizando, incluyendo nuevos métodos de diseño de pavimentos e incorporación de nuevos materiales.

En los últimos años la sostenibilidad ha sido el pilar fundamental la ingeniería de Colombia, considerando la conservación del medio ambiente, reduciendo el impacto ambiental; se han incluido nuevas técnicas de drenaje sostenible y la protección de áreas naturales.

La tecnología y la inteligencia artificial en los últimos diez años ha fortalecido el diseño de vías, se han implementado técnicas de telemetría, softwares y metodologías que facilitan las practicas ingenieriles.

Actualmente Colombia ha lanzado las vías 4G y 5G, vías de cuarta y quinta generación; con el fin de fortalecer y modernizar de manera eficaz las carreteras del territorio colombiano, renovando y mejorando algunas prácticas ingenieriles.

La evolución del diseño de pavimentos y pavimentos ha sido un esfuerzo del gobierno colombiano por mejorar la infraestructura vial, mejorar la movilidad y generar un crecimiento económico que beneficie a la comunidad.

Importante resaltar que el Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS), a través de su *"Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito"*, en su versión más reciente del 2015, desempeña un papel fundamental al ofrecer información esencial para la planificación y diseño de pavimentos asfálticos en Colombia. Este manual proporciona a los profesionales del sector una serie de técnicas y especificaciones constructivas con el objetivo de asegurar que los pavimentos asfálticos sean eficientes, duraderos y sostenibles. Dentro de este manual se incluyen normas técnicas, directrices específicas de diseño, relacionadas con la construcción y el mantenimiento de carreteras, así como otros datos igualmente valiosos. Estas herramientas y recursos ofrecidos por el INVIAS se suman para garantizar que los pavimentos asfálticos en Colombia cumplan con ciertos requisitos y los más altos estándares de seguridad, calidad y funcionalidad.

Historia del diseño de vías y pavimentos en AUSTRALIA.

Australia al ser de los países más desarrollados del continente oceánico, ha desarrollado técnicas ingenieriles y avances significativos en la infraestructura vial, innovando en el diseño de vías y nuevas técnicas de pavimento, impulsando a su vez un crecimiento económico, expandiendo la infraestructura vial, adoptando también tecnologías avanzadas y de las más eficaces del mundo. En los primeros tiempos, las carreteras de Australia eran en tierra y/o piedra, catalogadas en ese tiempo como vías rudimentarias, a mediados del siglo XIX, el país australiano implementó la construcción de redes férreas para transporte de carga y pasajeros, lo cual resultó beneficioso para este país, ya que se generó un crecimiento económico internacional.

A medida que Australia se iba industrializando y urbanizando se empezó la pavimentación masiva por las carreteras australianas, modernizando su infraestructura vial. La normativa avanzada de este país ha diseñado pavimentos asfálticos de calidad, durabilidad; a pesar de tener condiciones climáticas variadas, Australia ha diseñado pavimentos y métodos de construcción con calidad internacional.

Los avances tecnológicos y la constante investigación ha sido fundamental para el desarrollo ingenieril de este país, en los últimos años Australia se ha enfocado en la seguridad vial, implementando medidas para reducir los accidentes viales. También es importante mencionar que para Australia la conservación ambiental y la sostenibilidad es eje fundamental

Para poder diseñar pavimentos de calidad en Australia, La *"Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design"* constituye un componente esencial de información y directrices técnicas desarrolladas por Austroads, una entidad que regula la infraestructura vial en Australia y Nueva Zelanda. Este documento se dedica particularmente al diseño estructural de pavimentos y se posiciona como una valiosa fuente de conocimiento dirigida a ingenieros, diseñadores y otros

profesionales involucrados en la planificación y diseño de infraestructuras viales en la región de Australia.

AUSTROADS, es la organización principal encargada del tráfico y transporte por carretera de Australia y Nueva Zelanda; en sus publicaciones se evidencian directrices, metodologías, investigaciones, artículos, normas y demás documentación que sirve de soporte para la infraestructura vial de estos dos países; las operaciones de esta organización son administrativas, por consiguiente los trabajos de ingeniería y campo se subcontratan, como los que son destinados para poder producir las normas australianas para la planificación, diseño y construcción de carreteras.

Metodología de diseño de pavimentos en Colombia

Contenido manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito

- 1.) Aspectos generales
- 2.) Estimación del tránsito de diseño
- 3.) Factores ambientales y climáticos
- 4.) Caracterización de la resistencia de diseño de la subrasante
- 5.) Materiales viales
- 6.) Diseño estructural

Manual analizado: Manual de diseño de pavimentos asfálticos de medios y altos volúmenes de tránsito.

En la actualidad, el Instituto Nacional de Vías se encuentra trabajando activamente en la actualización de este manual, el cual desempeña un papel fundamental al proporcionar a Colombia herramientas que se adaptan a materiales específicos, condiciones climáticas

particulares y están alineadas con las Especificaciones Generales de Construcción de carreteras. Este manual se configura como una valiosa fuente para abordar problemáticas asociadas a los nuevos pavimentos flexibles o a la reconstrucción total de segmentos pavimentados.

Debido a la complejidad inherente a los componentes que influyen en el comportamiento del pavimento, se ha planeado este manual en diferentes capítulos, con el propósito de permitir una evaluación clara de cada una de estas variables mediante la recolección correspondiente de datos.

En los diversos capítulos de este documento, se detalla la metodología para llevar a cabo la recolección de datos, posibilitando la evaluación de variables específicas para cada categoría vial. Para el análisis del tránsito, se enfatiza en la base de datos de conteo vehicular permanente del Ministerio de Transporte de Colombia, complementada con información recopilada de operativos de pesajes en todo el territorio nacional.

En cuanto al estudio de las condiciones climáticas, se hace uso de la base de datos que proporciona el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). Esta entidad suministra información detallada sobre las características climáticas de Colombia. La robustez y actualización constante de este manual lo posicionan como una herramienta esencial en el diseño y la gestión eficiente de pavimentos en el contexto colombiano.

Año de publicación: 2015

Capítulos: 6

Softwares utilizados en Colombia: AASHTO 93-DEPAV

Metodología de diseño: Mecánico-Empírico

Parámetros de entrada: Clima, Tránsito, Subrasante, Materiales.

Periodo de diseño: Este dato se recopila con base en los datos del tránsito correspondiente que tendría la vía en el año inicial, en otras palabras, es función del Tránsito Promedio Diario.

Estimación del tránsito:

La consideración del flujo vehicular es un factor crucial en el análisis y diseño estructural de los pavimentos, ya que una estimación precisa de este parámetro posibilita evaluar si la estructura será capaz de mantener el nivel de rendimiento previsto a lo largo de su durabilidad diseñada.

La cuantificación de la estimación del tránsito se realiza mediante la utilización de espectros de cargas y tránsito equivalente, alineándose con las tendencias actuales en los denominados métodos de diseño de pavimentos flexibles. Es importante destacar que estos análisis de proyección de tránsito suelen proyectarse a periodos de diseño de 15 o 10 años.

En el análisis del tránsito, es imperativo tener en cuenta diversas variables, entre las cuales se incluyen: Tránsito promedio diario (TPD)

- Clasificación de los vehículos
- Configuración y cargas máximas legales de los vehículos comerciales
- Factores de equivalencia de carga para cada tipo de vehículo
- Distribución direccional
- Distribución carril
- Series históricas del tránsito
- Tendencia de crecimiento del tránsito
- Información de pesaje de vehículos comerciales.

Clasificación vehicular: 2,3,4(1), 4(2), 4(3), 2S-1, 2S-2, 2S-3, 3S-1, 3S-2, 3S-3, R2, 2R-2, 2R-3, 3R-2, 3R-3, 4R-2, 4R-3, 4R-4, 2B-1, 2B-2, 2B-3, 3B-1, 3B-2, 3B-3, B1, B2, B3

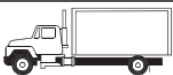
Designación	Configuración
2	
3	
4	
2S1	

Figura 1: Configuración vehicular 1

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Designación	Configuración
2S2	
2S3	
3S1	
3S2	
3S3	
R2	
2R2	
2R3	
3R2	
3R3	
4R2	

Figura 3: Configuración vehicular INVIAS

Designación	Configuración
4R4	
2B1	
2B2	
2B3	
3B1	
3B2	
3B3	
4B1	
4B2	
4B3	

Figura 2: Configuración vehicular INVIAS II

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Pesos brutos vehiculares máximos vigentes en Colombia

Vehículos	Designación	Máximo pbv, kg	Tolerancia positiva de medición , kg	
Camiones	2	17000	+	425
	3	28000	+	700
	4 (1)	31000	+	775
	4 (2)	36000	+	900
	4 (3)	32000	+	800
Tracto camión con semiremolque	2S1	27000	+	675
	2S2	32000	+	800
	2S3	40500	+	1013
	3S1	29000	+	725
	3S2	48000	+	1200
	3S3	52000	+	1300
Camiones con remolque	R2	16000	+	400
	2R2	31000	+	775
	2R3	47000	+	1175
	3R2	44000	+	1100
	3R3	48000	+	1200
	4R2	48000	+	1200
	4R3	48000	+	1200
Camiones con remolque balanceado	4R4	48000	+	1200
	2B1	25000	+	625
	2B2	32000	+	800
	2B3	32000	+	800
	3B1	33000	+	825
	3B2	40000	+	1000
	3B3	48000	+	1200
	B1	8000	+	200
	B2	15000	+	375
	B3	15000	+	375

Figura 4: Pesos brutos vehiculares máximos vigentes en Colombia

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Cargas máximas por tipo de eje

Configuración del sistema	Peso máximo por eje kg	Configuración
Sistema de eje sencillo		
Dos Ruedas	6000	
Cuatro ruedas	11000	
Sistema de eje tándem		
Cuatro ruedas	11000	
Seis ruedas	17000	
Ocho ruedas	22000	

Figura 5: Cargas máximas por tipo de eje 1

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

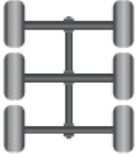
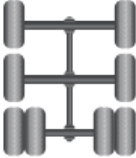
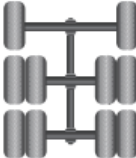
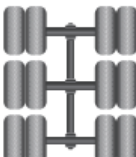
Configuración del sistema	Peso máximo por eje kg	Configuración
Sistema de eje trídém		
6 ruedas	16500	
8 ruedas	19000	
10 ruedas	21500	
12 ruedas	24000	

Figura 6: Cargas máximas por tipo de eje 2

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Métodos de conteo vehicular

Tener información sobre el volumen de tránsito vehicular del lugar del proyecto es importante porque esto garantiza la calidad y durabilidad de la estructura del pavimento para cierto lugar de la construcción; en Colombia se suelen utilizar los siguientes métodos de conteo:

- Conteos manuales
- Contadores mecánicos
- Weigh In Motion-WIM (Método de pesaje de vehpiculos en movimiento)

El Instituto Nacional de Vías-INVIAS, anualmente realiza conteos manuales en una semana de alto volumen de tránsito, en diferentes sectores del país, aproximadamente desde el año 1968; las concesiones en sus vías también suelen realizar conteos en el año, esto permite obtener información de las variaciones horarias, diaria, semanal, mensual y anual de tránsito dependiendo de los tramos concesionados que se tengan a cargo.

El Instituto Nacional de Vías-INVIAS, como resultado de los conteos vehiculares dispone la siguiente información en las correspondientes cartillas de volúmenes de tránsito anual:

- TDPS: Volumen de tránsito vehicular cuantificado en términos de tránsito promedio diario semanal.
- Distribución general del tránsito en autos, buses y camiones.
- Distribución Porcentual de los diferentes tipos de camiones.
- Desviación estándar del tránsito promedio diario semanal.
- Variación diaria y horaria del tránsito.

Resumen de composición vehicula obtenida de la Red Vial Nacional

Categoría	Rango TPDS		Composición (%)							Estaciones analizadas
			A	B	Camiones					
					C2P	C2G	C3-C4	C5	C6	
1	0 a 500	Promedio	58,2	8,1	13,2	13,2	5,9	0,8	0,6	9
		Rango	31-83	4-12	3-19	4-24	2-12	0-3	0-3	
2	500 a 1000	Promedio	67,1	8,1	10,2	9,9	2,9	0,5	1,3	33
		Rango	43-85	1-19	3-20	1-17	0-9	0-4	0-6	
3	1000 a 2500	Promedio	64,6	7,6	8,8	10,0	3,5	1,4	4,1	111
		Rango	33-92	0-18	2-17	0-20	0-14	0-13	0-16	
4	2500 a 5000	Promedio	60,5	8,8	9,0	9,3	3,4	2,3	6,7	123
		Rango	27-93	1-19	2-19	1-19	0-12	0-14	0-19	
5	5000 a 10000	Promedio	61,2	9,9	8,1	8,8	3,7	2,2	6,1	117
		Rango	20-90	0-18	2-17	2-18	0-11	0-7	0-17	
6	10000 a 20000	Promedio	64,2	10,9	7,2	7,6	3,0	2,0	5,1	61
		Rango	33-96	0-18	1-13	0-16	0-8	0-8	0-17	
7	> 20000	Promedio	69,9	10,6	6,2	6,4	2,7	1,5	2,7	25
		Rango	33-94	3-17	2-13	0-15	0-8	0-5	0-13	

Figura 7: Resumen de composición vehicular obtenida de la Red Vial Nacional

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Factor distribución direccional: Este factor corresponde a la distribución porcentual de los vehículos comerciales (Buses y Camiones) en cada sentido de circulación; usualmente en Colombia se tiende a asumir un 50% en cada sentido, pero en otros casos estos porcentajes varían dependiendo las condiciones del tránsito de la vía.

Factor distribución carril: Corresponde centralmente a aquella distribución de camiones entre los carriles que tengan el mismo sentido, el INVIAS recomienda los valores adoptados por la guía “*National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)*”, como se muestra a continuación:

Factor de distribución por carril según NCHRP

Número Total de carriles en cada sentido	Factor de distribución para el carril de diseño (Fca.)
1	1.00
2	0.90
3	0.60
4 o más	0.45

Figura 8: Factor de distribución por carril según NCHRP

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Cuantificación de la variable tránsito determinada con tránsito equivalente

La efectiva cuantificación de la variable tránsito los manejando términos de ejes equivalentes, se basa en la conversión de las correspondientes cargas que se transmiten por las configuraciones vehiculares pesada a una carga estándar de 8.2 Ton en el periodo y carril de diseño.

Factor de equivalencia de carga: Es aquel valor que expresa la relación entre la pérdida de servicio que causa cierta carga según un tipo de eje y la producida por el eje patrón de 8.2 Ton.

Existen tres métodos para determinar los factores de equivalencia de carga por eje, los cuales son: Método mecanicista, Método de cuarta potencia, Método AASHTO.

Factores ambientales y climáticos

Se requiere analizar la situación climática y ambiental del lugar, ya que las propiedades de la estructura del pavimento se ven afectadas por las fuerzas química y físicas de los materiales y

estos varían según el clima; a continuación, se mencionan los principales factores que afectan el pavimento.

- **Factores externos:** Precipitación, Temperatura, Profundidad del nivel freático.
- **Factores internos:** Permeabilidad de los estratos.
- **Variables ambientales:** Humedad y temperatura.
- **Variables climáticas:** Precipitación, Temperatura, Velocidad del viento, Brillo solar, Humedad relativa.
- **Consideraciones de los efectos del cambio de humedad sobre la estructura del pavimento:** Cálculo índice de Thornthwaite; Cálculo de la evapotranspiración (ETP)- Método de Thornthwaite

Los factores climáticos primordiales para la integridad de los pavimentos son, principalmente, la humedad y la temperatura. En cuanto a la humedad, se utiliza el índice de Thornthwaite (TMI) para un mes específico o para todo el año. Este valor se emplea en el cálculo de la succión matricial en cada capa no ligada, como la subrasante. La variación de la succión matricial, junto con la curva característica del suelo, permite determinar el cambio en la saturación de cada material. En la última etapa, se utiliza un modelo matemático para calcular el factor ambiental, considerándolo para cada mes y cada capa no ligada de la estructura del pavimento.

En cuanto a la temperatura, se basa en la información climática para calcular el valor promedio de la temperatura media anual. Luego, se analiza el perfil de temperatura en relación con la profundidad de la capa asfáltica, típicamente obteniendo la temperatura de la mezcla asfáltica a 1/3 de su espesor.

Clasificación según índice de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948)

TMI	Símbolo	Tipo Climático
>100	A	Excesivamente Húmedo
80 a 100	B4	Muy Húmedo
60 a 80	B3	Húmedo
40 a 60	B2	Moderadamente Húmedo
20 a 40	B1	Ligeramente Húmedo
0 a 20	C2	Subhúmedo- Húmedo
-20 a 0	C1	Subhúmedo- Seco
-40 a -20	D	Semiárido
< - 40	E	Árido

Figura 9: Clasificación según índice de Thornthwaite

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

División de Colombia según índice Thornthwaite

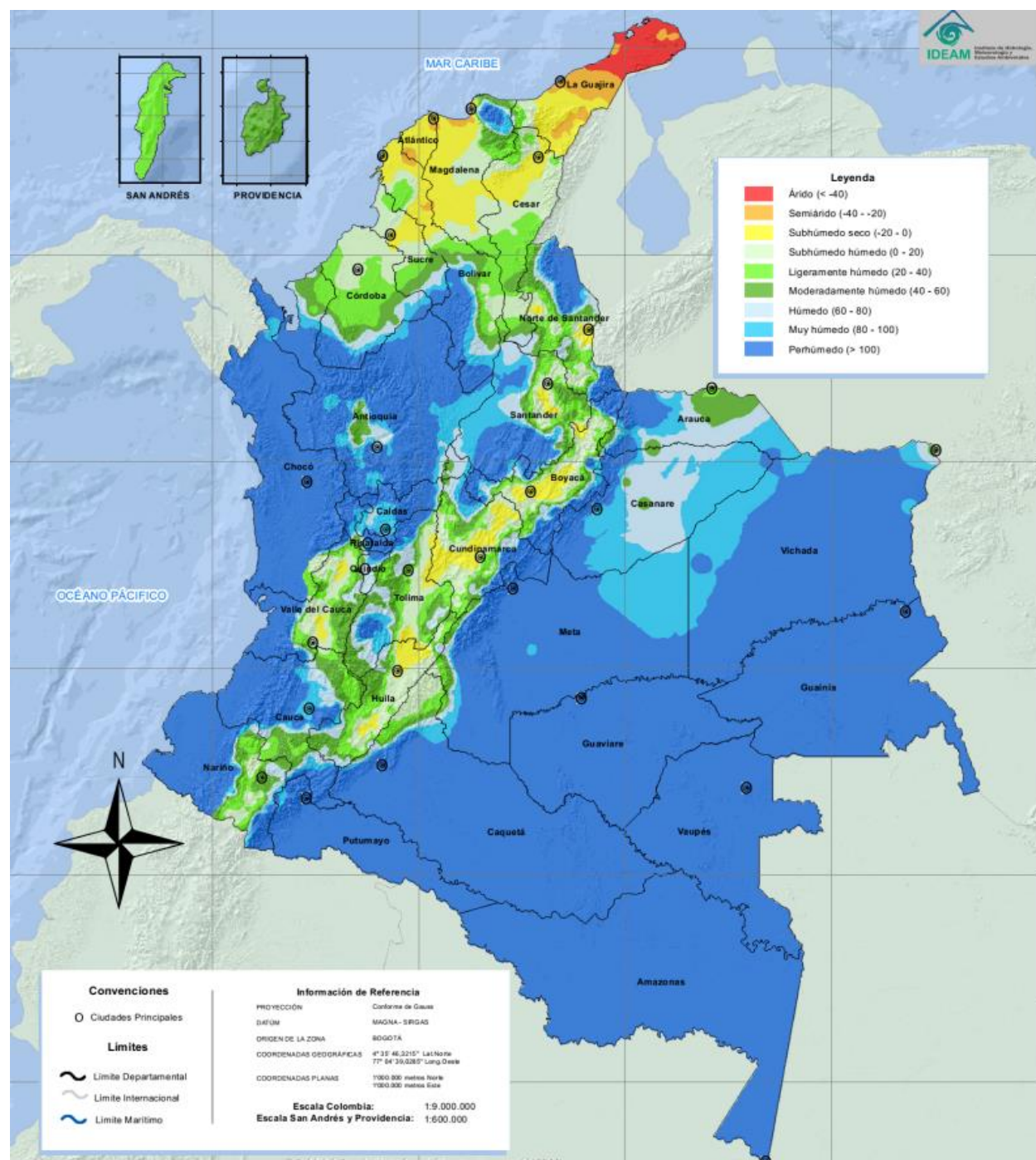


Figura 10: División de Colombia según índice Thornthwaite

Fuente: IDEAM (2023); tomado de: <https://www.ideam.gov.co/web/siac/catalogo-de-mapas>

Evaluación de la subrasante:

Realizar una evaluación precisa del suelo de fundación de una estructura de pavimento es crucial para asegurar su longevidad. Esta evaluación implica el análisis de la capacidad mecánica y la estabilidad volumétrica del suelo, especialmente en respuesta a las variaciones de humedad en un tramo determinado. Es importante señalar que cuando un suelo carece de las propiedades físicas y mecánicas necesarias para enfrentar adecuadamente las cargas de tránsito y los cambios en la humedad, se hace necesario recurrir a técnicas como la estabilización y/o mejora del suelo.

Mapas de suelos de Colombia:

En Colombia se identificaron aproximadamente 25 grupos de suelos, como se muestra a continuación:

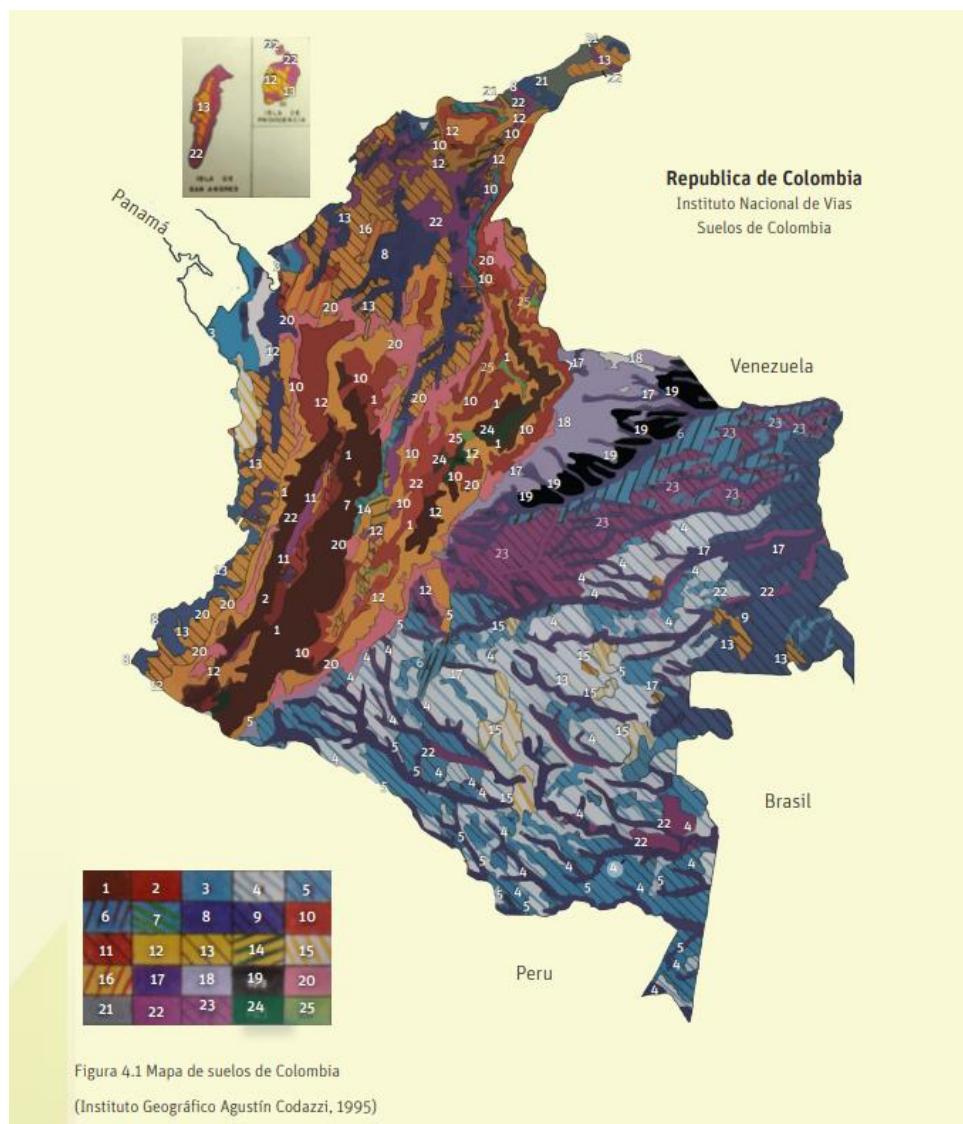


Figura 11: Mapas de suelos de Colombia

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2023); tomado de: <https://www.ideam.gov.co/web/siac/catalogo-de-mapas>

Caracterización de la subrasante para el diseño de pavimentos:

Se deben considerar las variaciones de las características de un suelo a lo largo de un trayecto, ya que las propiedades físico-mecánicas de estos suelen ir cambiando, por este motivo es necesario el diseño de los perfiles de suelos longitudinales; se deben identificar aquellas zonas que requieran un mejoramiento, para que se emplee como capa para la cimentación de la estructura del pavimento; principalmente los suelos problemáticos como suelos blandos y compresibles, suelos expansivos, suelos orgánicos, entre otros; estos suelos son los que se deben estabilizar y/o mejorar para no perjudicar la estructura del pavimento.

La exportación de la subrasante va a depender de la importancia o categoría de la vía, de su complejidad, zona climática, etc.; se debe analizar también si es una construcción nueva o si se trata de una reconstrucción, ya que su análisis puede variar.

1. **Estudio Preliminar:** Se hace una exploración general del terreno natural, mediante sondeos de muestreo inalterados, esto sirve para definir aquellos tramos con suelos homogéneos; este estudio es necesario en los proyectos ya existentes de vías de afirmado, en reconstrucciones y mejoras de estructuras de pavimentos y en nuevas vías.

Espaciamiento y profundidad mínima de sondeos:

Categoría del Transito	Espaciamiento longitudinal (m)	Profundidad a partir de la cota de subrasante (m)
NT2 (Entre 0.5 y 5 millones de ejes equivalentes N80KN en el carril de diseño)	250	1.5
NT3 (Mayor a 5 millones de ejes equivalentes N80KN en el carril de diseño)	200	1.5

Figura 12: Espaciamiento y profundidad mínima de sondeos

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Ensayos necesarios para el estudio preliminar de la subrasante:

Tipo de Estudio	Ensayo	Norma INV	Observaciones
Reconstrucciones de Pavimentos Pavimentación de vías afirmadas Tramos de carreteras nuevas con secciones geométricas en corte	Gravedad Específica	E-128 o 222 o 223	Ensayos si se trata de suelos Finos, el Pasa No. 200 para encontrar el IG utilizado por el sistema AASHTO de Clasificación.
	Humedad	E-122	
	Límite Líquido	E-125	
	Límite Plástico	E-126	
	CVP	E-120	
	%Pasa tamiz de 75µm (Tamiz No 200)	E-214	Cuando el suelo de subrasante sea grueso. PDC a partir de cota de subrasante y en suelos finos y granulares arenosos.
	Granulometría	E -213	
	PDC	E -172	
Selección de bancos de material para terraplén.	Límite Líquido	E-125	Estas pruebas son las mínimas requeridas para seleccionar una fuente para construir terraplenes. El estudio preliminar en este caso es prácticamente el definitivo.
	Límite Plástico	E-126	
	Contenido de materia orgánica	E- 121	
	Relaciones de humedad – Peso unitario seco en los suelos	E – 141 o E – 142	
	CBR de Laboratorio	E- 148	
	% Expansión en CBR	E- 148	
	Indicé de Colapso	E -157	
	Contenido de sales solubles	E -158	

Figura 13: Ensayos necesarios para el estudio preliminar de la subrasante

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

2. Definición de tramos homogéneos para la planeación de la exploración geotécnica

definitiva del suelo: Se necesita subdividir la vía en tramos homogéneos donde se permita asociar particularmente un módulo resiliente y/o una ecuación constitutiva del tramo con la confiabilidad deseada y exigida; estas particiones elaboran basándose en el perfil estratigráfico, perfil de resistencia, perfil de índice de consistencia y/o variación en la profundidad

3. Estudio definitivo: Su importancia se fundamenta en encontrar el comportamiento mecánico característico de determinado tramo, dependiendo su nivel de confianza; para proyectos de categoría NT3 se recomienda evaluar a través del ensayo de módulo resiliente con carga repetitiva; Para vías de categoría NT2, se infiere un módulo resiliente característico por tramo a partir de los resultados de los ensayos CBR.

4. Módulo resiliente de la subrasante:

El módulo resiliente es parte fundamental en el diseño de pavimentos, ya que este sirve de medida para analizar la capacidad de algún material de absorber y/o almacenar energía, sin que se presente deformaciones permanentes.

El manual proporcionado por el Instituto Nacional de Vías-INVIAS, menciona algunos casos para el estudio de la subrasante, como se muestra a continuación:

- Subrasante conformada por el suelo natural
- Subrasante conformada por el suelo natural mejorado mediante compactación o adición de cal y cemento.
- Remoción parcial del suelo natural para conformar una capa de subrasante con material de préstamo
- Suelo de subrasante correspondiente a la corona de terraplenes
- Mejoramientos más complejos, cuando el espesor del suelo natural inadecuado es importante y no se puede colocar suelo importado directamente sobre él.

A su vez se mencionan los suelos problemáticos categorizados en Colombia como lo son:

- Suelos expansivos
- Depósitos de suelos finos arcillosos muy blandos o depósitos de suelos orgánicos

- Suelos colapsables
- Cenizas volcánicas

Materiales viales:

Son tres los principales grupos de materiales que enfatiza el Instituto Nacional de Vías-INVIAS:

- ***Materiales asfálticos:*** Los cuales se subdividen en: Mezclas asfálticas elaboradas en planta y en caliente, Mezclas asfálticas recicladas en caliente, Mezclas recicladas en frío y procesadas en una planta o in situ, Mezclas asfálticas en frío elaboradas en planta.
- ***Materiales tratados con cal:*** Materiales estabilizados con cemento.
- ***Materiales granulares:*** Bases granulares y sub-bases granulares

Diseño estructural:

El propósito fundamental de este diseño estructural es identificar y plantear la combinación apropiada de los espesores de capas de materiales que puedan satisfacer los requisitos de las cargas de tráfico anticipadas durante un periodo de diseño. Además, se busca que dicha combinación pueda adaptarse y responder positivamente a las condiciones climáticas, preservando la integridad de la subrasante, proporcionando una superficie de rodadura adecuada y alcanzando el nivel de servicio deseado.

Desde 1960 hasta 2002, las pautas para el diseño de pavimentos se basaban en ecuaciones empíricas de rendimiento, derivadas de pruebas de carretera realizadas mediante el ensayo vial conocido como "AASHO". Posteriormente, a partir de 2002, se adoptó el diseño y estructuración de pavimentos flexibles y rígidos según las directrices de la AASHTO, utilizando la metodología mecánico-empírica. Esto condujo a una versión de diseño inicialmente denominada como el proyecto NCHRP 1-37, y del resultado de diversas investigaciones, surgió la Guía de Diseño

Mecánico-Empírico (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG), que publicó su primera versión en 2004.

En el contexto colombiano, para el dimensionamiento de pavimentos flexibles, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) publicó en 1998 el “*Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito*”, el cual ha experimentado actualizaciones constantes y se ha convertido en la base para el diseño de pavimentos en Colombia.

Los pasos del proceso de diseño de pavimentos flexibles se resumen en 3:

- 1.) *Indicar el nivel de importancia del proyecto:* Se debe categorizar el corredor vial de acuerdo a los niveles de importancia, este manual establece NT3 como importancia alta y NT2 como importancia media.
- 2.) *Determinar las diferentes variables de diseño relacionados con las condiciones del proyecto:* Se deben procesar los datos primarios de entrada para que se obtengan los valores de tránsito, las características de la subrasante, factores climáticos y ambientales, las propiedades de los materiales, e.t.c.
- 3.) *Seleccionar la estructura del catálogo de diseño:* Tomando como referencia las variables anteriores, se determina la correspondiente solución de diseño que se ajusten a las solicitudes pertinentes.

Parámetros de entrada requeridos:

Tránsito de diseño: Se cuantifica en términos de ejes equivalentes de 80kN, el proceso de cuantificación se resume a continuación:

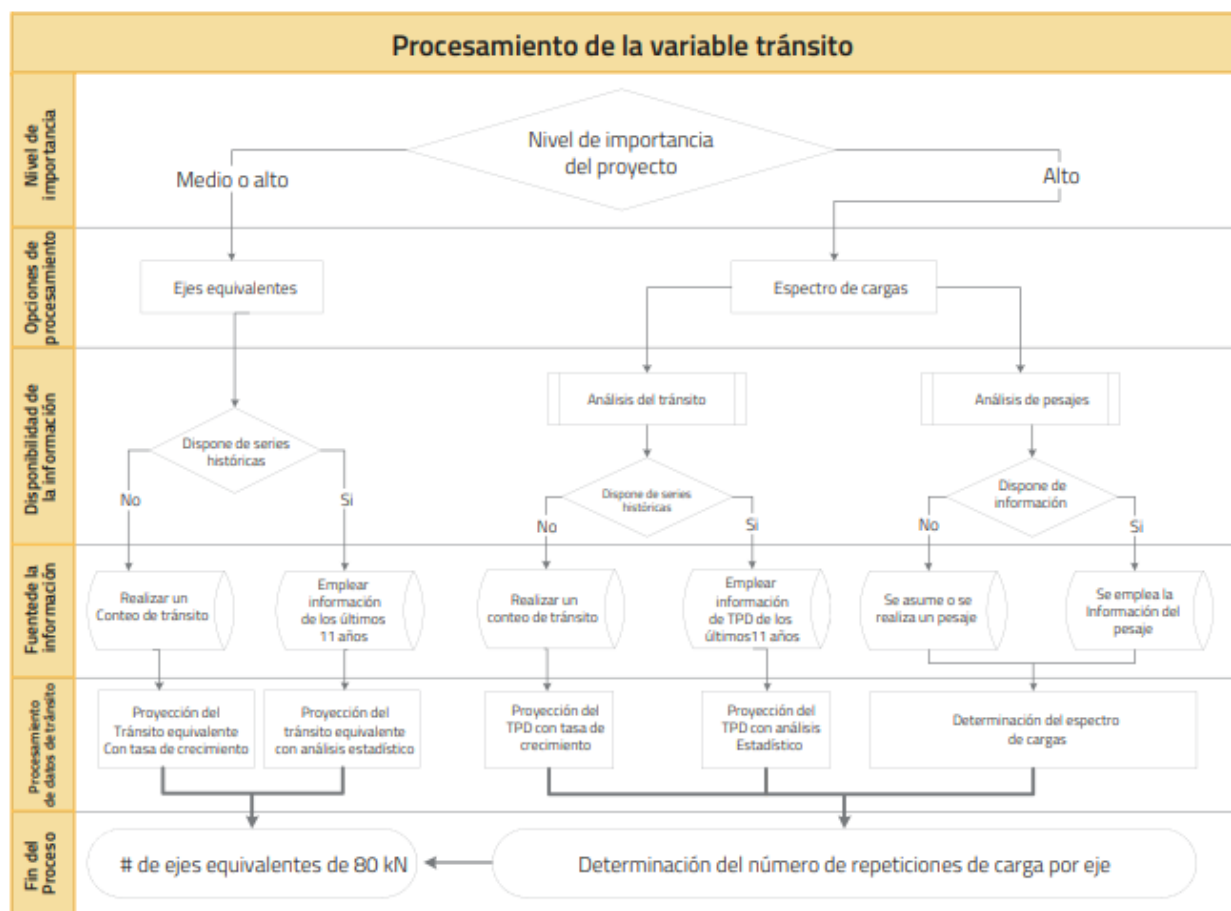


Figura 14: Procesamiento de la variable tránsito

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Factores ambientales y climáticos: Se requiere analizar la variable clima, ya que tiene incidencia directa con el comportamiento estructural del pavimento; inicialmente se analiza las temperaturas y precipitaciones, como se muestra a continuación:

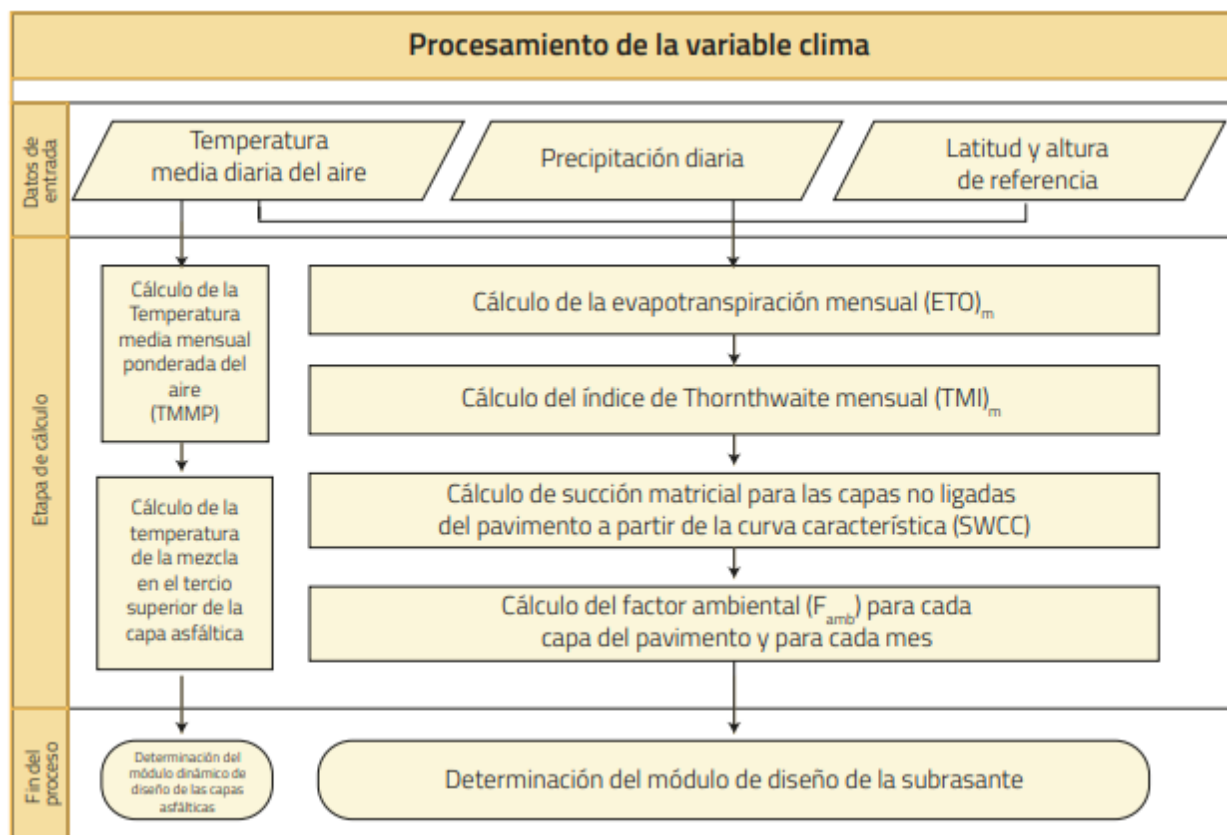


Figura 15: Procesamiento de la variable clima

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Materiales que componen la estructura del pavimento: Es necesario sensibilizar de manera adecuada las características físicas, mecánicas y dinámicas de los materiales empleados, el INVIAS a través de este manual tuvo en cuenta los siguientes aspectos de los materiales:

- Capas asfálticas
- Capas granulares estabilizadas con cemento
- Capas granulares estabilizadas con emulsión
- Capas granulares no ligadas (base y sub-base)

Módulo resiliente de la subrasante: El suelo empleado debe ser categorizado de manera óptima y correcta a partir del módulo resiliente, el cual se puede calcular a través de correlaciones o ensayos.

Metodología de diseño:

A continuación, se presenta la metodología de diseño del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con medios y altos volúmenes de tránsito.

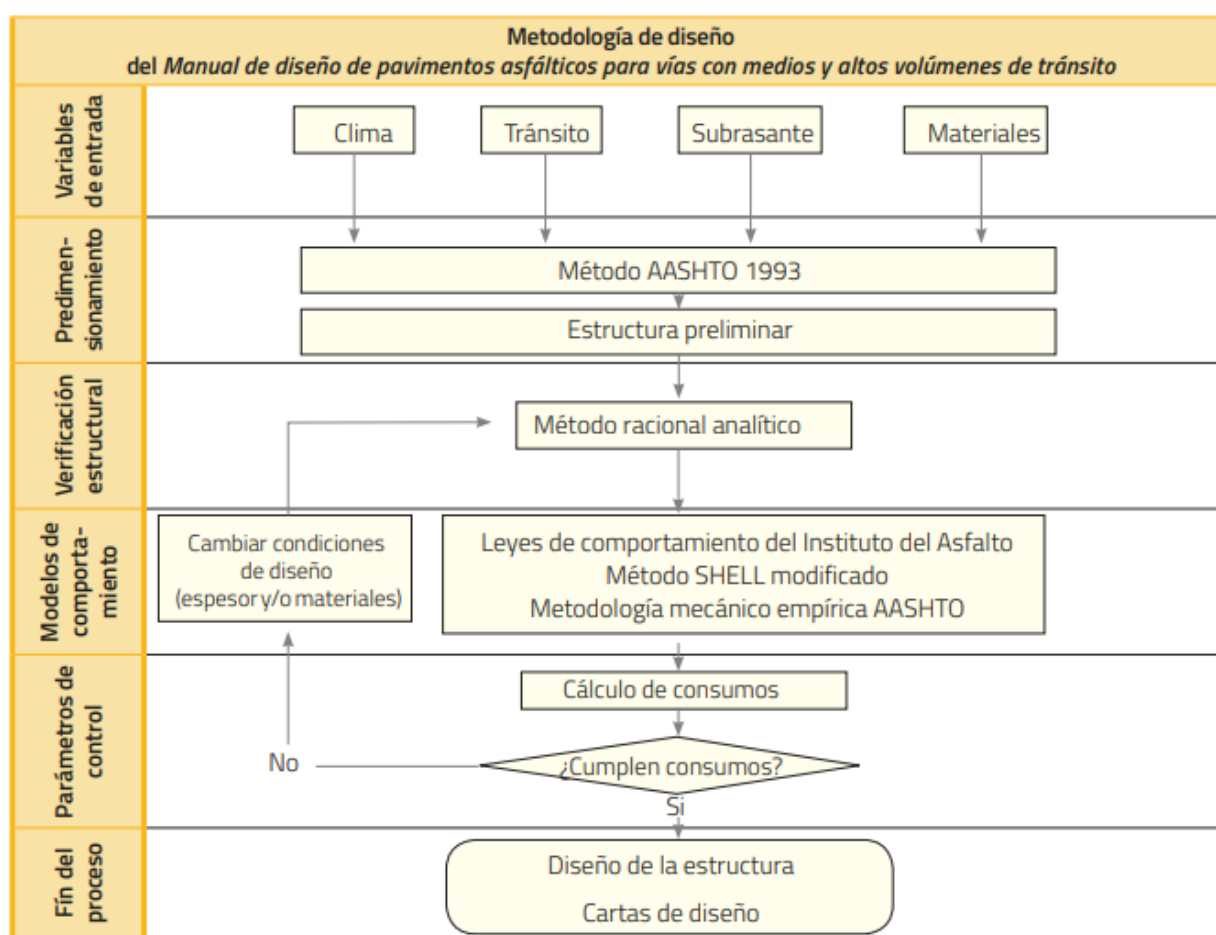


Figura 16: Metodología de diseño del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con medios y altos volúmenes de tránsito

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Se debe resaltar que el predimensionamiento de las estructuras se fundamenta en la metodología AASHTO 1993, la cual se requiere de un SN, que es el número estructural, este dato permite determinar los espesores de las diferentes capas de la estructura del pavimento.

Para realizar una efectiva aplicación de este método se requieren de las variables mencionadas a continuación:

- *Módulo resiliente de la subrasante*: Se obtiene a través de correlaciones o ensayos de laboratorio
- *Tránsito*: El método AASHTO cuantifica las variables en función de las cargas equivalentes acumuladas en un carril y dependiendo el periodo de diseño.
- *Serviciabilidad del pavimento*: Se evalúa a partir de la serviciabilidad inicial y final, la guía AASHTO 1993 recomienda algunos valores.
- *Confiabilidad estadística*: Para analizarla se requiere de la distribución normal estándar para un nivel de confiabilidad (Z) y el error estándar (S), se suelen utilizar valores de 90% y 0.45 correspondientemente.
- *Coeficientes estructurales de las capas*: Se debe asignar un coeficiente estructural al material de cada capa de la estructura del pavimento para poder transformar los números estructurales en espesores de las capas según corresponda, para los materiales granulares, la estimación de este dato va directamente relacionado con el ensayo del módulo resiliente y/o de algún parámetro de resistencia de la capa.
- *Coeficiente de drenaje*: La AASHTO 93 considera los efectos e importancia del drenaje, según la predicción del desempeño de la parte estructural del pavimento, este valor dependerá de la calidad del drenaje y la ubicación de la estructura, la guía propone algunos valores.

- *Número estructural*: En referencia a las variables de diseño mencionadas anteriormente, se determina el número estructural, para cada capa; se debe emplear la expresión del método AASHTO 1993.

$$\log_{10} W_{18} = Z_r * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_r - 8.07$$

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Siendo:

W18: número de ejes equivalentes de 18 kips u 80 KN.

Zr: variable que tiene distribución normal estándar para un nivel de confiabilidad dado.

So: error estándar combinado.

ΔPSI: pérdida del índice de serviciabilidad.

Mr: módulo resiliente de la capa a proteger, (psi).

SN: número estructural requerido

A continuación, se evidencia un diagrama de números estructurales requeridos:

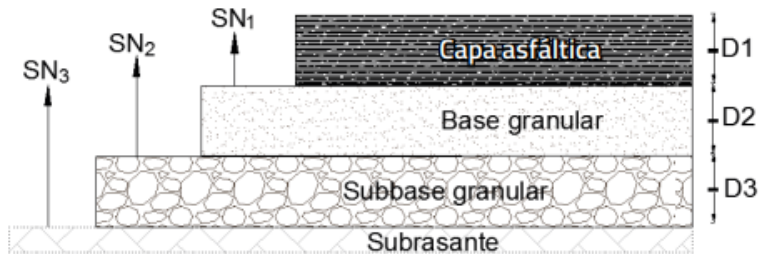


Figura 17: Diagrama de números estructurales requeridos

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Al determinar los correspondientes números estructurales de cada capa, se procede con la continuación del método de diseño, optando por el método de cada capa.

Ec. 6.2

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

Ec. 6.3

$$SN_1^* = a_1 D_1^* \geq SN_1$$

Ec. 6.4

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 m_2}$$

Ec. 6.5

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

Ec. 6.6

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

Figura 18: Ecuaciones diseño estructural

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Siendo:

SN_i: número estructural requerido para proteger la capa i.

SN_i *: número estructural suministrado para proteger la capa i.

D_i: espesor requerido de la capa i, (pg).

D_i *: espesor suministrado de la capa i, (pg).

a_i: coeficiente estructural de la capa i.

m_i: coeficiente de drenaje de la capa i.

Análisis estructural:

La evaluación estructural del pavimento requiere el uso de un software de análisis que utiliza internamente el modelo multicapa elástico. Este modelo permite determinar, en diversos puntos de la estructura del pavimento, la magnitud de los esfuerzos, desplazamientos y deformaciones provocados por las cargas aplicadas.

En un primer análisis, se hace necesario evaluar la deformación máxima a tracción en el fondo de la capa asfáltica, así como los esfuerzos y deformaciones debidos a la compresión vertical en el centro del espesor de las capas asfálticas. También se estudian los esfuerzos y deformaciones causados por la compresión vertical en la mitad del espesor de la base y sub-base granular, los esfuerzos de tracción máximos en el fondo de las capas estabilizadas, y los esfuerzos y deformaciones por compresión vertical en la superficie de la subrasante.

A continuación, se muestra las posiciones que se deben evaluar:

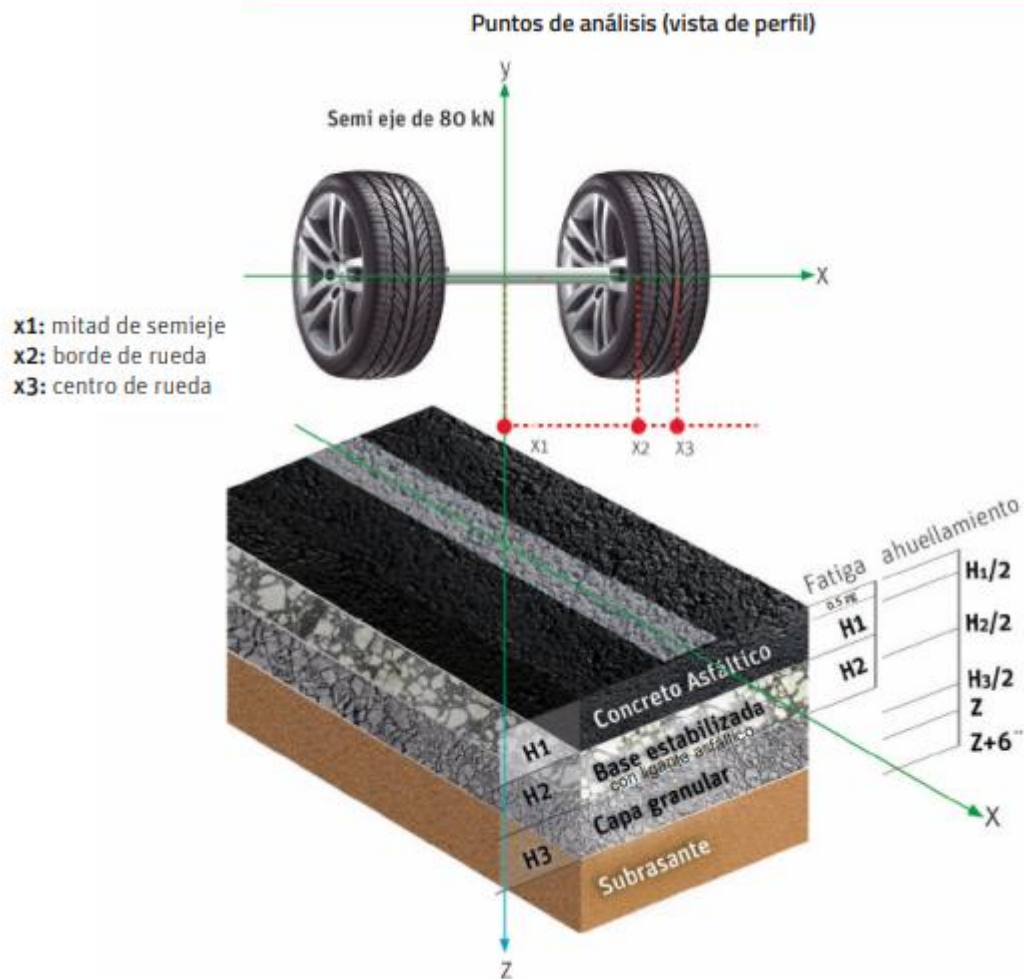


Figura 19: Puntos de análisis diseño de pavimentos

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2023)

Predicción del comportamiento:

Para el proceso de diseño se recomiendan los siguientes modelos de comportamiento:

- Nueva metodología mecánico-empírica de AASHTO
- Metodología del Instituto del Asfalto
- Metodología SHELL con modificación del método australiano.

Metodología de diseño de pavimentos en Australia

Contenido Guide to pavement technology part 2 of Austroads

- 1.) Introducción
- 2.) Diseño de sistema de pavimentos
- 3.) Construcción y consideraciones de mantenimiento
- 4.) Medio ambiental
- 5.) Evaluación de la subrasante
- 6.) Materiales de pavimento
- 7.) Diseño de tránsito
- 8.) Diseño de pavimentos flexibles
- 9.) Diseño de pavimentos rígidos
- 10.) Comparación económica de diseños
- 11.) Implementación de diseños y colección de comentarios
- 12.) Diseño de pavimentos poco transitados
- 13.) Referencias

Manual analizado: Guide to pavement technology part 2 of Austroads

Año de publicación: 2017

Capítulos: 12

Softwares utilizados en Australia: Pavement Design Software (PDS), PavCAD, WinPAS.

Metodología de diseño: Mecanicista empirista

Factores ambientales y climáticos: Es muy importante analizar el deterioro debido al medio ambiente, estos factores ambientales que afectan el desempeño del pavimento son la humedad y la temperatura; no se analiza el congelamiento ni el descongelamiento ya que en Australia casi nunca sucede estos cambios. Los factores que deben evaluarse en la humedad son: Evaporación, Reactividad de la subrasante, Permeabilidad, Profundidad del nivel freático, Permeabilidad capas del pavimento, Tipo de vegetación, diseño geométrico, drenaje del pavimento, escurrimiento.

Los cambios de humedad se deben a: Filtraciones, Fluctuaciones, Infiltraciones, cambio de permeabilidad, transferencia de humedad. Las principales variables que controlan el equilibrio del contenido de humedad son: Drenaje, Clima, Tipo de suelo, Profundidad nivel freático, Vegetación, composición del agua. La temperatura ambiente también es primordial analizarla ya que tiene relación directa con el comportamiento del pavimento; Para diseños de pavimentos, la temperatura del asfalto se puede caracterizar en términos de la temperatura media anual ponderada del pavimento (WMAPT). El WMAPT tiene en cuenta la relación entre la temperatura del asfalto y los efectos de la fatiga en pavimentos asfálticos gruesos. Se obtuvo utilizando un método publicado por Shell en 1978.

Tráfico de diseño:

Se debe seleccionar una determinada configuración de pavimento que sea apta y adecuada para la parte transitada de una vía, importante destacar que esta puede variar desde únicamente un carril, hasta seis o más carriles para el tráfico en una única dirección; en el caso de que la calzada tenga varios carriles se suele adaptar la misma configuración del pavimento para cada uno de estos carriles.

El procedimiento para estimar el tráfico de diseño es el siguiente:

1. Seleccionar un periodo de diseño.
2. Identificar el carril de mayor tránsito de la calzada (carril de diseño).
3. Estimar el número promedio diario de vehículos pesados en el carril de diseño durante el primero año del proyecto.
4. Estimar el crecimiento del tráfico pesado durante todo el período de diseño.
5. Estimar el número promedio de grupos de ejes por vehículo pesado.
6. Combinar las 3 estimaciones encontradas anteriormente para calcular los grupos de ejes acumulados de vehículos pesados, durante el periodo de diseño.
7. Estimar la proporción de tipos de grupos de ejes y la distribución de cargas de los grupos de ejes.
8. Expresar la carga de tráfico acumulada en una forma adecuada para el procedimiento de diseño del pavimento que se utilizará.

En caso de que el diseño del pavimento sea para una reconstrucción y/o realineación, se permite basar esta estimación de la carga de tráfico inicial en el ya existente; en caso de que el diseño sea nuevo se debe confiar en la medición y observación del tráfico en caminos aledaños que posean la misma naturaleza, junto con una estimación del tráfico adicional generado por la esperada creación del nuevo camino.

Procedimiento para determinar el tráfico de diseño:

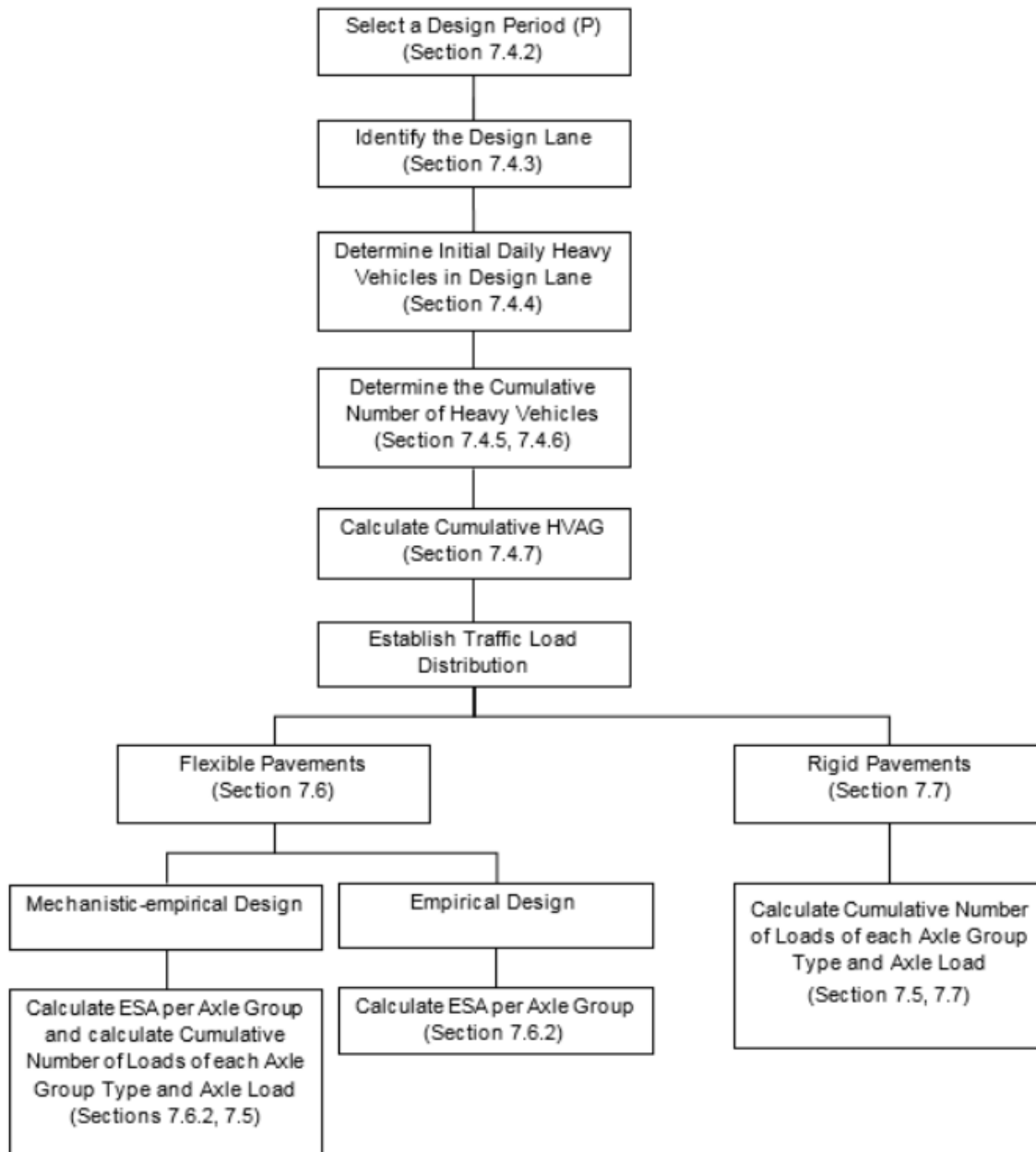


Figura 20: Determinación del tráfico de diseño

Fuente: Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design (2023)

Es importante mencionar que el requisito fundamental para el diseño de un pavimento es que este debe ser adecuado para la carga de tráfico acumulada prevista en el carril de diseño durante

el periodo de diseño seleccionado; la estimación de la carga requiere del cálculo del número acumulado de grupos de ejes equivalente de vehículos pesados (HVAG), durante ese periodo de diseño.

Para calcular el HVAG, se debe hacer como se menciona a continuación:

1. Selección del periodo de diseño.
2. Identificación del carril con mayor tránsito (Carril de diseño).
3. Estimación del número promedio diario de vehículos pesados, durante el primer año de vida útil.
4. Estimación de los vehículos pesados acumulados durante cierto periodo de diseño.
5. Estimación de los grupos de ejes acumulados de vehículos pesados, durante el periodo de diseño.

Periodo de diseño:

Es un parámetro necesario en todo el proceso de diseño del pavimento, para seleccionar un periodo de diseño apto se deben considerar los siguientes aspectos: Fondos disponibles para el proyecto, probabilidad de una realineación y/o mejor a largo plazo, existencia de subrasantes expansivas, consolidación de rellenos; entre otros factores.

La AUSTROADS menciona que los periodos típicos de diseño de pavimentos flexibles son de 20 a 40 años.

Carril de diseño:

Como se mencionaba anteriormente en caso de que se esté diseñando para una vía nueva, es común adoptar el mismo diseño de pavimentos para todos los carriles de la calzada y basar este diseño en la carga de tráfico en el carril que tenga mayor tránsito.

Para una carretera que contenga dos sentidos y dos carriles, ósea un carril en cada dirección, el carril de diseño se identifica de manera sencilla, ya que va a ser el que tenga más tráfico.

Para el caso de las calzadas multicarriles, en la gran mayoría de los casos, el carril de diseño tiende a ser el del costado izquierdo.

Para esta serie de calzadas, las estimaciones de carga de tráfico usualmente solo se permite disponibilidad para toda la calzada, así que por consiguiente no se tiene información sobre la carga de tránsito específica para cada uno de los carriles.

A su vez se debe mencionar que la distribución de la carga de tráfico entre carriles va a depender del número de carriles de tráfico, presencia de vehículos estacionados al costado izquierdo, existencia de rampas de entrada y salida, funciones secundarias y primarias de la vía, entre otros factores.

Factores recomendados para la distribución de carriles:

Ubicación	Carriles en cada dirección	Factor de distribución de carriles (LDF)		
		El carril izquierdo	Carril central	Carril derecho
Rural	2 carriles	1.00 ⁽¹⁾	N / A	0,50
	3 carriles	0,95	0,65	0,30
Urbano	2 carriles	1.00 ⁽¹⁾	N / A	0,50
	3 carriles	0,65	0,65	0,50

Figura 21: Factor de distribución carril

Fuente: Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design (2023)

Vehículos pesados diarios iniciales en el carril de diseño:

Para llevar a cabo el cálculo del HVAG acumulado en el carril de diseño, se requiere hacer una estimación del promedio durante el primer año de operación del número diario de vehículos pesados en el correspondiente carril de diseño.

Existen diferentes métodos para estimar el número diario inicial de vehículos pesados, los cuales se mencionan a continuación:

- Datos de la encuesta WIM que se recopilan específicamente para el proyecto o que se recolectaron para otros fines.
- Utilización de datos obtenidos de los contadores de clasificación vehicular.
- Uso de los datos obtenidos de contadores de ejes de un solo tubo o encuestas manuales de conteo vehicular.

Estimación de la distribución de la carga de tráfico (TLD)

El TLD es necesario calcularlo, ya que este proporcionar información que permite evaluar el daño del pavimento causado por el HVAG; los datos de la encuesta WIM se puede utilizar para hacer la estimación del TLD, en caso de que no se obtengan datos de WIM, se debe seleccionar aleatoriamente un valor de TLD.

Diseño del tráfico para pavimentos flexibles

Se proporcionan dos procedimientos de diseño de pavimentos flexibles:

- Diseño empírico aplicable a nuevos pavimentos flexibles consistentes en una fina capa bituminosa sobre material granular.

- Diseño mecanicista-empírico aplicable a nuevos pavimentos flexibles que contienen una o más capas de material ligado.

Para el caso del diseño de pavimentos granulares que contiene superficies finas bituminosas, únicamente se considera un tipo de daño; para el caso de pavimentos que contienen mas de una capa ligada se tienden a considerar hasta tres tipos:

- Daños por fatiga al asfalto.
- Perdida y roderas de forma de la superficie.
- Daños por fatiga del material cementado.

Es importante mencionar que el eje estándar se define como un único eje con neumáticos dobles (SADT), que aplica una carga de 80 kN al pavimento.

A continuación, se menciona las cargas en grupos de ejes con neumáticos dobles que causan el mismo daño que un eje estándar:

Tipo de grupo de ejes	Carga (kN)
Eje único con neumáticos dobles (SADT)	80
Eje tándem con neumáticos dobles (TADT)	135
Trieje con neumáticos dobles (TRDT)	182
Cuádruple eje con neumáticos dobles (QADT)	226

Figura 22: Grupos de ejes con neumáticos dobles

Fuente: Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design (2023)

Cargas en grupos de ejes con neumáticos simples que causan el mismo daño que un eje estándar:

Tipo de grupo de ejes	Ancho nominal de la sección del neumático	Carga (kN)
Eje único con neumáticos simples (SAST)	Menos de 375 milímetros	53
	Al menos 375 mm pero menos de 450 mm	58
	450 mm o más	71
Eje tandem con neumáticos simples (TAST)	Menos de 375 milímetros	89
	Al menos 375 mm pero menos de 450 mm	98
	450 mm o más	119
Trieje con ruedas simples (TRST)	Menos de 375 milímetros	121
	Al menos 375 mm pero menos de 450 mm	132
	450 mm o más	162
Cuádruple eje con neumáticos simples (QAST)	Menos de 375 milímetros	150
	Al menos 375 mm pero menos de 450 mm	164
	450 mm o más	201

Figura 23: Grupos de ejes con neumáticos simples

Fuente: Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design (2023)

Clasificación vehicular:

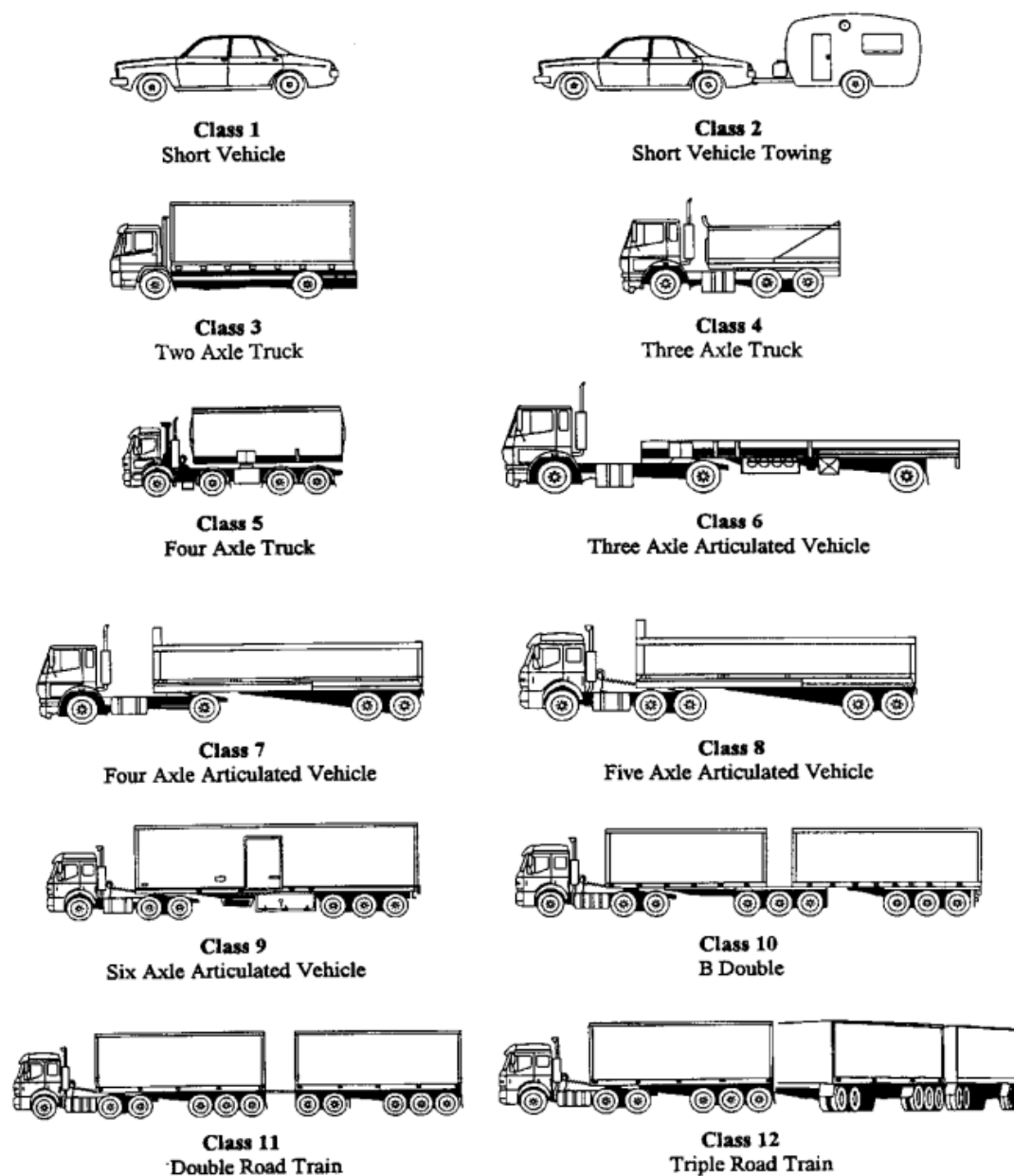


Figura 24: Configuración vehicular AUSTRROADS

Fuente: Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design (2023)

Evaluación de la subrasante

Para la evaluación de los parámetros son varios los factores a considerar los cuales son:

- Variabilidad de la subrasante
- Riesgos de desempeño
- Secuencia de construcción de movimiento de tierras
- Humedad óptima y densidad seca
- Cambios de humedad durante la vida útil
- Sección transversal del pavimento
- Drenaje superficial
- Nivel freático
- Identificación de capas débiles debajo de la subrasante

Existen diferentes métodos para determinar el valor del CBR de la subrasante, centralmente dos pruebas empleadas en Australia y en algunas partes del mundo (Las pruebas de campo y las pruebas de laboratorio)

Diseño de pavimentos flexibles-AUSTROADS

El procedimiento de diseño es de naturaleza mecanicista-empírica, pero también AUSTROADS proporciona un procedimiento específico de naturaleza empírica particularmente para el diseño de pavimentos granulares con revestimientos bituminosos finos.

El fundamento central de estos procedimientos es que los espesores de capa derivados de cualquier metodología mencionada anteriormente se deben considerar como requisitos mínimos y no se tiene en cuenta la tolerancia de construcción.

Procedimientos mecanicista-empírico

Este procedimiento es muy útil, ya que proporciona la capacidad de poder diseñar una gama amplia de tipos de pavimentos, para diferentes gamas de configuraciones y tipos de carga.

A continuación, se muestra el diagrama del flujo de procedimiento de diseño para pavimentos flexibles:

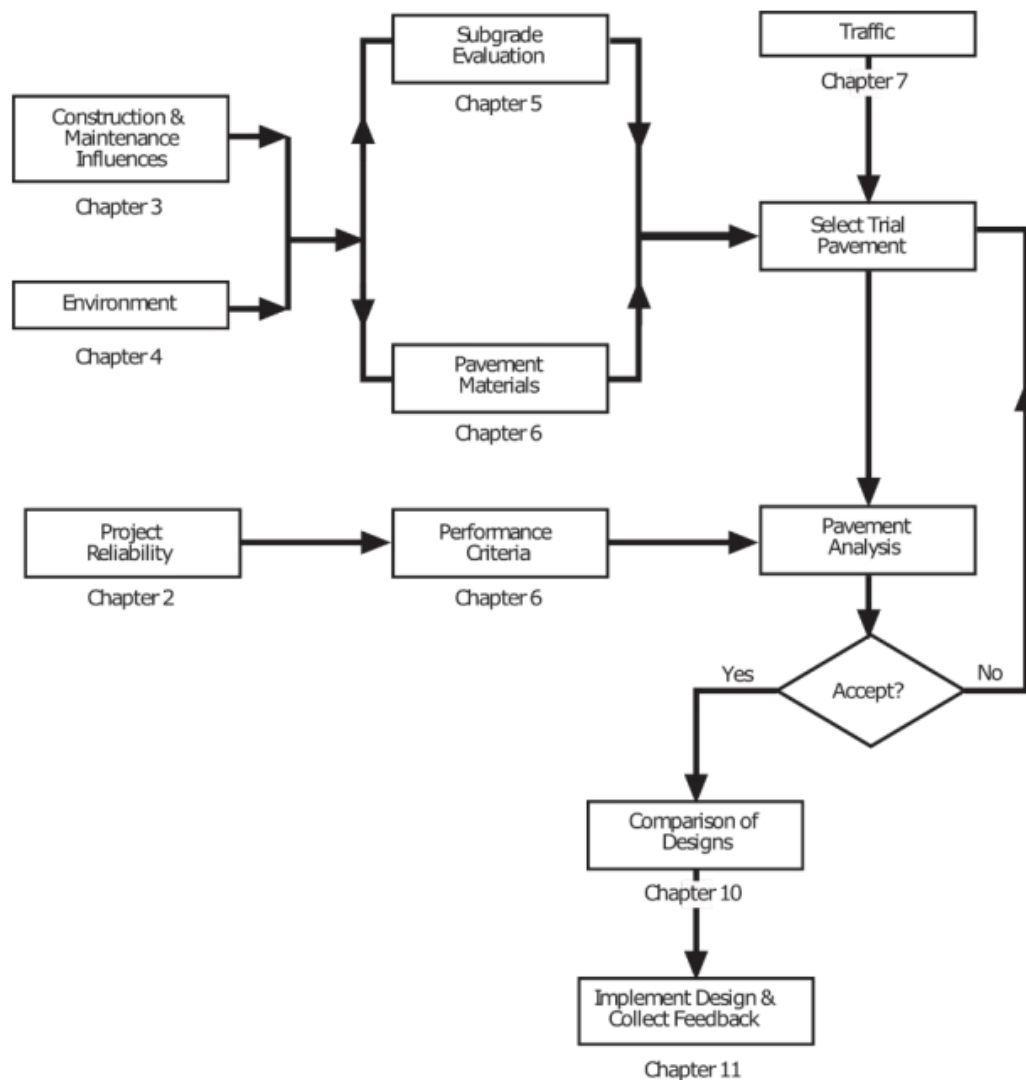


Figura 25: Procedimiento diseño de pavimentos AUSTROADS

Fuente: Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design (2023)

La tabla mostrada anteriormente indica que primeramente se deben evaluar los parámetros de entrada como tráfico, materiales, medio ambiente, entre otros; seguido a ello se selecciona un pavimento de prueba, después se analiza el pavimento de prueba para poder determinar el tráfico permitido; finalmente se compara y se acepta o rechaza el pavimento de prueba.

Se requieren de algunos parámetros para poder llevar a cabo el diseño de la estructura del pavimento, los cuales son:

- Confiabilidad deseada
- Influencias en las políticas de mantenimiento y construcción.
- Medio ambiente
- Subrasante
- Criterios de rendimiento
- Materiales
- Diseño de la carga de tráfico

Particularmente este diseño se basa en el análisis estructural de un pavimento multicapa que se somete a cargas normales de tráfico.

A continuación, se muestra las ubicaciones críticas de las deformaciones dentro de un modelo de pavimento.

Eje con neumáticos simples

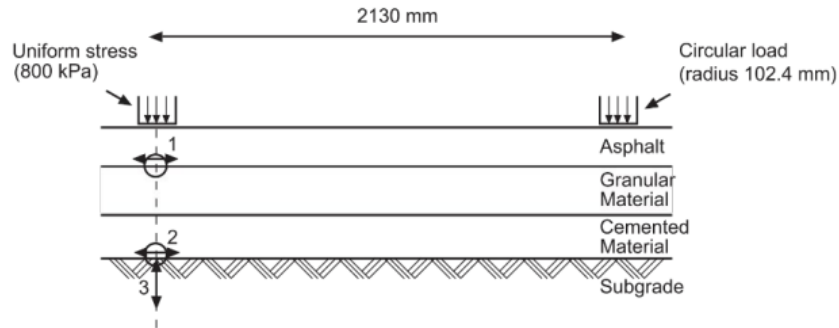


Figura 26: Eje con neumáticos simples

Fuente: Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design (2023)

Eje con neumáticos dobles

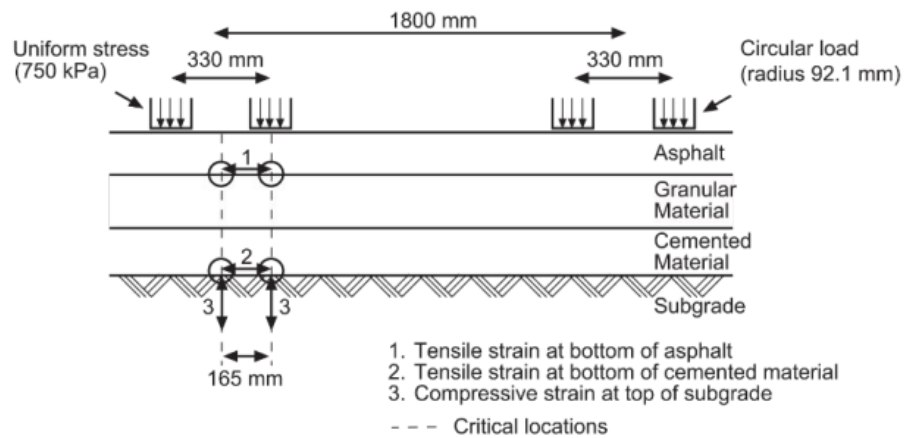


Figura 27: Eje con neumáticos dobles

Fuente: Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design (2023)

Requisitos de entrada

Procedimiento de diseño mecanicista-empírico: requisitos de entrada	
Paso	Actividad
1 →	Seleccione un pavimento de prueba y la confiabilidad del proyecto deseada.
2 →	Determine los siguientes parámetros elásticos para la subrasante in situ, la subrasante seleccionada y los materiales de subrasante estabilizados con cal:
3 →	Determine los parámetros elásticos (como arriba) de la subcapa superior de la capa granular (si es relevante).
4 →	Determine los parámetros elásticos y el espesor de las otras subcapas granulares (si corresponde).
5 →	Determinar los parámetros elásticos para materiales cementados y concreto magro, agrietamiento previo y posterior a la fatiga (si corresponde).
6 →	Determine los parámetros elásticos del asfalto (si corresponde).
7 →	Adoptar el criterio de deformación de la subrasante.
8 →	Determinar los criterios de fatiga para materiales cementados y hormigones de mezcla pobre (si corresponde).
9 →	Determinar los criterios de fatiga para el asfalto (si corresponde).
10 →	Seleccione el número acumulado de HVAG y la distribución de la carga de tráfico que componen el tráfico de diseño.
11 →	Determine el número de diseño de ESA.

Figura 28: Requisitos de entrada AUSTROADS

Fuente: Elaboración propia basado en AUSTROADS (2023)

Cálculo de deformaciones críticas

Procedimiento de diseño mecanicista-empírico: cálculo de deformaciones críticas.	
Paso	Actividad
12 →	Calcule la carga de los neumáticos del eje estándar como cuatro áreas circulares cargadas uniformemente con espacios de centro a centro de 330 mm, 1470 mm y 330 mm; Se aplica una carga vertical de 20 kN a cada área circular con una distribución de tensión vertical uniforme de 750 kPa. Radio de cada zona cargada, $R = 92,1$ mm para tráfico por carretera.
13 →	Determine las ubicaciones críticas en el pavimento para el cálculo de las deformaciones resultantes del Eje Estándar de la siguiente manera: • fondo de cada capa de asfalto, cemento y concreto magro, y • la parte superior de la subrasante in situ, la parte superior del material de subrasante seleccionado y la parte superior de la subrasante estabilizada con cal, en ejes verticales a través del centro de una carga de neumático interior y a través de un punto medio entre las dos cargas de neumático con una separación de centro a centro de 330 mm.
14 →	Ingrese los valores anteriores (Paso 13) en el modelo elástico lineal (por ejemplo, AustPADS, CIRCLY) y determine la deformación de compresión vertical máxima en la parte superior de la subrasante y la parte superior de los materiales de subrasante seleccionados y la deformación de tracción horizontal máxima en la parte inferior de cada capa de asfalto, material cementado y concreto magro. Si se considera la fase de fisuración posterior a la fatiga de los materiales cementados o la vida útil del concreto de mezcla pobre (Sección 8.2.6), es necesario calcular las deformaciones críticas para las fases de vida previa y posterior al fisuramiento.

Figura 29: Cálculo de deformaciones críticas AUSTROADS

Fuente: Elaboración propia basado en AUSTROADS (2023)

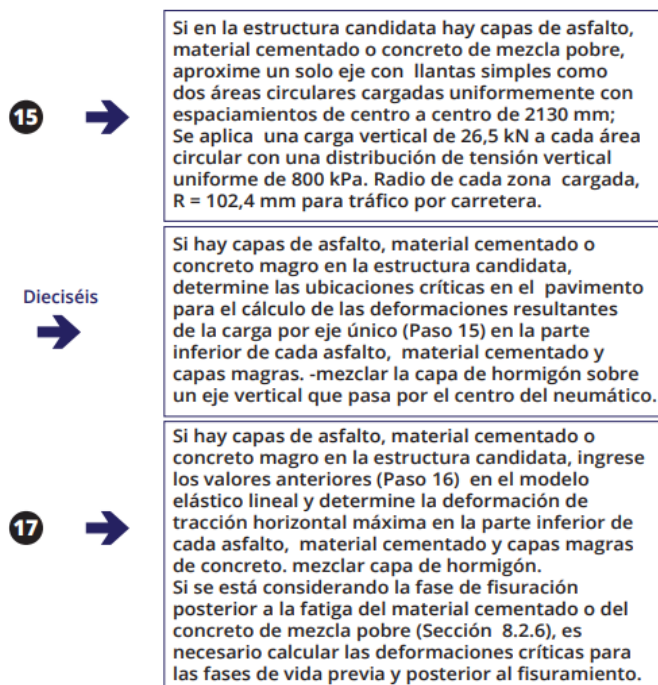


Figura 30: Calculo de deformaciones críticas II AUSTROADS

Fuente: Elaboración propia basado en AUSTROADS (2023)

Análisis e interpretación de resultados

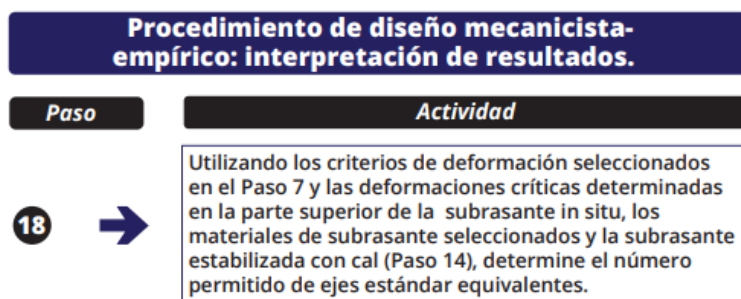


Figura 31: Analisis e interpretación de resultados I

Fuente: Elaboración propia basado en AUSTROADS (2023)

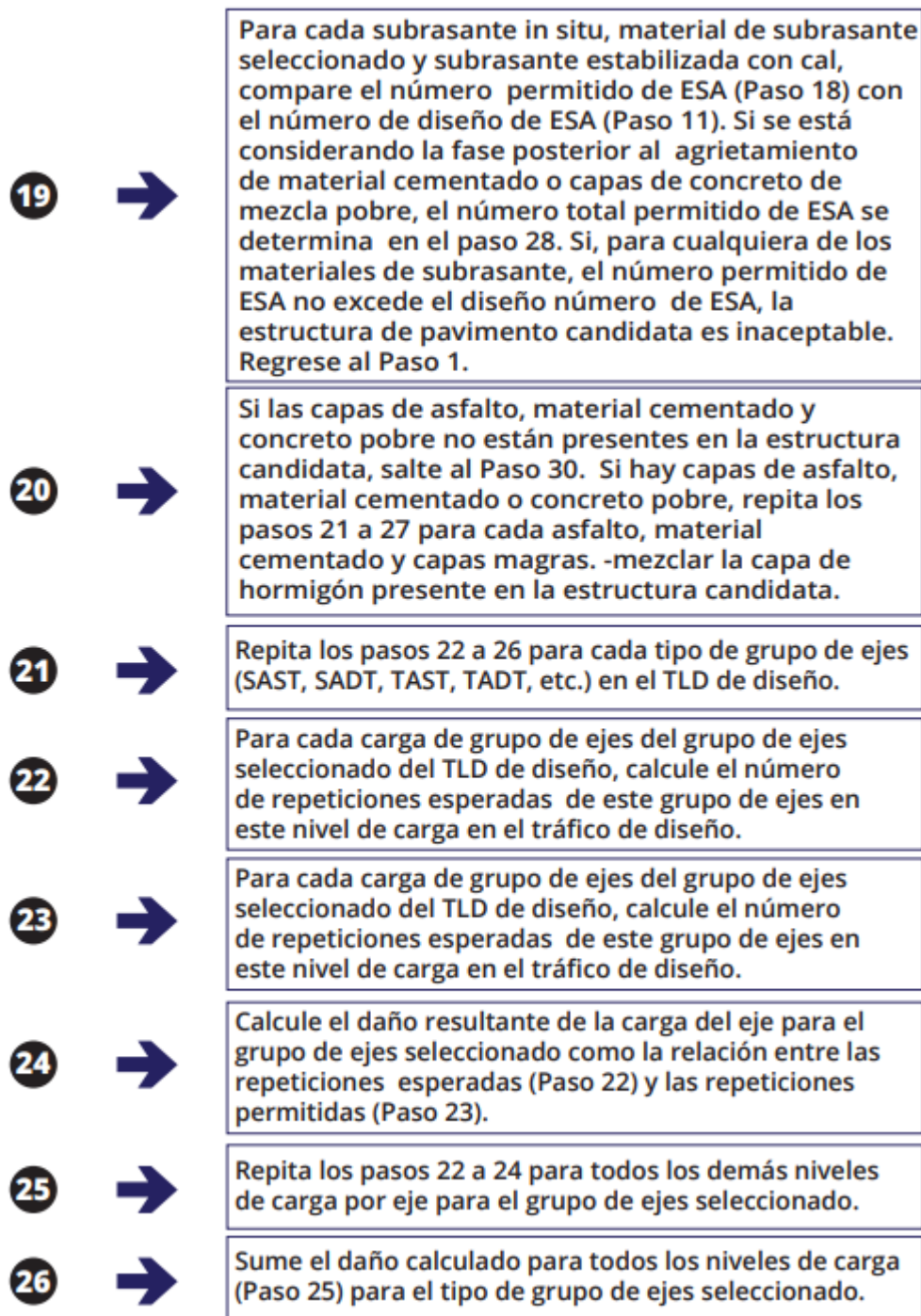


Figura 32: Análisis e interpretación de resultados II

Fuente: Elaboración propia basado en AUSTROADS (2023)

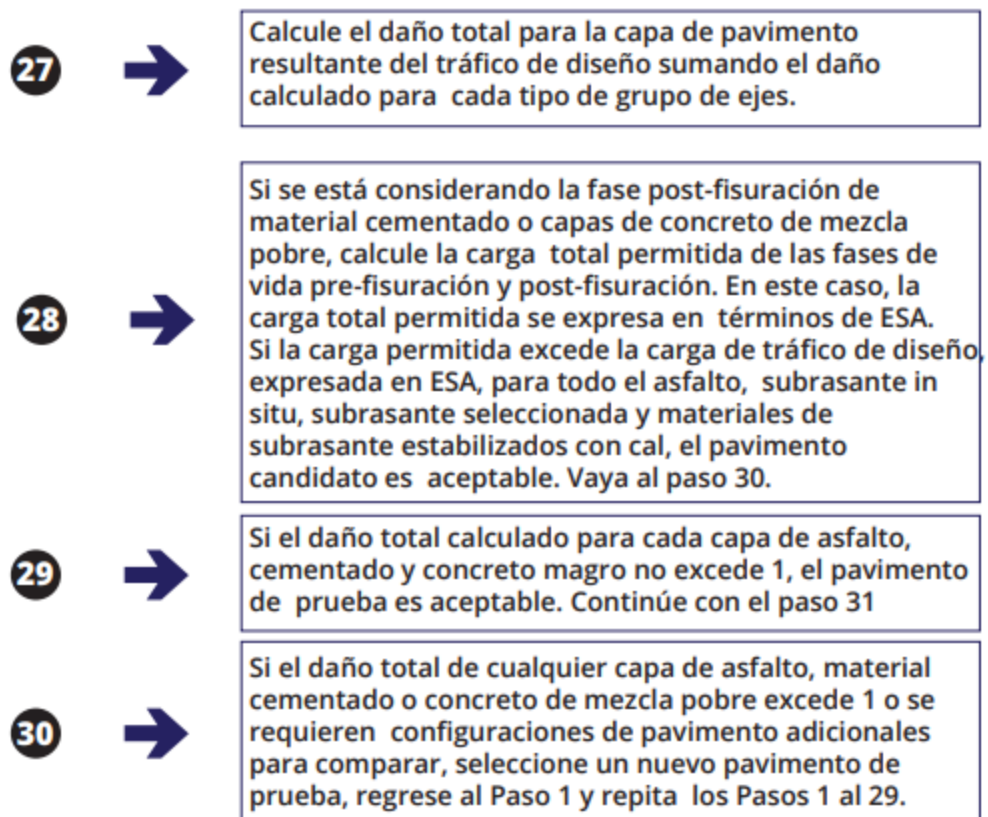


Figura 33: Análisis e interpretación de resultados III

Fuente: Elaboración propia basado en AUSTROADS (2023)

Análisis de diseños

Se ha evidenciado previamente, que tanto el enfoque mecanicista-empírico para el diseño de pavimentos flexibles propuesto por el INVIAS como el de la AUSTROADS se diseñan para vehículos con una carga de 80 kN (equivalente a 8.2 toneladas). Es relevante destacar que la guía de AUSTROADS ofrece dos enfoques para la metodología de diseño de pavimentos flexibles, la primera específicamente mecanicista-empírico y otro únicamente de naturaleza empírica destinado a pavimentos granulares con revestimientos bituminosos finos.

Adicionalmente, es importante mencionar que el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) no incorpora un análisis y evaluación económica en sus capítulos, a diferencia de la guía de AUSTROADS que proporciona este tipo de consideración. Del mismo modo, AUSTROADS aborda tanto el diseño de pavimentos rígidos como flexibles en una sola guía, mientras que el INVIAS presenta tres manuales para diseño de pavimentos, dos manuales enfocado en pavimentos flexibles y un único manual para diseño de pavimentos rígidos.

El *"Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito"* del INVIAS ofrece información específica para Colombia, mientras que la *"Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design"* de AUSTROADS brinda información base a dos países oceánicos, los cuales son Nueva Zelanda y Australia. Ambos documentos, sin embargo, se originan en la metodología de AASHTO y han experimentado actualizaciones a lo largo del tiempo, manteniendo coherencia con dicha metodología.

En el territorio colombiano, es común que los ingenieros diseñen pavimentos asfálticos con un periodo de 5 a 8 años, mientras que, en Australia y Nueva Zelanda, los pavimentos flexibles están diseñados para periodos superiores a 20 años. Aunque la inversión inicial en estos países puede ser más elevada, la durabilidad y efectividad resultan justificadas.

Al analizar ambas fuentes documentales, se evidencia variación en la clasificación y tipología vehicular desde una perspectiva técnica e ingenieril; ya que mientras el INVIAS clasifica sus vehículos alfanuméricamente, la AUSTROADS categoriza sus vehículos en clases numéricas las cuales inician en “*clase 1*”, para el vehículo más pequeño hasta la “*clase 12*” la categoría vehicular más grande.

Se observa que en ambos países los factores de humedad y temperatura son esenciales para el diseño de pavimentos; aunque su análisis se da a través de diferentes variables, su estudio es válido; ya que AUSTROADS tiene en cuenta la vegetación, escorrentía y reactividad de la subrasante; mientras que el manual del INVIAS enfatiza en precipitación, velocidad del viento, brillo solar, humedad relativa.

El análisis de distribución carril se realiza de forma distinta, ya que estos factores no son los mismos a nivel mundial; La AUSTROADS hace un análisis a nivel rural y otro a nivel urbano, dependiendo la ubicación del carril, ya sea central, lateral izquierdo o lateral derecho, y a su vez teniendo en consideración la cantidad de estos carriles; mientras que el INVIAS utiliza el factor direccional y el factor carril por aparte; el factor carril corresponde a la distribución de camiones entre los carriles con el mismo sentido y el factor distribución direccional, corresponde a la distribución de porcentajes de los vehículos comerciales en cada sentido de circulación

Por último, es importante mencionar que en ninguno de estos documentos se aborda la sostenibilidad, ni se suministra información relativa al diseño de pavimentos flexibles con una consideración adecuada de los aspectos ambientales, dejando un vacío ambiental e ingenieril en el diseño de pavimentos asfálticos.

Conclusiones

Finalmente, este trabajo muestra una variación en las configuraciones vehiculares entre Colombia y Australia. Se destaca la esencial influencia de los vehículos en el diseño de pavimentos, afectando aspectos como la resistencia del pavimento, su vida útil y la gestión del tráfico. El diseño de pavimentos debe adaptarse a las necesidades específicas de las cargas vehiculares para contribuir a la durabilidad y seguridad de las vías.

En relación con los documentos analizados, el *"Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito"* de INVIAS y la *"Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design"* de AUSTROADS, se concluye que carecen de información sobre sostenibilidad y materiales sustentables en sus capítulos. A pesar de los esfuerzos de ambos países por reducir el impacto ambiental, los manuales no especifican artículos que respalden el diseño de pavimentos asfálticos desde una perspectiva sostenible.

Es importante mencionar que la *"Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design"* de AUSTROADS aborda un análisis y comparación económica en su contenido, ofreciendo información valiosa sobre la viabilidad económica de los diseños de pavimentos. Mientras que, el *"Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito"* del INVIAS en Colombia no aborda este análisis económico.

De igual forma, ambas metodologías de diseño de pavimentos flexibles implementan un método mecanicista-empírico, combinando el enfoque mecanicista basado en la respuesta del pavimento bajo cargas a través de modelación matemática y el enfoque empírico que relaciona respuestas con desempeño, utilizando resultados experimentales y conocimiento profesional. Es crucial señalar que cada tipo de deterioro del pavimento se asocia con una respuesta crítica específica del mismo.

En conclusión, desde una perspectiva ingenieril, es crucial reconocer que la idoneidad de un pavimento no solo radica en su capacidad para soportar cargas y resistir desgastes, sino también en su capacidad para alinearse con consideraciones económicas y medioambientales. La integración de factores económicos implica evaluar la viabilidad financiera de las opciones de diseño, considerando tanto los costos iniciales como los costos de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del pavimento. Por otro lado, la inclusión de aspectos ambientales implica la selección de materiales y procesos que minimicen el impacto ambiental y fomenten prácticas sostenibles.

Recomendaciones

La sostenibilidad debería ser el eje fundamental en el diseño de pavimentos, ya que esto conlleva a una reducción de la contaminación ambiental, promueve la movilidad sostenible y obtiene beneficios económicos a corto y largo plazo; se debería considerar en la “*Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design*” de AUSTROADS, y en el “*Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías con medios y altos volúmenes de tránsito*” del INVIAS, información donde se especifique y se enfatice en sostenibilidad e implementación de nuevos materiales sostenibles, que garanticen una reducción de la contaminación ambiental y se asegure la calidad del pavimento.

Si bien es cierto que tanto Colombia como Australia, han impulsado políticas para reducir el impacto ambiental y promover diseños sostenibles, la falta de directrices de ambos países no ha conllevado a que en estos dos manuales haya artículos que respalden que el diseño de pavimentos flexibles se diseñe sustentablemente.

A su vez se recomienda que, para el diseño de pavimentos en Colombia, se implemente en su correspondiente manual, un análisis y evaluación económica, para analizar eficazmente la viabilidad económica del pavimento.

Finalmente, para futuras investigaciones se sugiere realizar un análisis a profundidad de los materiales empleados en el diseño de pavimentos tanto en Colombia como en Australia. Dada la importancia de este aspecto en la ingeniería vial, es importante indagar acerca de las particularidades geográficas, climáticas y de tráfico de cada región. Al profundizar en la composición y características técnicas de estos materiales, se podrá obtener una visión más completa de las prácticas y enfoques utilizados en ambos países.

Resulta esencial considerar factores como la durabilidad, resistencia al desgaste, comportamiento bajo cargas pesadas y adaptabilidad a las condiciones climáticas locales al evaluar los materiales de pavimentación. Un análisis detallado permitirá realizar comparaciones significativas entre las elecciones de materiales de diseño en Colombia y Australia, lo que contribuirá a extraer conclusiones sólidas y aplicables.

Este enfoque no solo enriquecerá el conocimiento existente en el campo del diseño de pavimentos, sino que también proporcionará una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos tanto en Colombia como en el mundo. Por lo tanto, se invita a los investigadores y lectores de este trabajo, a explorar en profundidad acerca de los materiales implementados en los diseños de pavimentos de Colombia y Australia en sus próximos estudios e investigaciones, con el propósito de enriquecer y complementar aún más la investigación realizada en este trabajo y avanzar en el diseño de pavimentos más eficientes y sostenibles en ambos países.

Referencias y/o bibliografía

- Gribble, M., Patrick, J. 2008. Adaptation of the AUSTROADS Pavement Design Guide for New Zealand conditions. Land Transport New Zealand Research Report 305.72pp.

Recuperado de:

<https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/305/docs/305.pdf>

- Sharp, K. G. (2009). Guide to Pavement Technology: Introduction to pavement technology.

Recuperado de: <https://AUSTROADS.com.au/publications/pavement/agpt01>

- AUSTROADS. (2016). Improved Design Procedures for Asphalt Pavements.

Recuperado de: <https://AUSTROADS.com.au/publications/pavement/ap-r511-16>

- Ainalem Nega. (2013). A Comparison between AUSTROADS Pavement Structural Design and AASHTO Design in Flexible Pavement.

Recuperado de:

https://www.academia.edu/37605733/A_Comparison_between_AUSTROADS_Pavement_Structural_Design_and_AASHTO_Design_in_Flexible_Pavement

- Predeanu D. (2018). Análisis comparativo de las metodologías de diseño de firmes flexibles de nueva construcción y rehabilitación de carreteras y estudio de su implementación en un sistema de gestión de pavimentos.

Recuperado de: https://oa.upm.es/52785/1/TFM_ELENA_DIANA_PREDEANU.pdf

- Ariza-Merchán, O, Castellanos-Villalobos, D y Velasco-Ariza, E. (2019). Evaluación de las metodologías de diseño de pavimentos flexibles para carreteras colombianas y brasileras.

Recuperado de: <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/fdae0f4d-81a2-4cb9-b604-d5824fa5e2e0>

- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 17(2), 41–65.

Recuperado de: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1074>

- Nieto, JM (2016). Comparación entre los métodos de diseño de pavimentos en Colombia, España e Italia.

Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/15930>.

- Garzón Garzón, C. (2020). Evaluación de metodología AASHTO y SHELL para el diseño de pavimento de la vía “Caracolí” que conecta a “La Carretera del Amor” en Villavicencio - Meta.

Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/30437>

- Guerrero Martínez, C. (2020). Trabajo de monografía, análisis y diseño del pavimento flexible por medio del método de la AASHTO-93.

Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/30367>