UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

## TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE PAVIMENTOS DE ASFALTO Y CONCRETO PARA LAS CARRETERAS DE CALLE MORA Y CALLE BRUJOS DEL CANTÓN DE PALMARES.", fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

**ING. CARLOS SOLÍS MOLINA**

**TUTOR**

**ING. DOMINGO ERNESTO DELGADO MARTÍNEZ, PH.D**

**LECTOR**

**ING. RONALD EUGENIO JIMENEZ CASTRO**

**REPRESENTANTE DE RECTORÍA**

**COMITÉ ASESOR**

**ING. CARLOS SOLÍS MOLINA**

**TUTOR**

**ING. DOMINGO ERNESTO DELGADO MARTÍNEZ, PH.D**

**LECTOR**

**ING. RONALD EUGENIO JIMENEZ CASTRO**

**REPRESENTANTE DE RECTORÍA**

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD LATINA

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR TUTOR DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Heredia, 18 de septiembre, de 2018

Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad (Proyecto de Graduación) bajo el título Análisis comparativo de un pavimento en asfalto y concreto para las carreteras de Calle Mora y Calle Brujos en el cantón de Palmares por parte del estudiante: Dayana Araya Madrigal, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

**Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.**

Suscribe cordialmente,

Ing. Carlos Solís Molina

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD LATINA

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR LECTOR DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Heredia, 18 de setiembre, de 2018

Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad (Proyecto de Graduación) bajo el título Análisis comparativo de un pavimento en asfalto y concreto para las carreteras de Calle Mora y Calle Brujos en el cantón de Palmares por parte del estudiante: Dayana Araya Madrigal, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

**Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.**

Suscribe cordialmente,

Ing. Domingo Ernesto Delgado Martínez

**Carta de filólogo**

25 de septiembre, 2018.

Señores
Universidad Latina de Costa Rica
Presente

Estimados señores:

El suscrito Edith Raissa Pizarro Alfaro con cédula de identidad número 4 0178 0133, profesional en Filología, hace constar que revisó el documento denominado "Análisis comparativo de pavimentos en asfalto y concreto para las carreteras Calle Brujos y Calle Mora del cantón de Palmares", de la estudiante **DAYANA ARAYA MADRIGAL**, al cual se le aplicaron las revisiones y observaciones relacionadas con aspectos de construcción gramatical, ortografía, redacción entre otros.

Dado lo anterior, certifico que el documento contiene las observaciones y correcciones solicitadas quedando de conformidad con lo pactado.

Atentamente,

**Edith Raissa Pizarro Alfaro**

**Código del Colegio 35554**

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

# "Carta Autorización del autor(es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación"

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016

***Instrucción:*** *Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.*

Yo (Nosotros):
*Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "*
**Araya Madrigal Dayana**

De la Carrera / Programa: Ingeniería Civil
autor (es) del (de la) *(Indique tipo de trabajo):* **Proyecto de Graduación**
titulado:
**Análisis comparativo de pavimentos en asfalto y concreto para las carreteras Calle Brujos y Calle Mora del cantón de Palmares**

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página web institucional, así como medios electrónicos en general, internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos dentro o fuera de la Red Laureate, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de esta.

La presente autorización se extiende el día *(Día, fecha)* 18 del mes septiembre del año 2018 a las 3:30 p.m . Asimismo declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: que soy el autor(a) del presente trabajo final de graduación, que el contenido de dicho trabajo es obra original del (la) suscrito(a) y de la veracidad de los datos incluidos en el documento. Eximo a la Universidad Latina; así como al Tutor y Lector que han revisado el presente, por las manifestaciones y/o apreciaciones personales incluidas en el mismo, de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores *Según orden de mención al inicio de ésta carta:*

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Licenciatura en Ingeniería Civil

Proyecto de Graduación

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN PAVIMENTOS EN ASFALTO Y CONCRETO PARA LAS CARRETERAS CALLE BRUJOS Y CALLE MORA DEL CANTÓN DE PALMARES

Autora: Dayana Araya Madrigal

Tutor: Ing. Carlos Solís Molina

Lector: Ing. Domingo Ernesto Delgado Martínez

**Heredia, 18 de septiembre del 2018**

Palmares, Alajuela

Índice

Dedicatoria .....8

Resumen .....9

Introducción .....11

Antecedentes ..... 12

Justificación..... 13

Planteamiento del problema..... 14

Objetivo general ..... 14

Objetivo específico ..... 14

Alcances y limitaciones ..... 15

Impacto ..... 15

Capítulo I. Marco teórico .....16

1.1. Marco teórico - conceptual..... 16

1.1.1. Definición de un pavimento..... 16

1.1.2. Curva de deterioro de un pavimento ..... 17

1.1.3. Tipos de falla en pavimento ..... 18

1.1.4. Tipos de pavimentos ..... 18

1.1.4.1. Pavimentos asfálticos o flexibles ..... 18

1.1.4.1.1. Elementos que componen el pavimento flexible ..... 19

1.1.4.1.2. Tipos de falla en los pavimentos flexibles ..... 20

1.1.4.2. Pavimentos rígidos ..... 21

1.1.4.2.1. Elementos que componen un pavimento rígido ..... 23

1.1.4.2.2. Tipos de pavimentos rígidos ..... 24

1.1.4.2.3. Tipos de falla en los pavimentos rígidos ..... 24

1.1.4.3. Pavimentos semi rígido ..... 25

1.2. Criterios de diseño ..... 26

1.2.1. Tránsito ..... 26

1.2.2. Cálculo de ejes equivalentes ..... 26

1.2.3. Límites de peso por eje ..... 27

1.2.4. Volumen de tránsito ..... 28

1.2.5. Índice de Serviciabilidad ..... 28

1.2.6. Ley de la cuarta potencia ..... 29

1.2.7. Eje equivalente ..... 30

1.2.7.1. Variables que componen la fórmula anterior ..... 30

1.2.8. Subrasante ..... 34

1.2.9. Clasificación de suelos ..... 35

1.2.10. Ensayos de suelos ..... 36

1.2.11. Drenaje ..... 40

1.3. Fatiga en la mezcla asfáltica método de LANAME. ..... 42

1.4. Deformación permanente por el método de LANAMME ..... 44

1.5. Fatiga en la mezcla asfáltica por el método del MOPT ..... 48

1.6. Deformación permanente por el método del MOPT ..... 49

Capítulo II Marco Situacional .....50

2. Marco Situacional ..... 50

2.1. Municipalidad de Palmares ..... 50

2.1.1. Historia de la Municipalidad de Palmares ..... 50

2.1.2. Misión ..... 51

2.1.3. Visión ..... 51

2.2. Cantón de Palmares ..... 51

2.2.1. Limitación de Palmares ..... 51

2.2.2. Área y Población ..... 52

2.2.3. Geología, Geomorfología y suelos ..... 52

2.2.4. División Política ..... 52

2.2.5. Población de Palmares ..... 53

Capítulo III Marco metodológico .....48

3.1. Método de investigación ..... 48

3.2. Operacionalización de variables ..... 48

3.3. Población y muestra ..... 48

3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos ..... 48

3.4.1. Diseño de pavimentos flexible ..... 48

3.4.2. Diseño de pavimentos rígidos:..... 55

4. Cronograma .....64

Capítulo IV. Análisis de resultados .....65

4.1.1. Datos que se utilizan para los diseños de pavimento flexible de ambas calles. ..... 66

4.1.1.1. Análisis de diseño del pavimento flexible calle mora..... 68

4.1.1.1.1. Fatiga en mezcla asfáltica y deformaciones en cada capa de calle Mora..... 73

4.1.2. Análisis de diseño del pavimento flexible de calle brujos ..... 77

4.1.2.1. Fatiga en la mezcla asfáltica y deformación en cada una de las capas de calle brujos..... 82

4.1.3. Análisis de diseño del pavimento rígido. ..... 87

4.2. Presupuesto de los pavimentos ..... 90

4.3. Especificaciones técnicas ..... 96

4.3.1. Especificaciones técnicas de la mezcla asfáltica ..... 96

4.3.2. Especificaciones técnicas de la base..... 98

4.3.3. Especificaciones técnicas de la subbase ..... 99

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones .....100

5.1. Conclusiones ..... 100

5.2. Recomendaciones ..... 101

VI. Bibliografía .....102

VII. ANEXOS .....106

Lista de figuras

Figura 1. Curva de deterior de un pavimento ..... 17

Figura 2. Mecanismo de disipación de tensiones de pavimento flexible. ..... 19

Figura 3. Deterioro de los pavimentos. ..... 21

Figura 4. Mecanismo de disipación de tensiones de pavimento rígido. ..... 22

Figura 5. Diferentes tipos de fallas de pavimentos rígidos ..... 25

Figura 6. Mecanismo de disipación de tensiones de pavimento semi-rígido ..... 26

Figura 7. Mapa del cantón de Palmares. ..... 53

Figura 8. Mapa de calle brujos del cantón de Palmares. ..... 54

Figura 9. Mapa de calle la feria del cantón de Palmares. ..... 55

Figura 10. Periodo de diseño. ..... 50

Figura 11. Correlación entre el valor de soporte del suelo (S) y el CBR ..... 51

Figura 12. Nomograma para la determinación del número estructural. ..... 52

Figura 13. Módulo de elasticidad. ..... 53

Figura 14. Coeficiente estructural a2 para la capa de base. ..... 54

Figura 15. Coeficiente estructural a3 para la capa de subbase..... 54

Figura 16. Nomograma AASHTO 1993 para diseño de pavimentos rígidos ..... 56

Figura 17. Nomograma AASHTO 1993 para diseño de pavimentos rígidos. ..... 57

Figura 18. Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita ..... 62

Figura 19. Nomograma para corregir el valor de K por la presencia de una capa rígida (estrato de roca a menos de 3 metro)..... 62

Figura 20. Valores del factor de perdida de soporte Ls ..... 63

Figura 21. Ubicación Calle Brujos. ..... 66

Figura 22. Ubicación Calle Mora. ..... 66

Figura 23. Grafica de daño relativo de calle mora. ..... 74

Figura 24. Porcentaje de agrietamiento MAC de calle mora. ..... 75

Figura 25. Gráfico de daño acumulado de la mac de calle Brujos..... 84

Figura 26.Porcentaje de agrietamiento mac de calle Brujos. ..... 85

Figura 27. Cálculo de k..... 88

Figura 28. Nomograma..... 89

Figura 29. Nomograma..... 90

Figura 30. Valores números estructurales (SN)..... 107

Figura 31. Valor $a1$, para mezcla asfáltica. ..... 108

Figura 32. Valor $a2$, base. ..... 109

Figura 33. Valor $a3$, subbase. ..... 110

Figura 34. Cálculo de número de estructuras. ..... 110

Lista de tablas

Tabla 1. Beneficios de un pavimento rígido ..... 22

Tabla 2. Límites de peso por eje ..... 27

Tabla 3. Tipos de ejes y número de llantas ..... 27

Tabla 4. Factor camión ..... 30

Tabla 5. Periodo de diseño en función del tiempo en carretera ..... 31

Tabla 6. Periodo de diseño en función de tiempo en carretera ..... 32

Tabla 7. Factores de crecimiento de tránsito ..... 33

Tabla 8. Factores de distribución por dirección ..... 33

Tabla 9. Factores de distribución por carril ..... 34

Tabla 10. Datos calculados conforme con la fórmula Uf ..... 39

Tabla 11. Tiempos de drenaje para capas granulares ..... 40

Tabla 12. Coeficiente de drenaje para pavimentos flexibles mx ..... 41

Tabla 13. Coeficiente de drenaje para pavimentos rígidos Cd ..... 41

Tabla 14. Umbrales de falla para porcentaje de área agrietada. ..... 42

Tabla 15. Umbrales de falla para deformación permanente. ..... 44

Tabla 16. Umbrales de falla por deformación permanente. ..... 48

Tabla 17. Población por distrito ..... 53

Tabla 18. Población total de hombres y mujeres que viven en el cantón. ..... 54

Tabla 19. Nivel de confianza (R). ..... 50

Tabla 20. Niveles de confianza R en función del tipo de carretera. ..... 58

Tabla 21. Valores de coeficiente de drenaje Cd ..... 58

Tabla 22. Coeficiente de transmisión de carga. ..... 60

Tabla 23. Módulo de elasticidad del concreto. ..... 60

Tabla 24. Valores de diseño para calcular ESAL. ..... 67

Tabla 25. Datos para calcular el SN. ..... 67

Tabla 26. Tránsito promedio diario de Calle Mora. ..... 68

Tabla 27. Tránsito promedio diario de Calle Mora. ..... 68

Tabla 28. Tránsito promedio diario de Calle Mora. ..... 69

Tabla 29. Valores para calcular ESAL. ..... 69

Tabla 30. Cálculo de ESAL. ..... 70

Tabla 31. Módulo de resiliencia de la subrasante. ..... 70

Tabla 32. Datos para calcular el número estructural (SN). ..... 71

Tabla 33. Guía para diseño de estructuras de pavimento. ..... 72

Tabla 34. Datos obtenidos del programa pitra pave. ..... 73

Tabla 35. Cálculos de fatiga. ..... 73

Tabla 36. Porcentaje de fatiga. ..... 74

Tabla 37. Datos para calcular la deformación de la MAC de calle Mora. ..... 75

Tabla 38. Deformación permanente de la base y subbase de calle Mora. ..... 76

Tabla 39. Tránsito promedio diario calle Brujos. ..... 77

Tabla 40. Tránsito promedio diario calle Brujos. ..... 78

Tabla 41. Tránsito promedio diario calle Brujos. ..... 78

Tabla 42. Datos para obtener ESAL. ..... 78

Tabla 43. Cálculo de ESAL. ..... 79

Tabla 44. Módulo de la subrasante calle brujos. ..... 80

Tabla 45. Datos para calcular el número estructural (SN). ..... 81

Tabla 46. Guía para diseño de estructuras de pavimento. ..... 82

Tabla 47. Datos obtenidos del programa pitra pave. ..... 82

Tabla 48. Datos para calcular fatiga calle Brujos. ..... 83

Tabla 49. Porcentaje de fatiga calle Brujos. ..... 84

Tabla 50.Datos para calcular la deformación de la mac de calle Brujos. ..... 85

Tabla 51. Deformación permanente de la base y subbase de calle brujos. ..... 86

Tabla 52. Datos para calcular la deformación permanente de la subrasante. .... 86

Tabla 53. Datos para el cálculo de diseño rígido de ambas calles. ..... 87

Tabla 54. Espesores y valores k para cada uno de las calles. ..... 87

Tabla 55. Presupuesto flexible calle Mora. ..... 90

Tabla 56. Presupuesto rígido calle Mora. ..... 91

Tabla 57. Presupuesto flexible calle Brujos. ..... 93

Tabla 58. Presupuesto rígido de calle brujos. ..... 94

Tabla 59. Factores diarios. ..... 106

Tabla 60. Distribución del volumen horario para una estación. ..... 106

## Dedicatoria

Este proyecto es dedicado primeramente a Dios y después a mis padres que con mucho esfuerzo pudieron hacer que mi sueño se hiciera realidad. Gracias a todas esas personas que me apoyaron de una u otra manera.

# Resumen

Este proyecto de graduación es acerca del diseño de pavimentos flexible y rígido de dos calles ubicadas en Palmares de Alajuela, Costa Rica. En primera instancia se diseña el pavimento flexible para las calles de calle Brujos y calle Mora. Para estas se calcula el tránsito promedio diario para poder calcular el ESAL y así definir el número estructural por medio de las gráficas. Una vez obtenidos los números estructurales se determinan los espesores de las capas que comprende la estructura vial. Seguidamente, se calculan las deformaciones en cada punto seleccionado por medio del programa PITRA PAVE y así calcular la fatiga y las deformaciones según las capas analizadas.

Para el cálculo de la fatiga y la deformación se utilizan los documentos definidos por el MOPT y el LANAMME. Donde el procedimiento definido por el LANAMME es más amplio, complejo y específico. Este indica la fatiga y la deformación por capas y el total de toda la estructura. El segundo documento utilizado es el definido por el MOPT que solo indica el número de repeticiones por fatiga y por deformación en la subbase.

Para el diseño de pavimento rígido en ambas calles se determina un espesor de base, este dato se proyecta en las gráficas utilizadas y en los cálculos definidos para poder obtener el resultado de K y así poder calcular el espesor de losa de concreto. Ambos resultados deben de compararse y ser iguales, lo que indica un correcto desarrollo de los procedimientos.

Además, se calculan los presupuestos de cada una de las calles diseñadas, tomando como base: materiales, mano de obra, maquinaria, pintura y señalamiento, para de esta forma calcular el costo del metro lineal para cada una de las calles según el pavimento estudiado.

Por último, se definen las especificaciones técnicas de los diseños de pavimentos para las calles seleccionadas.

Abstract

This graduation project is about the design of a rigid and flexible pavement of two roads located in Palmares of Alajuela, Costa Rica. Firstable, is designed the flexible pavement for the roads of Calle Brujos and Calle Mora. For these roads the average daily traffic its calculated so you can define the ESAL and then define the structural number using graphs. Once the structural numbers are gotten, the thickness of the layers of the vial structure are define. Then, the deformations in every point selected are defined using the program PITRA PAVE, to then calculate the fatigue and deformations of the layers analyzed.

For the calculation of the fatigue and deformation the documents defined by MOPT and LANAMME are utilized. The procedure defined by LANAMME is more complex and specific. This document defines the fatigue and deformation by layers and the total of the structure. The second document utilized it's the one dictated by MOPT, this document just indicates the number of repetitions by fatigue and deformation of the subbase.

For the design of the rigid pavement in both roads it is calculated a thickness base, that number is projected in the graphs utilized and, in the calculations, defined to get the result of k so with that calculate the thickness of the concrete. Both results must be compared and equals, that indicates a correct development of the procedures.

Furthermore, the budget of both roads is calculated, taking as base: materials, manpower, machinery use, painting and signage, so with that calculate the cost of the linear meter designed in each road.

By last, technical specifications are define in the pavement designs for the roads selected.

# Introducción

El presente estudio se basa en el diseño de dos opciones de pavimento para encontrar una solución en la instalación de las vías del cantón de Palmares, esto debido a que el diseño actual ha presentado problemas y la resistencia no es la esperada para su vida útil. Lo anterior causa que la calzada se deteriore con mayor rapidez y la inversión no tenga el impacto esperado. Es por esto que se trabaja con la Municipalidad de Palmares en un proyecto de interés mutuo y con resultados que dan una solución de mejor rendimiento en el uso de pavimentos.

Se han diseñado dos tipos de pavimentos, uno de concreto y otro de asfalto, mismo que se prueban en diferentes tipos de suelo según los lugares en los que se quiera usar. Con esto se busca hacer una comparación de características técnicas y resistivas con el fin de obtener el resultado de cómo se comportan los diseños en cada ambiente de uso y poder concluir con las recomendaciones técnicas para la construcción de las vías.

Para el diseño de los pavimentos se cuenta con la ayuda de la municipalidad, ente que brindará información necesaria para el diseño como: estudios de suelos y planos topográficos mientras que algunos otros datos como el conteo de vehículos (Tránsito promedio horario) se hará por parte de la autora del proyecto, para así realizar un diseño acorde con lo solicitado por la Municipalidad de Palmares.

La característica principal para el diseño del pavimento es que el modelo debe presentar una resistencia a los esfuerzos que transmiten los vehículos, el desgaste por exposición a la intemperie, así como la acumulación de agua que le cae a la calzada. Y debido a que los pavimentos se asientan con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad en las capas superficiales, y las de menor capacidad por debajo de estas, con el fin de tener un mayor soporte al impacto que soportará.

La resistencia de las diferentes capas no solo depende del material por utilizar ni el diseño del mismo, sino que también es parte crucial el procedimiento de trabajo durante su

construcción. Por lo que hay dos factores como la compactación y la humedad son de interés a la hora de desarrollar la obra y, sabiendo que cuando un material no se compacta adecuadamente, este se consolida por efectos de las cargas y eso produce deformaciones.

Es por lo anterior que se debe de realizar un buen diseño de pavimentos a la hora de invertir en las carreteras cantonales, ya que esto genera una reducción de los accidentes en carretera debido a aspectos viales y que los gastos de mantenimiento y reparación se vean disminuidos por un trabajo optimizado, logrando una vida útil eficiente y apta para la inversión realizada.

## Antecedentes

Las carreteras han sido creadas principalmente para el tránsito de los vehículos, estos transportan personas, materiales pesados, combustible, etc, que van destinados a diferentes lugares como: centros educativos, hogares, empresas industriales, gasolineras entre muchos más. Este es el panorama que se imagina una persona cuando se les habla sobre tránsito vehicular. Básicamente lo que se transporta a diferentes sitios es una mejor calidad de vida para las personas que lo utilizan.

Sin bien sabe, Palmares hace muchos años atrás era un lago que se formó por una fuerte erupción volcánica del Macizo Central cuando una colada de lava bajaba del Poás y esto hizo que Palmares recolectará una gran cantidad de agua, por lo que al paso del tiempo se secó el lago y llegaron los colonizadores en los años 1830, en esa área se encontraron cultivos de tabaco y al paso del tiempo se comenzó a poblar y construir estructuras pequeñas para poder vivir. (Hernández, 2000)

En el pueblo de Palmares la apertura de los cuadrantes del centro se debió al empeño del cura, quien logró que algunos vecinos donaran las fajas de tierra indispensables para la delimitación de los cuadrantes y la apertura de las calles centrales. Por su parte, en 1894 la municipalidad realizó los trabajos necesarios para depositar tipo en la calle real. (Hernández, 2000)

En la década de 1910 las calles de los principales cuadrantes poseen piedra del tipo laja, mientras que las restantes eran de barro y por allí se transitaba a caballo o en carreta. (Hernández, 2000)

Las principales calles de Palmares empezaron a ser asfaltadas hasta bien entrando los años cuarenta y veinte años después este recubrimiento se fue extendiendo al resto de los distritos.

Palmares ha ido surgiendo con el pasar del tiempo y al haber más población, se ha ido incrementando los vehículos livianos y pesados, esto ha hecho que se vayan deteriorando con mayor facilidad las carreteras, por eso es importante la necesidad de una red vial eficiente y segura, que facilite a todos sus usuarios la comunicación, la prestación de múltiples servicios y el transporte de bienes y personas.

## Justificación

Importante conocer el comportamiento de los pavimentos en los diferentes tipos de suelos, un tema que no se aplica en el curso de la universidad y que es necesario porque no solo hay un tipo de suelo, si no que existen muchos y los pavimentos no se comportan de la misma manera en todos; es por eso que se debe de estudiar más a fondo el tema para un excelente diseño de pavimentos, su construcción e inspecciones de las carreteras.

La municipalidad de Palmares cuenta con un solo tipo de diseño de pavimentos para las estructuras de carreteras, debido al problema se hace el análisis de la afectación que está causando a nivel de cantón. Este problema no solo afecta el pavimento, sino que también a los vehículos que transitan por él, o bien a las personas que utilizan sus vehículos para trasladasen de un lugar a otro. Debido a estos casos, es necesario el diseño de los pavimentos estructurales para así tener una carretera en buenas condiciones. O bien darles un mantenimiento adecuado sabiendo que al tener una estructura de pavimentos en perfectas condiciones va hacer más sencillo repararla.

Con este estudio se busca determinar las condiciones actuales de las vías y así crear un proyecto donde se pueda diseñar futuras carreteras o bien arreglar los pavimentos

existentes. Esto busca minimizar o evitar problemas en otros tramos o calles que aún no se han construido.

## Planteamiento del problema

La municipalidad ha hecho un análisis de cuáles son las carreteras con mayor deterioro y por lo cual es allí donde se trabajará, esto con el fin de tener una mejor red vial para la comunidad. Además, se ha observado que la municipalidad no cuenta con un documento para el diseño de pavimentos de concreto y asfalto para ninguna de las calles del cantón.

Por lo anterior, existe un problema en el diseño de pavimentos actual a nivel cantonal, porque no se cuenta con diseños de pavimentos correspondiente para cada carretera. Hoy día es notorio que las carreteras se deterioran con mayor rapidez en algunos lugares y se ha concluido que la causa radica en el tipo de suelo. Sin embargo, se necesita una investigación más detallada para el diseño de pavimentos que tome en cuenta los tipos de suelo, esto para que la inversión sea eficiente y que las carreteras estén en buen estado, aplicando correctamente el debido mantenimiento.

## Objetivo general

- Analizar los diseños de pavimentos flexibles y rígidos con la norma AASHTO 1993 para los tramos de: calle Brujos, calle Mora en el cantón de Palmares, con sus respectivos presupuestos y especificaciones técnicas.

## Objetivo específico

1. Proponer el diseño de pavimentos de asfalto y concreto para los tramos de calle Brujos y calle Mora.
2. Presupuestar los diseños de pavimentos de cada tramo seleccionado, comparando cual diseño resulta más económico.
3. Plantear las especificaciones técnicas de cada uno de los pavimentos por diseñar.

## Alcances y limitaciones

1. Los planos topográficos y estudios de suelos serán brindados por la Municipalidad de Palmares, para los lugares calle Brujos y calle Mora. Se hará un estudio de tránsito promedio diario en los diferentes sitios con el fin de verificar la cantidad de vehículos que transitan en el lugar.

2. Los estudios de suelos que nos brindó la municipalidad no son de la calle a diseñar, si no que se utilizaron estudios de suelos de trabajos que se realizaron cerca de la vía, debido a que la municipalidad no contaba en sí con los estudios exactos de la vía.

3. No se cuenta con los diseños de estructuras existentes de cada carretera, por lo que se harán huecos en diferentes puntos de la calle, para verificar el espesor de las diferentes capas.

## Impacto

Al realizar los tipos de diseños de pavimentos para diferentes suelos, en distintas carreteras, esto conlleva a mejoras en la red vial del cantón, ya que podemos ver el comportamiento de cada pavimento en los diferentes tipos de suelos y así poder tener una mejor visión a la hora de la construcción en las distintas calles. Esto con el fin de tener mejoras en las carreteras y así obtener una mejor vida útil y darles un adecuado mantenimiento.

Es una ventaja tener las calles en buenas condiciones, tanto para el que transita por ella como para la municipalidad, porque las personas que la utilizan van con mayor confianza, sufren menos daños a sus vehículos y menos gastos, y para la municipalidad porque no tiene que gastar mucho dinero en construcciones nuevas de carreteras, si no que gastan menos dinero dándoles un buen mantenimiento.

# Capítulo I. Marco teórico

## 1.1. Marco teórico - conceptual

### 1.1.1. Definición de un pavimento

Es una estructura constituida por diferentes capas de distintos materiales que tienen que cumplir una serie de funciones.

"La mezcla asfáltica y el hormigón son los materiales más habituales para crear el pavimento urbano, ya que tienen un buen rendimiento de soporte y permiten el paso constante de vehículos sin sufrir grandes daños." (Giordani & Leone, s.f., pág. 2)

En algunos años se ha promovido el desarrollo de pavimento que sea sostenible y que respete el medio ambiente. En este sentido cabe mencionar la creación de pavimento que combina el asfalto con el polvo de caucho que se obtiene a partir de neumáticos reciclados y la utilización del producto conocido como noxer, que tiene la capacidad de absorber la contaminación que producen los tubos de escape de los vehículos. (Giordani & Leone, s.f., pág. 2)

El diseño de un pavimento debe de cumplir con las siguientes funciones

- Proveer una base de apoyo (fundación), de manera que las cargas de tránsito sean transmitidas a la subrasante (suelo) de manera amortiguada (tal que no supere su resistencia mecánica).
- Proveer un medio drenante, de manera que el agua llovida sea evacuada de la superficie de ruedo.
- Proveer una superficie de ruedo estable, segura y confiable. (Molina, 2018, pág. 1)

<u>La importancia de construir pavimentos resistentes</u>

"Es importante construir pavimentos resistentes, ya que al pasar los años va aumentando la cantidad de vehículos y esto produce que se agrieten y se hagan huecos con

mayor facilidad, lo que produce accidentes automovilísticos y haya daños.” (Araya, 20 marzo 2018)

Para cambiar este tipo de situaciones es importante hacer un análisis en las vías para ver qué tipo de diseños se puede realizar en el sitio y también realizar un diseño estructural adecuado que cumpla con los requisitos que se analizaron primeramente y que al pasar el tiempo solo se desgaste la capa superficial y no todo el diseño estructural. (Araya, 20 marzo 2018)

### 1.1.2. Curva de deterioro de un pavimento

A continuación, se presenta la curva de deterioro de un pavimento.

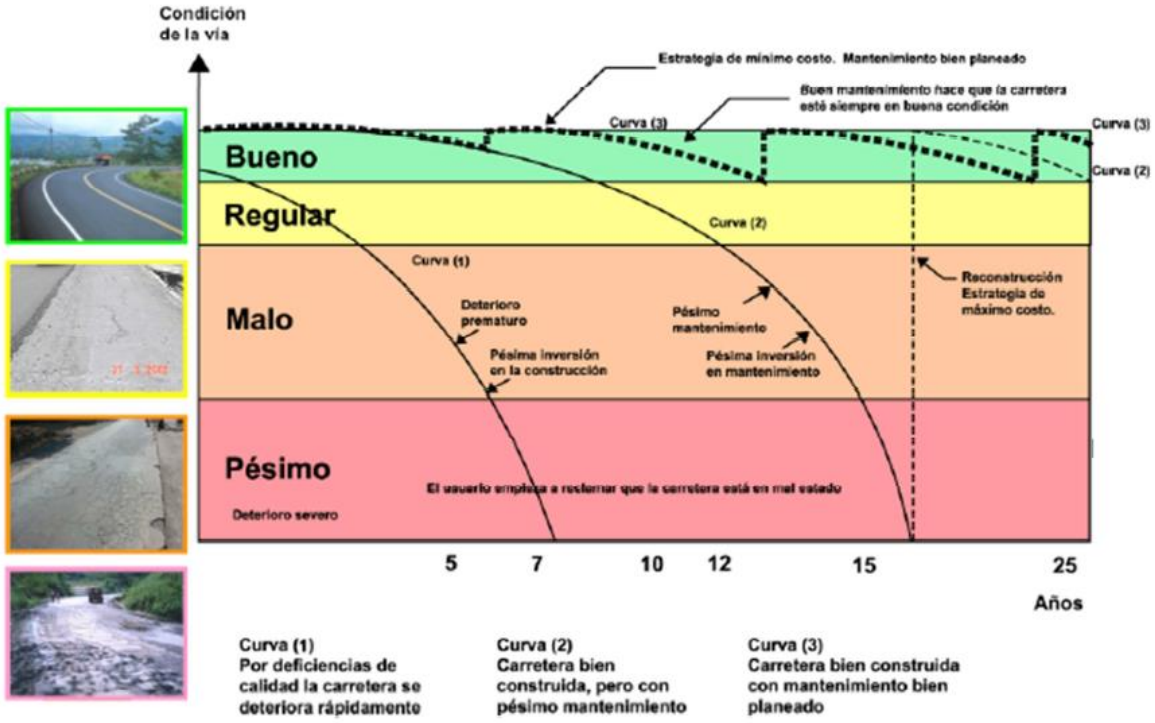



Figura 1. Curva de deterior de un pavimento

Fuente: (Molina, 2018, pág. 7)

### 1.1.3. Tipos de falla en pavimento

Se presentará diferentes tipos de fallas que existen en los pavimentos:

- Estructural: Ruptura de una o más componentes estructurales.
- Desempeño estructural: habilidad del pavimento de resistir la acción combinada. (Molina, 2018, pág. 11)

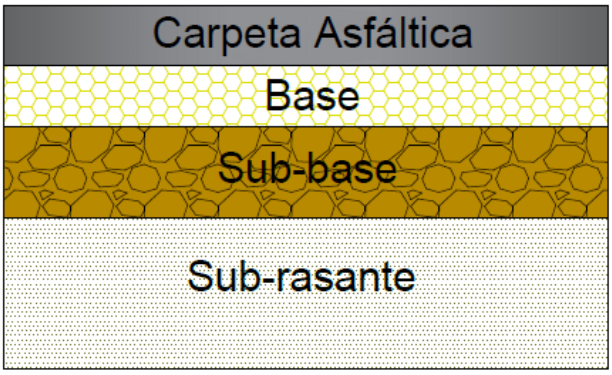
### 1.1.4. Tipos de pavimentos

#### 1.1.4.1. Pavimentos asfálticos o flexibles

Son aquellos que tienen un revestimiento asfáltico sobre una capa base granular. La distribución de tensiones y deformaciones generadas en la estructura por las cargas de rueda del tráfico se da de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las tensiones verticales de compresión del suelo de fundación por medio de la absorción de tensiones cizallantes. En este proceso ocurren tensiones de deformación y tracción en la fibra inferior del revestimiento asfáltico, que provocará su fisuración por fatiga por la repetición de las cargas de tráfico. Al mismo tiempo la repetición de las tensiones y deformaciones verticales de compresión que actúan en todas las capas del pavimento producirán la formación de hundimientos en la trilla de rueda, cuando el tráfico tiende a ser canalizado, y la ondulación longitudinal de la superficie cuando la heterogeneidad del pavimento fuera significativa. (Pavimentos , 2010)

Este tipo de pavimento presenta las siguientes particularidades:

- Las capas granulares, se colocan para disminuir el espesor de la carpeta asfáltica.
- Se considera que los esfuerzos se han disipado, cuando el espesor en un punto cualquiera es menor que el 10% de la presión de concreto. (Molina, 2018, pág. 2)




Pavimento
Flexible

Figura 2. Mecanismo de disipación de tensiones de pavimento flexible.

Fuente: Elaboración propia

#### 1.1.4.1.1. Elementos que componen el pavimento flexible

A) Carpeta Asfáltica

Es un material viscoso y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en un pavimento de mezcla en caliente. Es un excelente impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis o sales. (Institute, s.f, pág. 11)

B) Base

Material constituido por partículas duras y durables que se encuentra inmediatamente debajo de la capa superficial o la capa intermedia. Puede estar compuesto de escombros triturados, roca triturada, grava y arena triturada o la combinación de estos materiales, que cumplan con la normativa vigente. (Castro Herrera & Barrantes Jiménez, 2010, pág. 17)

### C) Subbase

"Es la capa o capas de material colocado sobre una subrasante o material selecto para soportar la base o superficie de un pavimento." (Castro Herrera & Barrantes Jiménez, 2010, pág. 30)

### D) Subrasante:

"Es la superficie del terreno, ya sea en corte o terraplén, sobre la que se colocan las diferentes capas de material que constituyen el pavimento de una carretera o camino." (Castro Herrera & Barrantes Jiménez, 2010, pág. 30)

#### 1.1.4.1.2. Tipos de falla en los pavimentos flexibles

A continuación, se presentan diferentes tipos y manifestaciones de las fallas en los pavimentos flexibles:

Figura 3. Deterioro de los pavimentos.

Fuente: Elaboración propia

### 1.1.4.2. Pavimentos rígidos

Son aquellos en los que la losa de concreto de cemento es el principal componente estructural, que alivia las tensiones en las capas subyacentes por medio de su elevada resistencia a la flexión por fatiga, después de un cierto número de retenciones de carga. La capa inmediatamente inferior a los de concreto denominada sub-base, por esta razón, puede ser constituida por materiales cuya capacidad de soporte sea inferior a la requerida por los materiales de la capa base de los pavimentos flexibles. (Pavimentos , 2010)

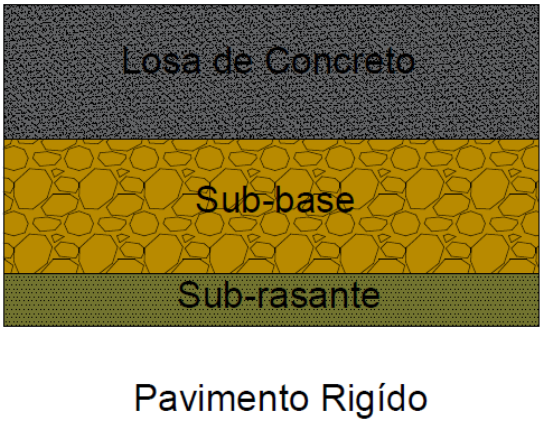



Figura 4. Mecanismo de disipación de tensiones de pavimento rígido.

Fuente: Elaboración propia

Se ilustra una tabla de algunos beneficios de un pavimento rígido.

Tabla 1. Beneficios de un pavimento rígido

| Beneficios | Concreto |
|---|---|
| Seguridad Vial | Reduce el salpiqueo de agua superficial (no se ahuella, ni se empoza). |
| | Mayor Visibilidad |
| | Planicidad Superficial: Conserva textura superficial por más tiempo. |
| Cuidado de medio ambiente | Ahorro de combustible en camiones puede ir de 0.8% a 6.9% vs asfalto |
| | Se reduce las emisiones de dióxido de carbono y otras. |
| | Requiere de 3 a 5 veces menor energía en su construcción, mantenimiento y rehabilitación. |
| | Es 100% reciclable. |
| | Reduce el efecto de calor urbano, por su calor y propiedades reflectoras. |

Fuente: (Duravía, s.f, pág. 2)

#### 1.1.4.2.1. Elementos que componen un pavimento rígido

La subrasante y la subbase para una estructura de pavimento rígido sus especificaciones son iguales a las del pavimento flexible.

##### I. Carpeta de rodadura

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con hidráulico, por lo que, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa más que en la capacidad de la subrasante, dado que no se utiliza capa de base.

Está conformada por mezcla de concreto. Los métodos de diseño de mezcla con módulo de rotura a la flexión equivalente a f´c=280 Kg/cm$^2$. (Duravía, s.f, pág. 6)

##### II. Las juntas

"Por la naturaleza, es necesario controlar la fisuración y permitir el movimiento relativo entre paños adyacentes mediante el empleo de juntas." (Duravía, s.f, pág. 7)

Las juntas son cortes longitudinales y transversales que tienen el rol de inducir fisuras por contracción del concreto, aislar el movimiento de los paños de elementos ajenos al pavimento, como buzones, por ejemplo, y ser incluso parte del procedimiento constructivo del pavimento. (Duravía, s.f, pág. 7)

##### III. Mecanismos de transferencia de carga y confinamiento

Dependiendo del tipo de solicitaciones de carga de tránsito y del diseño geométrico de la vía, el pavimento contará con mecanismos de transferencia de cargas entre paños adyacentes y confinamiento lateral. (Duravía, s.f, pág. 7)

#### 1.1.4.2.2. Tipos de pavimentos rígidos

##### A. Pavimento de concreto simple con juntas

En este tipo de pavimentos se requiere realizar juntas de construcción transversal que varían entre 3.5 y 6.0m. La transferencia de carga entre paños adyacentes se puede dar mediante trabazón de agregados o mediante el empleo de pasadores.

Las juntas inducen el agrietamiento propio del comportamiento del concreto por las tensiones originadas por los cambios de temperatura y humedad. Se recomienda no exceder los 4.5m. (Duravía, s.f, pág. 3)

##### B. Pavimento de concreto armado con barras transversales

La carpeta de rodadura es de concreto reforzado con mallas de acero, las que permiten incrementar la distancia entre juntas llegando a valores entre 7.5 y 9.0m. Aunque tiene refuerzos moderados de acero siempre se espera que se produzcan fisuras controladas dentro de los paños. La transferencia de carga entre paños adyacentes se realiza mediante la trabazón de agregados o el empleo de pasadores. (Duravía, s.f, pág. 3)

##### C. Pavimentos de concreto continuamente reforzado

Son especificados para periodos de diseño mayores a 30 años, por lo que es común aparecerlos en otras realidades.

Tiene armadura continua longitudinal y no tiene juntas transversales, excepto juntas de construcción. (Duravía, s.f, pág. 4)

#### 1.1.4.2.3. Tipos de falla en los pavimentos rígidos

Ilustración de algunos tipos de falla en los pavimentos rígidos:

Figura 5. Diferentes tipos de fallas de pavimentos rígidos

Fuente: Elaboración propia

### 1.1.4.3. Pavimentos semi rígido

En términos amplios, un pavimento semi rígido o compuesto es aquel en el que se combinan tipos de pavimentos diferentes, es decir, pavimentos “flexibles” y pavimentos “rígidos”, normalmente la capa rígida está por debajo y la capa flexible por encima. Es usual que un pavimento compuesto comprenda una capa de base de concreto o tratada con cemento junto con una superficie de rodadura de concreto asfáltico. (Pavimentos , 2010)

La estabilidad del suelo por medio de ligantes hidráulicos (cemento) permite que se obtengan materiales con capacidad de soporte suficiente para construir capas para base en pavimentos sujetos a cargas pesadas como camiones o aeronaves. (Pavimentos , 2010)

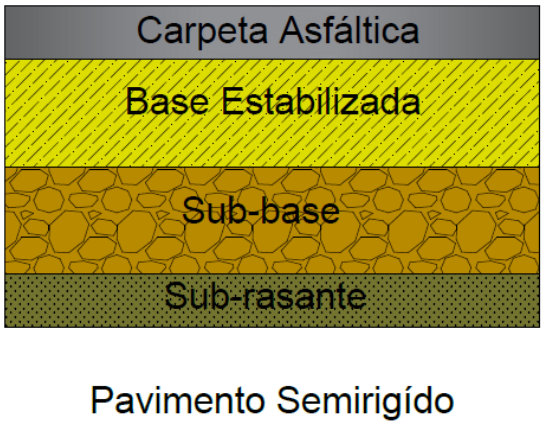



Figura 6. Mecanismo de disipación de tensiones de pavimento semi-rígido

Fuente: Elaboración propia.

## 1.2. Criterios de diseño

### 1.2.1. Tránsito

"Es el flujo vehicular que transita por una calle o autopista con el fin de desplazarse de un lugar a otro, ya sea una persona, bicicleta, automóvil, camión, entre otros." (Araya, 23 de marzo, 2018)

### 1.2.2. Cálculo de ejes equivalentes

Las diferentes cargas que actúan sobre un pavimento producen a su vez diferentes tensiones y deformaciones en el mismo; los diferentes espesores de pavimentos y diferentes materiales, responden de diferente manera a igual carga. Como estas cargas producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, las fallas tendrán que ser distintas. Para tomar en cuenta esa diferencia, el volumen de tránsito se transforma en un número equivalente de ejes de una determinada carga, que a su vez producirá el mismo daño que toda la composición de tránsito mixto de vehículos. (Iturbide, 2002, pág. 43)

### 1.2.3. Límites de peso por eje

Para determinar y calcular los ejes equivalentes se requiere el uso de factor camión para cada clase de vehículo, principalmente para camiones pesados. Esto debe hacerse usando los pesos límites de cada vehículo según la tabla que se presenta a continuación:

Tabla 2. Límites de peso por eje

| Límite de peso por eje | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tipo de Vehículo | Tipo de Eje del Tractor | | | | Tipo de eje del Semiremolque | | | TOTAL (Toneladas) |
| | Eje simple Direccional | Eje de Tracción | | | Eje de arrastre | | | |
| | | Eje simple | Doble Rueda | Triple rueda | Eje simple | Doble Rueda | Triple rueda | |
| C2 | 5.00 | 10.00 | | | | | | 15.00 |
| C3 | 5.00 | | 16.50 | | | | | 21.50 |
| C4 | 5.00 | | | 20.00 | | | | 25.00 |
| T2-S1 | 5.00 | 9.00 | | | 9.00 | | | 23.00 |
| T2-S2 | 5.00 | 9.00 | | | | 16.00 | | 30.00 |
| T2-S3 | 5.00 | 9.00 | | | | | 20.00 | 34.00 |
| T3-S1 | 5.00 | | 16.00 | | 9.00 | | | 30.00 |
| T3-S2 | 5.00 | | 16.00 | | | 16.00 | | 37.00 |
| T3-S3 | 5.00 | | 16.00 | | | | 20.00 | 41.00 |
| Otros | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | Variable |

Fuente: (Maldonado, 2000, pág. 8)

Tabla 3. Tipos de ejes y número de llantas

**TIPOS DE EJES Y NÚMERO DE LLANTAS – PESO MÁXIMO POR EJE Y TOLERANCIAS**

| CONFIGURACIÓN TIPO DE EJES / LLANTAS | DESCRIPCIÓN | SIMBOLOGÍA DEL RODADO | | PESO POR TIPO DE EJE (3) | TOLERANCIA EN BÁSCULA (2) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | En Toneladas | |
| | **Eje simple delantero**<br>Llanta simple | 1-S | | 6 | 0,5 |
| | **Eje simple (no delantero)**<br>Llanta simple | 1-S | | 6 | 0,5 |
| | **Eje simple**<br>Llantas dobles o duales | 1-D | | 10 | 0,5 |
| | **Eje doble (tandem)**<br>Llanta simple | 2-S | | 13 | 0,5 |
| | **Eje doble (tandem)**<br>Llantas mixtas | 15 | 1-S / 1-D | 15 | 0,5 |
| | **Eje doble (tandem)**<br>Llantas dobles o duales | 2-D | | 16,5 | 0,5 |
| | **Eje triple (tridem)**<br>Llanta simple | 3-S | | 16,5 | 0,5 |
| | **Eje triple (tridem)**<br>Llantas mixtas | 20 | 1-S / 2-D | 20 | 0,5 |
| | **Eje triple (tridem)**<br>Llantas dobles o duales | 3-D | | 23 | 0,5 |
| | **Ejes mixtos**<br>Llantas mixtas | 23 | 1-S → 2-D | 23 | 0,5 |
| | **Ejes mixtos**<br>Llantas dobles o duales | 27 | 1-D → 2-D | 27 | 0,5 |

Fuente: (Molina, 2018)

### 1.2.4. Volumen de tránsito

Estos estudios se realizan para conocer los volúmenes de tránsito que circulan por una vía, por parte de ella, o por un sistema de ellas que constituyen la fuente primaria de información para distribuir y proyectar volúmenes de tránsito. Existen diferentes tipos de estudios según el lugar donde se realicen y el objeto de estudio, tales como: estudios en lugar aislados, estudios en sistemas de vías rurales, urbanas y estudios en cordones. (Montoya, 2008, pág. 24)

### 1.2.5. Índice de Serviciabilidad

Es el valor que indica el grado de confort o agrado que tiene la superficie para el desplazamiento natural y normal de un vehículo. A un pavimento en perfecto estado se le asigna un valor de serviciabilidad inicial de 5 (perfecto); y un pavimento en evidente deterioro o con un

Índice de Serviciabilidad final de 0 (pésimas condiciones). A la diferencia entre estos dos valores se le conoce como la perdida de serviciabilidad (Δ PSI) o Índice de Serviciabilidad presente. (Iturbide, 2002, pág. 43)

Los valores que se recomiendan dependiendo del tipo de pavimento son los siguientes:

Índice de Serviciabilidad inicial:

- Po = 4.5 para pavimentos rígidos.
- Po = 4.2 para pavimentos flexibles.

Índice de Serviciabilidad inicial:

- Pt = 2.5 o más para camiones muy importantes.
- Pt = 2.0 para camiones de tránsito menor.

### 1.2.6. Ley de la cuarta potencia

En caso de no tener al alcance las tablas de AASHTO (1993), o de necesitarse un resultado con mayor número de decimales, para determinar los LEF se recomienda utilizar la Ley de la cuarta potencia, que es la siguiente: (Iturbide, 2002, pág. 45)

$$LEF = \left(\frac{P}{Q}\right)^N$$

Donde:

$LEF$: Factor equivalente de carga.

$P$: Magnitud de carga (eje).

$Q$: Carga de referencia (18,000 lb, 80 kN, 18 kips)

$N$: Exponente (4).

### 1.2.7. Eje equivalente

Permite convertir pasadas equivalentes de cualquier peso y tipo de eje, en pasadas de eje equivalente de 8200 kg (estándar para el diseño de pavimentos).

Depende de:

- ✓ Peso por eje.
- ✓ Tipo de eje (simple, tándem, tridem).
- ✓ Tipo de estructura (flexible o rígida).
- ✓ Capacidad estructural (número estructural).

Para el cálculo de los ejes equivalentes se requiere:

1. Factor camión (Tf).
2. Porcentaje de la tasa anual de crecimiento vehicular.
3. Periodo de diseño de la estructura.
4. Tránsito promedio diario (TPD).
5. Factor de crecimiento (%).
6. Factor de distribución por dirección (D).
7. Factor de distribución por carril (L).

Para determinar los ejes equivalentes se utiliza la siguiente fórmula:

$$ESAL = TPD * T * Tf * (G * Y) * L * 365$$

#### 1.2.7.1. Variables que componen la fórmula anterior

##### A. Factor Camión (Tf)

Permite estimar el daño que produce un vehículo cualquiera (peso y tipo de eje) en comparación con un vehículo estándar para el diseño de pavimentos.

Tabla 4. Factor camión

| Vehículo | Factor Camión | | |
|---|---|---|---|
| | Mínimo | Máximo | Promedio |
| Pick-up | 0.01 | 0.02 | 0.01 |
| C2 - eje simple trasero | 0.01 | 0.07 | 0.26 |
| C2 - eje tandem trasero | 0.26 | 0.63 | 0.47 |
| C3 | 0.99 | 1.28 | 1.10 |
| Bus | 1.25 | 2.29 | 1.71 |
| T3-S2 | 1.51 | 2.38 | 1.71 |

Fuente: (LanammeUCR, 2009, pág. 15)

### B. Porcentaje de la tasa anual de crecimiento vehicular

El porcentaje de la tasa anual de crecimiento de vehículos puede cambiar si se utilizan diferentes porcentajes, dependiendo del tipo de vehículo que se considere que va a aumentar o disminuir más que los otros, debido a cambios en formaciones económicos propios de la zona, turismo, crecimiento demográfico, entre otros.

### C. Periodo de diseño de la estructura

"Es aquel periodo que se encuentra entre la construcción o rehabilitación del pavimento y el momento en que este alcanza un grado de serviciabilidad mínimo." (LANAMME, 2009, pág. 8)

Los periodos del diseño recomendados en la AASHTO Guía de diseños estructurales de pavimentos 1993 son los siguientes:

Tabla 5. Periodo de diseño en función del tiempo en carretera

| Tipo de Carretera | Periodo de análisis |
|---|---|
| Urbana con altos volúmenes de tránsito | 30 – 50 años |
| Interurbana con altos volúmenes de tránsito | 20 – 50 años |
| Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito | 15 – 25 años |
| Revestidas con bajos volúmenes de tránsito | 10 – 20 años |

Fuente: (LANAMME, 2009, pág. 9)

Otros valores de periodos de análisis que se recomiendan se presentan a continuación:

Tabla 6. Periodo de diseño en función de tiempo en carretera

| Tipo de carretera | Periodo de análisis |
|---|---|
| Autopista Regional | 20 – 40 años |
| Troncales suburbanas | 15 – 30 años |
| Troncales Rurales | |
| Colectoras Suburbanas | 10 – 20 años |
| Colectoras Rurales | |

Fuente: (LANAMME, 2009, pág. 9)

## D. Tránsito promedio diario (TPD)

Es una medida de tránsito fundamental, está definida como el número total de vehículos que pasan por un determinado punto durante un periodo establecido. El periodo debe estar dado como días completos t además estar comprendido entre 1 a 365 días. (Volumenes de Tránsito Promedio Diario, 2011)

## E. Factor de crecimiento

Para el cálculo del factor de crecimiento de tránsito se utiliza la tabla 7 que se presenta a continuación; o bien la siguiente ecuación si se necesita calcular un año que no esté comprendido en dicha tabla

$$G = \frac{(1+r)^Y - 1}{r}$$

Donde:

$r$: Tasa de crecimiento anual (en porcentaje).

$Y$: Periodo de análisis (en años).

Tabla 7. Factores de crecimiento de tránsito

| | | Tasa de crecimiento anual (g) en % | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Periodo de análisis (años) | Factor sin crecimiento | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2 | 2.0 | 2.02 | 2.04 | 2.05 | 2.06 | 2.07 | 2.08 | 2.10 |
| 3 | 3.0 | 3.06 | 3.12 | 3.15 | 3.18 | 3.21 | 3.25 | 3.31 |
| 4 | 4.0 | 4.12 | 4.25 | 4.31 | 4.37 | 4.44 | 4.51 | 4.64 |
| 5 | 5.0 | 5.20 | 5.42 | 5.53 | 5.64 | 5.75 | 5.87 | 6.11 |
| 6 | 6.0 | 6.31 | 6.63 | 6.80 | 6.98 | 7.15 | 7.34 | 7.72 |
| 7 | 7.0 | 7.43 | 7.90 | 8.14 | 8.39 | 8.65 | 8.92 | 9.49 |
| 8 | 8.0 | 8.58 | 9.21 | 9.55 | 9.90 | 10.26 | 10.64 | 11.44 |
| 9 | 9.0 | 9.75 | 10.58 | 11.03 | 11.49 | 11.98 | 12.49 | 13.58 |
| 10 | 10.0 | 10.95 | 12.01 | 12.58 | 13.18 | 13.82 | 14.49 | 15.94 |
| 11 | 11.0 | 12.17 | 13.49 | 14.21 | 14.97 | 15.78 | 16.65 | 18.53 |
| 12 | 12.0 | 13.41 | 15.03 | 15.92 | 16.87 | 17.89 | 18.98 | 21.38 |
| 13 | 13.0 | 14.68 | 16.63 | 17.71 | 18.88 | 20.14 | 21.50 | 24.52 |
| 14 | 14.0 | 15.97 | 18.29 | 19.16 | 21.01 | 22.55 | 24.21 | 27.97 |
| 15 | 15.0 | 17.29 | 20.02 | 21.58 | 23.28 | 25.13 | 27.15 | 31.77 |
| 16 | 16.0 | 18.64 | 21.82 | 23.66 | 25.67 | 27.89 | 30.32 | 35.95 |
| 17 | 17.0 | 20.01 | 23.70 | 25.84 | 28.21 | 30.84 | 33.75 | 40.55 |
| 18 | 18.0 | 21.41 | 25.65 | 28.13 | 30.91 | 34.00 | 37.45 | 45.60 |
| 19 | 19.0 | 22.84 | 27.67 | 30.54 | 33.76 | 37.38 | 41.45 | 51.16 |
| 20 | 20.0 | 24.30 | 29.78 | 33.06 | 36.79 | 41.00 | 45.76 | 57.28 |
| 25 | 25.0 | 32.03 | 41.65 | 47.73 | 54.86 | 63.25 | 73.11 | 98.35 |
| 30 | 30.0 | 40.57 | 56.08 | 66.44 | 79.04 | 94.46 | 113.28 | 164.49 |
| 35 | 35.0 | 49.99 | 73.65 | 90.32 | 111.43 | 138.24 | 172.32 | 271.02 |

Fuente: (Maldonado, 2000)

## F. Factor de distribución por dirección (D)

Es el factor del total del flujo vehicular censado, en la mayoría de los casos este valor es de 0.5; ya que la mitad de los vehículos va en una dirección y la otra mitad en la otra dirección. Puede darse el caso de ser mayor en una dirección que en la otra, lo cual puede deducirse del conteo de tránsito efectuado. Lo más importante de esto, será la diferencia de peso entre los vehículos que van en una y en otra dirección. (Iturbide, 2002, pág. 68)

Tabla 8. Factores de distribución por dirección

| Número de carriles en ambas direcciones | LD[10] |
|---|---|
| 2 | 50 |
| 4 | 45 |
| 6 o más | 40 |

Fuente: (Factor de distribución por dirección, 2013, parr 2)

### G. Factor de distribución por carril (L)

"El carril de diseño es aquel que recibe el mayor número de ESALs. Para un camino de dos carriles, cualquiera puede ser el carril de diseño, ya que el tránsito por dirección forzosamente se canaliza en ese carril." (Iturbide, 2002, pág. 69)

Tabla 9. Factores de distribución por carril

| Número de carriles en cada dirección | LD |
|---|---|
| 1 | 1.00 |
| 2 | 0.80 - 1.00 |
| 3 | 0.60 - 0.80 |
| 4 | 0.50 - 0.75 |

Fuente: (Factor de distribución por carril, 2011)

## 1.2.8. Subrasante

Es la capa en la que se apoya la estructura del pavimento y características especiales que define la propiedad de los materiales que componen la subrasante, se conoce como Módulo de Resiliencia (Mr). (Iturbide, 2002, pág. 71)

Cuando se comenzaron a efectuar los primeros diseños de pavimentos, este concepto estaba basado en las propiedades de la subrasante tales como:

- Granulometría
- Plasticidad
- Clasificación de suelos
- Resistencia al cortante
- Susceptibilidad a las variaciones de temperatura
- Drenaje

#### 1.2.8.1. Propiedades físico-mecánicas de los suelos para subrasante

"La subrasante es definida como el suelo preparado y compactado para soportar la estructura de un sistema de pavimento." (Iturbide, 2002, pág. 73)

Estas propiedades de los suelos que constituyen la subrasante, son las variables más importantes que se deben considerar al momento de diseñar una estructura de pavimento. Las propiedades físicas se mantienen invariables, aunque se sometan a tratamientos tales como homogenización, compactación, etc. Sin embargo, ambas propiedades cambiarían cuando se realicen en ellos procedimientos de estabilización, a través de procesos de mezclas con otro material (cemento, cal, puzolanas, etc.) o mezclas con químicos. (Iturbide, 2002, pág. 73)

Para conocer las propiedades de los suelos en un proyecto, es necesario tomar muestras en todo el desarrollo del mismo (calicatas), posteriormente en el laboratorio se determinan sus propiedades:

- Granulometría
- Límites de Atterberg (liquido e índice plástico)
- Valor Soporte (CBR)
- Densidad (Proctor)
- Humedad

Con los datos obtenidos, se elabora un perfil estratigráfico en el cual se detallan los distintos tipos de suelos y su profundidad. (Iturbide, 2002, pág. 73)

### 1.2.9. Clasificación de suelos

Es el indicador de las propiedades físico-mecánicas que tienen los suelos. La clasificación que mejor describe y determina las propiedades de un suelo a usarse como subrasante es la clasificación de AASHTO M-145; las primeras variables son: la granulometría y la plasticidad. En términos generales un suelo conforme con su granulometría se clasifica en:

- Grava: de un tamaño menor a 76.2mm (3") hasta tamiz No. 10 (2 mm).

- Arena Gruesa: de un tamaño menor a 2 mm hasta tamiz No. 40 (0.425 mm).
- Arena Fina: de un tamaño menor a 0.425 mm hasta tamiz No. 200 (0.075 mm).
- Limos y Arcillas: tamaños menores de 0.075 mm. (Iturbide, 2002, pág. 74)

Conforme AASHTO, un suelo fino es el que tiene más de 35% que pasa el tamiz No. 200 (0.075 mm), los cuales se clasifican como A-4, A-5, A-6 o A-7. Dos suelos considerados finos que tengan granulometrías similares pueden llegar a tener propiedades diferentes dependiendo de su plasticidad, cualidad que se analiza en el suelo que pasa el tamiz No. 40; dichas propiedades de plasticidad, se analizan conforme las pruebas de límites de Atterberg, las cuales son:

- Límite Líquido o LL[2]: Es el estado de un suelo, cuando pasa de un estado plástico a un estado semilíquido.
- Límite Plástico o LP[2]: Es la frontera entre el estado plástico y el semisólido de un suelo.
- Índice Plástico o IP[2]: Es la diferencia entre LL y LP, que nos indica la plasticidad del material. (Iturbide, 2002, pág. 74)

### 1.2.10. Ensayos de suelos

Existen diferentes métodos para medir la resistencia de los suelos de la subrasante que han sido sometidos a cargas dinámicas de tránsito, entre los cuales están los siguientes:

- Relación de Valor Soporte de California (CBR, California Bearing Ratio).
- Valor de resistencia Hveem (Valor R).
- Ensayo de plato de carga (Valor K)
- Penetración dinámica con cono
- Módulo de resiliencia (Mr) para pavimentos flexibles.
- Módulo de reacción (Mk) para pavimentos rígidos. (Iturbide, 2002, pág. 75)

### A. Valor soporte California (CBR, AASHTO T – 193)

En este ensayo se mide la resistencia que opone un suelo a la penetración de un pistón de 3 pulg$^2$ de área en una muestra de suelo de 6 pulg (15 cm) de diámetro y 5 pulg (12.5 cm) de altura, a una velocidad de 1.27 mm/min (0.5 pulg/min). La fuerza necesaria para que el pistón penetre dentro del suelo se mide a determinados intervalos de penetración; estas fuerzas medidas, se comparan con las que se necesitan para producir iguales penetraciones en una muestra que sirve de patrón, la cual es piedra partida bien graduada; la definición del CBR es: (Iturbide, 2002, pág. 75)

$$CBR = \frac{Fuerzas\ necesarias\ para\ producir\ una\ penetración\ de\ 2.5\ mm\ en\ un\ suelo}{Fuerza\ necesaria\ para\ producir\ una\ penetración\ de\ 2.5\ mm\ en\ la\ muestra\ patrón}$$

"Relación que nos da un valor que se indica en porcentaje, el cual puede ser variable dependiendo de los suelos analizados; 2 a 4 % en arcillas plásticas hasta un 70% o más en materiales granulares de buena calidad." (Iturbide, 2002, pág. 75)

### B. Valor de resistencia HVEEM (Valor R, AASHTO T – 246)

Este ensayo consiste en preparar una muestra cilíndrica de 4" de diámetro y de 2.5" de alto envuelta en una membrana y sometida a carga vertical sobre la sección completa de la muestra a una presión dada; con esto se mide la presión horizontal resultante, que es la que sirve para calcular el valor R, para lo cual se utiliza la siguiente fórmula: (Iturbide, 2002, pág. 76)

$$R = 100 - \frac{100}{\left(\frac{2.5 * (Px - 1)}{D * Ph}\right) + 1}$$

Donde:

$Px$: Carga vertical aplicada

$Ph$: Presión horizontal en el manómetro

$D$: Desplazamiento horizontal de la muestra, registrado por el número de vueltas de la manivela para pasar de Ph a 7 kg/cm$^2$ (100 lbs/pulg$^2$). (Iturbide, 2002, pág. 76)

### C. Ensayo de plato de carga (Valor k, AASHTO T- 222)

"Este ensayo consiste en cargar un plato y medir la presión necesaria para producir una determinada deformación en el suelo. K es el cociente de dividir la presión (p) entre la deformación ($\Delta$) producida en el suelo." (Iturbide, 2002, pág. 77)

$$k = \frac{p}{\Delta}$$

### D. Penetración dinámico PR con cono

Este ensayo sirve para medir en el terreno, la resistencia que tienen los materiales, tanto de estructuras de pavimento como de subrasante. La operación consiste en hacer penetrar el cono dentro del pavimento o suelo, haciendo que una carga concentrada que funciona como martillo se deje caer repetidamente y se registe la penetración obtenida en cada caída en mm/golpe, determinando cada calor como tasa de penetración dinámica = PR (Penetration Rate). (Iturbide, 2002, pág. 78)

El CBR está relacionado con PR en la siguiente forma:

$$CBR = \frac{405.3}{PR^{1.259}} \; para\ conos\ de\ 60°$$

$$CBR = 2.2 - 0.71\ \log(DCP)^{1.3}\ \ para\ conos\ a\ 30°$$

Donde:

$PR$: Tasa de penetración en mm/golpe

$DCP$: Tasa de penetración en pulg/golpe

## E. Módulo de resiliencia (Mr), para pavimentos flexibles

Para caracterizar debidamente los materiales, consiste en el módulo de resiliencia, con base en pruebas de laboratorio, realizadas en materiales por utilizar en la capa subrasante (Método AASHTO T-274), con muestras representativas que simulen las estaciones del año respectivo. (Rico Rodríguez, Téllez Gutiérrez, & Garnica Anguas, 1998, pág. 66)

Para calcular el daño equivalente anual se utiliza la siguiente fórmula:

$$Uf = 1.18\ x\ 10^{8} * Mr^{-2.32}$$

Tabla 10. Datos calculados conforme con la fórmula Uf

| No. | Meses | Módulo de la subrasante Mr (PSI) | Daño Relativo $U_f$ |
|---|---|---|---|
| 1 | Enero | 20,000 | 0.012402 |
| 2 | Febrero | 20,000 | 0.012402 |
| 3 | Marzo | 2,500 | 1.544049 |
| 4 | Abril | 4,000 | 0.518923 |
| 5 | Mayo | 4,000 | 0.518923 |
| 6 | Junio | 7,000 | 0.141662 |
| 7 | Julio | 7,000 | 0.141662 |
| 8 | Agosto | 7,000 | 0.141662 |
| 9 | Septiembre | 7,000 | 0.141662 |
| 10 | Octubre | 7,000 | 0.141662 |
| 11 | Noviembre | 4,000 | 0.518923 |
| 12 | Diciembre | 20,000 | 0.012402 |
| | | **Suma $U_f$** | **3.846336** |
| | | **$U_f$ promedio** | **0.3205280039** |

Fuente: (Iturbide, 2002, pág. 81)

## F. Módulo de reacción (Mk) para pavimentos rígidos

El módulo de reacción de la subrasante, sirve para el diseño de pavimentos rígidos; y para la determinación del valor efectivo de Mk debe proceder así:

1. Tipo de subbase con resistencia y valores del módulo
2. Espesor de la subbase
3. Pérdida de soporte (LS)
4. Profundidad a la fundación rígida
5. Espesor estimado de la losa

### 1.2.11. Drenaje

La humedad es una característica muy especial de los pavimentos, ya que esta reviste gran importancia sobre las propiedades de los materiales que forman la estructura de un pavimento y sobre el comportamiento de los mismos. El objeto de este capítulo es analizar los distintos métodos por medio de los cuales se busca reducir o eliminar el agua en la estructura de un pavimento. (Molina, 2018, pág. 1)

El drenaje de agua en los pavimentos debe ser considerado como parte importante en el diseño de carreteras. El exceso de agua combinado en el incremento de volúmenes de tránsito y cargas, se anticipan con el tiempo para ocasionar daño a las estructuras de pavimento. (Molina, 2018, pág. 1)

Tabla 11. Tiempos de drenaje para capas granulares

| Calidad del Drenaje | 50% saturación | 85% saturación |
|---|---|---|
| Excelente | 2 horas | 2 horas |
| Bueno | 1 día | 2 a 5 horas |
| Regular | 1 semana | 5 a 10 horas |
| Pobre | 1 mes | de 10 a 15 horas |
| Muy pobre | El agua no drena | mayor de 15 horas |

Fuente: (Iturbide, 2002, pág. 125)

#### A. Coeficiente de drenaje para pavimentos flexibles (mx)

La calidad de drenaje es expresada en la fórmula del número estructural, por medio del coeficiente de drenaje ($m_x$), que toma en cuenta las capas no ligadas. (Molina, 2018, pág. 3)

Tabla 12. Coeficiente de drenaje para pavimentos flexibles mx

| Calidad del drenaje | P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación | | | |
|---|---|---|---|---|
| | < 1% | 1% - 5% | 5% - 25% | > 25% |
| Excelente | 1.40-1.35 | 1.35-1.30 | 1.30-1.20 | 1.20 |
| Bueno | 1.35-1.25 | 1.25-1.15 | 1.15-1.00 | 1.00 |
| Regular | 1.25-1.15 | 1.15-1.05 | 1.00-0.80 | 0.80 |
| Pobre | 1.15-1.05 | 1.05-0.80 | 0.80-0.60 | 0.60 |
| Muy pobre | 1.05-0.95 | 0.95-0.75 | 0.75-0.40 | 0.40 |

Fuente: (Iturbide, 2002, pág. 125)

## B. Coeficiente de drenaje para pavimentos rígidos (Cd)

"En el diseño de pavimentos rígidos se utilizan los coeficientes de drenaje ($C_d$), los cuales ajustan la ecuación de diseño que considera la resistencia de la losa, las tensiones y las condiciones de soporte." (Molina, 2018, pág. 3)

Tabla 13. Coeficiente de drenaje para pavimentos rígidos Cd

| Calidad del drenaje | P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación | | | |
|---|---|---|---|---|
| | < 1% | 1% - 5% | 5% - 25% | > 25% |
| Excelente | 1.25-1.20 | 1.20-1.15 | 1.15-1.10 | 1.10 |
| Bueno | 1.20-1.15 | 1.15-1.10 | 1.10-1.00 | 1.00 |
| Regular | 1.15-1.10 | 1.10-1.00 | 1.00-0.90 | 0.90 |
| Pobre | 1.10-1.00 | 1.00-0.90 | 0.90-0.80 | 0.80 |
| Muy pobre | 1.00-0.90 | 0.90-0.80 | 0.80-0.70 | 0.70 |

Fuente: (Iturbide, 2002, pág. 126)

## C. Tiempo de drenaje

Existen dos formas para calcular el tiempo de drenaje para la capa de un pavimento, estas son: la aproximación del tiempo para drenar y la del caudal constante. En el primero, el método del tiempo para drenar se considera únicamente el agua que se infiltra y en el segundo se consideran las fuentes de ingreso y egreso y las mismas son cuantificables y la base permeable se dimensiona para conducir los caudales de diseño. (Molina, 2018, pág. 4)

## 1.3. Fatiga en la mezcla asfáltica método de LANAME.

La fatiga ha sido una de las fallas más costosas de corregir durante el proceso de rehabilitación de la estructura del pavimento. La falla por fatiga ocurre cuando las cargas repetidas de los vehículos generan esfuerzos de tensión de suficiente magnitud para iniciar el agrietamiento que, eventualmente, se propaga hasta la superficie. (Loría, 2005, pág. 8)

"Algunos factores que contribuyen a esta forma de falla son una inadecuada estructura del pavimento, materiales de baja calidad en las capas inferiores o una mezcla asfáltica con propiedades inadecuadas." (Loría, 2005, pág. 8)

Para los diferentes niveles de tránsito, con el fin de verificar el desempeño o fatiga de las mezclas asfálticas, utilizando la función de transferencia de las ecuaciones.

Tabla 14. Umbrales de falla para porcentaje de área agrietada.

| Ejes equivalentes período de diseño | Porcentaje de área agrietada antes de la falla |
|---|---|
| < 3 millones | 75 % |
| 3 - 15 millones | 50 % |
| > 15 millones | 20 % |

Fuente: (Loría, 2005, pág. 8)

$$N_f = 0{,}00432\ x\ C\ x\ k'_1 \left(\frac{1}{E_t}\right)^{3{,}9492} \left(\frac{1}{E^*}\right)^{1{,}281}$$

$$C = 10^M$$

$$M = 4{,}84 \left[\frac{V_b}{V_a + V_B} - 0{,}69\right]$$

Donde:

- E*: Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi).
- $E_t$: Deformación por tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica (in/in).

- $V_b$: Contenido de asfalto efectivo (%).
- $V_a$: Porcentaje de vacíos (%).
- $k_1^{'}$: Parámetro de corrección según tipo de grieta.

Para agrietamiento de abajo – arriba.

$$k_1^{'} = \frac{1}{0{,}000398 + \frac{0{,}003602}{1 + e^{(11{,}02 - 3{,}49 * h_{ac})}}}$$

Donde:

- $h_{ac}$: Espesor de carpeta asfáltica (in).

Para estimar el daño por fatiga se utiliza la siguiente ecuación:

$$D = \sum_{i=1}^{T} \frac{n_i}{N_i}$$

Donde:

D: Daño.

T: Número total de periodos (puede considerarse un año).

$n_i$: Tráfico actual del periodo i.

$N_i$: Tráfico permitido bajo las condiciones que prevalecen del periodo i.

$$FC = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 * C_1^{'} + C_2^{'} * C_2^{''} * \log(D))}}\right) * \left(\frac{1}{60}\right)$$

Donde:

FC: Agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de la huella.

D: Daño por fatiga de abajo hacia arriba, en decimal.

$C_1$: 1,0

$C_1^{'}$: -2*$C_2^{'}$

$C_2^{'}$: 1,0

$$C_2^{''}: -2{,}40874 - 39{,}48 * (1 + h_{AC})^{(-2{,}856)}$$

$h_{AC}$: Espesor en pulgadas

## 1.4. Deformación permanente por el método de LANAMME

"Se recomienda realizar una revisión de la deformación permanente en mezcla asfáltica en caliente, materiales granulares y subrasante con el objetivo de minimizar el potencial de ahuellamiento en los pavimentos." (Loría, 2005, pág. 10)

Para verificar el potencial de ahuellamiento en las estructuras pavimentadas se utiliza la siguiente tabla:

Tabla 15. Umbrales de falla para deformación permanente.

| Ejes equivalentes período de diseño | Ahuellamiento permisible máximo |
|---|---|
| < 3 millones | 25 mm |
| 3 - 15 millones | 20 mm |
| > 15 millones | 12.7 mm |

Fuente: (Loría, 2005, pág. 11)

### 1.4.1. Deformación permanente de la mezcla asfáltica

"Se determina la deformación permanente en un pavimento con más de una carpeta asfáltica, el cual consiste en la suma de la deformación plástica acumulada y un parámetro en función del espesor de cada capa." (Loría, 2005, pág. 11)

$$PD = \sum_{i=1}^{n\ capas} \mathcal{E}_{p^i} * K_i$$

Donde:

- PD: Deformación permanente del pavimento.
- $\mathcal{E}_{p^i}$: Esfuerzo plástico total de la capa i.
- $h^i$: Espesor de la capa i.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = 10^{-3.4488} * T^{1.5606} * N^{0.479244}$$

Donde:

- $\varepsilon_p$: Deformación plástica acumulada a N repeticiones de carga (in/in).
- $\varepsilon_r$: Deformación vertical resiliente (in/in).
- T: Temperatura de la mezcla (°F).
- N: Número de repeticiones de carga.
- $K_i$: Parámetro de profundidad, calculado como:

$$K_1 = (C_1 + C_2 * d) * 0.328196^d$$

$$C_1 = -0.1039 * {h_{ac}}^2 + 2.4868 * h_{ac} - 17{,}342$$

$$C_2 = 0.0172 * {h_{ac}}^2 - 1.7331 * h_{ac} + 27.428$$

Donde:

- $h_{ac}$: Espesor total de la capa asfáltica (in).
- $d$: Profundidad media de la capa (in). (Loría, 2005, pág. 11)

### 1.4.2. Deformación permanente de la base y subbase granular

Depende de varios factores, los cuales pueden obtenerse de fuentes nacionales y de ensayos de laboratorio específicos.

$$\delta_a = \beta_1 * \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{p}{N}\right]^{\beta}} \varepsilon_v h$$

Donde:

- $\delta_a$: Deformación permanente para la capa/subcapa (in).
- N: Número de repeticiones de carga.
- $\varepsilon_v$: Deformación vertical elástica en la capa (in/in).
- h: Espesor (in).

$$\log \beta = -0.61119 - 0.017638 * Wc$$

$$\left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right) = \frac{\left(e^{(p)^{\beta}} * 0.15\right) + \left(e^{\left(\frac{\rho}{10^9}\right)^{\beta}} * 20\right)}{2}$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln\left[\frac{0.15}{20}\right]}{1 - (10^9)^{\beta}}\right]^{\frac{1}{\beta}}$$

$$W_c = 51.712 \left[\left(\frac{E_r}{2555}\right)^{\frac{1}{0.64}}\right]^{-0.3586 * GWT^{0.1192}}$$

Donde:

- Wc: Contenido de agua (%).
- Er: Módulo resiliente de la capa/subcapa (psi).
- GWT: Profundidad del nivel freático (pies).
- $\varepsilon_o$, $\beta$,$\rho$: Propiedades del material.

- $\varepsilon_r$: Deformación elástica utilizada en la prueba de laboratorio para obtener las propiedades del material ($\varepsilon_o$, $\beta$,$\rho$).
- $\varepsilon_v$: Deformación elástica promedio vertical en la capa/subcapa.
- h: Espesor de la capa/subcapa (in).
- $\beta_1$: Factor de calibración, 1.673 para bases/subbases granulares y 1.35 para la subrasante. (Loría, 2005, pág. 12)

### 1.4.3. Deformación permanente de la subrasante

La relación matemática para calcular la deformación plástica de la subrasante es un proceso un poco más complejo, pero las ecuaciones ya se encuentran simplificadas y con calcular la deformación plástica en dos puntos específicos. (Loría, 2005, pág. 19)

$$\varepsilon_p(z) = (\varepsilon_{p,z=0})e^{-kz}$$

Donde:

- $\varepsilon_p(z)$: Deformación vertical plástica a la profundidad z (medida desde la superficie de la subrasante).
- $\varepsilon_{(p,z=0)}$: Deformación vertical plástica en la superficie de la subrasante.
- z: Profundidad medida desde la superficie de la subrasante (in).
- k: Constante obtenida de la regresión.

Se calcula la deformación plástica para cada profundidad:

$$\varepsilon_p(z) = \beta_1 * \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{p}{N}\right]^{\beta}} \varepsilon_v$$

Se calcula el parámetro k:

$$k = \frac{1}{6}\ln\left(\frac{\varepsilon_{p,z=0}}{\varepsilon_{p,z=6}}\right)$$

La deformación permanente total se calcula como:

$$d\delta = \varepsilon_p(z)dz$$

$$\delta = \int_0^{h_{roca}} \varepsilon_p(z)dz$$

$$\delta = \varepsilon_{p,z=0}\int_0^{h_{roca}} e^{-kz}dz = \left(\frac{1 - e^{-kh_{roca}}}{k}\right) * \varepsilon_{p,z=0}$$

Donde:

- $\delta$: Deformación plástica total de la subrasante, in.
- $h_{roca}$: Profundidad de la capa rocosa, pies (z=0 representa la superficie de la subrasante).

Tabla 16. Umbrales de falla por deformación permanente.

| Ejes equivalentes período de diseño | Ahuellamiento permisible máximo |
|---|---|
| < 3 millones | 25 mm |
| 3 - 15 millones | 20 mm |
| > 15 millones | 12.7 mm |

Fuente: (Loría, 2005, pág. 11)

## 1.5. Fatiga en la mezcla asfáltica por el método del MOPT

Para determinar la capacidad de carga por fatiga de la capa asfáltica se utiliza la siguiente ecuación:

$$N_f = 1.0226x10^{25} * \left[\frac{1}{E_t}\right]^{6.308} * \left[\frac{1}{MR}\right]^{0.810}$$

Donde:

$N_f$: Número de repeticiones de carga para la falla por fatiga.

$E_t$: Deformación unitaria máxima a la tensión en la capa asfáltica.

MR: Módulo resilente del concreto asfaltico (kPa). (MOPT, 2007, pág. 3)

## 1.6. Deformación permanente por el método del MOPT

Para determinar la capacidad de carga por deformación plástica de subrasante se utiliza la siguiente ecuación:

$$N_R = 1.365x10^{-9} * \left[\frac{1}{Evs}\right]^{4.477}$$

Donde:

$N_R$: Número de repeticiones de carga para la falla por deformación permanente.

Evs: Deformación unitaria máxima a la compresión de la subrasante. (MOPT, 2007, pág. 3)

# Capítulo II Marco Situacional

## 2. Marco Situacional

### 2.1. Municipalidad de Palmares

#### 2.1.1. Historia de la Municipalidad de Palmares

En aquellos tiempos Palmares era un pueblo pobre y pequeño con viviendas simples. La mayoría eran rachas de paja y pocas de madera. De esta manera el centro del cantón no era nada más que un caserío desordenado y muchas de las viviendas obstaculizaban la vía pública. Por ello, la Municipalidad decidió darle a cada uno de los propietarios de los ranchos la suma de 20 colones como compensación por el desalojo de sus casas para así poder ampliar las calles. (Municipalidad de Palmares, 2016, párr. 1)

En el año 1913 la Municipalidad de San Ramón impulsó ante el Congreso un proyecto que pretendía formar una provincia con su territorio junto con los cantones de Palmares y Naranjo. De acuerdo con esta propuesta Palmares dejaría de ser el cantón séptimo de la provincia de Alajuela y pasaría hacer el primero cantón de esta nueva provincia. El pueblo palmareño se opuso y ante las protestas los diputados de Alajuela solicitaron un plebiscito para decidir la suerte del lugar. (Municipalidad de Palmares, 2016, párr. 2)

La municipalidad de Palmares también se hizo notar e hizo ver al gobernador de la provincia de Alajuela que los palmareños no tenían queja con el ordenamiento y delineamiento territorial vigente. Por ello, no se concretó el anhelo ramonense de convertirse en provincia. (Municipalidad de Palmares, 2016, párr. 3)

**Edificio Municipal**

Al principio el municipio no contaba con un edificio propio para las funciones administrativas, por lo que tuvo que ocupar diversos inmuebles por tiempos cortos; hasta que en 1903 la Alcaldía decidió adquirir un terreno para la construcción de la sede municipal y la cárcel. La propiedad que compraron pertenecía a don Santos Sancho, era un terreno que se

ubicaba frente a la plaza (actual parque); en aquel tiempo costó 2500 colones, los cuales fueron cancelados en pagos de cincuenta colones mensuales. Luego se decidió comprar al mismo señor su casa de habitación que estaba ubicada a la par del lote ya adquirido por la cantidad, este en 8000 colones, en ese lugar se pretendía ubicar la municipalidad, por un tiempo mientras se construía la nueva. (Municipalidad de Palmares, 2016, párr. 4)

El 1 de junio de 1905 el Consejo Municipal acordó dar inicio a los trabajadores de la construcción del municipio y se nombró como encargado de obras a Ricardo Fernández. Un año después la Municipalidad decidió sustituir al maestro de obras y entregar los trabajos de dirección e inspección del Padre, Bernardo Gómez. El Palacio Municipal fue inaugurado en el año 1983, su infraestructura está hecha a base de block y ostenta una fachada conformada por cinco grandes arcos que se extienden hacia sus dos niveles. (Municipalidad de Palmares, 2016, párr. 5)

### 2.1.2. Misión

Fomentar acciones de desarrollo local y promover mejoramiento en la calidad de vida de sus ciudadanos (as), con una excelente gestión municipal y la permanente participación activa y consistente de la ciudadanía (Municipalidad de Palmares, 2016, párr 1).

### 2.1.3. Visión

“Ser una organización innovadora, ágil y eficiente, con capacidad para enfrentar, impulsar el desarrollo local y satisfacer las demandas de la población palmareña.” (Municipalidad de Palmares, 2016, párr 2).

## 2.2. Cantón de Palmares

### 2.2.1. Limitación de Palmares

Palmares limita con los cantones de San Ramón, Naranjo y Atenas y se encuentra rodeado por el cerro del Cerro del Espíritu Santo y las estribaciones de los Montes del Aguacate: Cerros de Pata de Gallo, Berlín, La Cruz, La Tinaja, La Cima y La Piedra de San Isidro. (Hernández, 2000)

### 2.2.2. Área y Población

Con una extensión de 45 $km^2$, es el más pequeño de los cantones de la provincia de Alajuela, pero el más densamente poblado, con aproximadamente 836 habitantes por $km^2$ y una población global de 37 621 habitantes (2008). (Castillo, 2011)

### 2.2.3. Geología, Geomorfología y suelos

En lo que se refiere al origen geológico, el área, está constituida por materiales de los períodos Terciarios y Cuaternarios; siendo las rocas volcánicas del Terciario las que predominan en la región. Por otro lado, se considera la zona de Palmares como una estribación de la formación basalto andesítica del Aguacate, la cual encierra una serie de depósitos lacustres, restos de un gran lago que originó probablemente una colada de lava bajada del macizo del Poás que fue a taponar el valle colector de las aguas de la comarca. Con cuatro series de suelos en la zona: basalto y andesita, aluvium otra sobre los sedimentos lacustres y una cuarta desarrollada sobre material mixto de aluvium y lacustre. (Chinchilla, 1987)

La región de Palmares fue en tiempos geológicos un gran lago, que se formó a finales del Plioceno o a principio del Pleistoceno como parte de una fuerte actividad volcánica del Macizo Central, cuando una colada de lava bajada del Poás cerró dicho valle colector y propició la acumulación de gran cantidad de agua dentro del valle truncado, originando un lago de notable extensión, que llegó a abarcar miles de hectáreas. Se ha creado la hipótesis de que una lagunilla ubicada en el potrero de la sucesión de don Marcelino Fernández puede considerarse como el resto de aquel inmenso lago. (Hernández, 2000)

### 2.2.4. División Política

El cantón de Palmares se divide en siete distritos, a saber: Centro, Zaragoza, Buenos Aires, Esquipulas, La Granja, Candelaria y Santiago, a su vez, poseen sus caseríos, como de seguido se detalla:

- Centro: San Vicente, El Valle y el Barrio del Colegio.

- Zaragoza: Rincón de Zaragoza, Calle Vargas y La Cocaleca.
- Buenos Aires: Calle Ramírez, Bajo la Cabra, Calle El Barrial, La Y Griega y Tres Marías.
- Santiago: Las Quebradas, Proyecto San José y La Mina.
- Esquipulas: El Común, La Mona y Josema.
- La Granja: San Gerardo o Proyectos, Madre Verde y Calle Brujos.

Candelaria: Los Pinos, La Chata y Los Torunes.

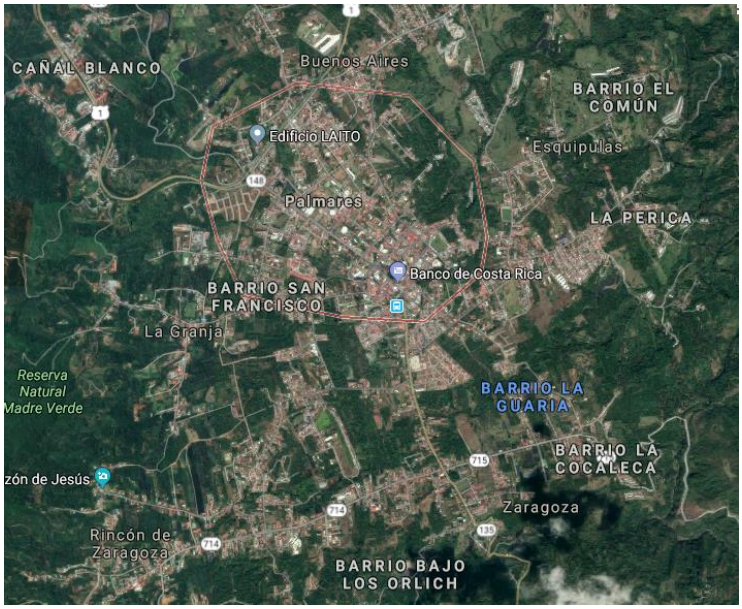



Figura 7. Mapa del cantón de Palmares.

Fuente: (Google Maps, 2018)

### 2.2.5. Población de Palmares

Tabla 17. Población por distrito

| Distrito | Población 2018 |
|---|---|
| Palmares Centro | 3,753 |
| Zaragoza | 9,451 |
| Buenos Aires | 8,566 |
| Santiago | 3,214 |
| Candelaria | 2,333 |
| Esquipulas | 7,963 |
| La Granja | 4,720 |

Fuente: (Estimacion y Proyeccion de Población Distrital, 2014)

Tabla 18. Población total de hombres y mujeres que viven en el cantón.

| Cantón | Hombres | Mujeres | Total |
|---|---|---|---|
| Palmares | 19,975 | 20,025 | 40,000 |

Fuente: (Estimacion y Proyeccion de Población Distrital, 2014)

**Calle Brujos:** Lugar: La Granja

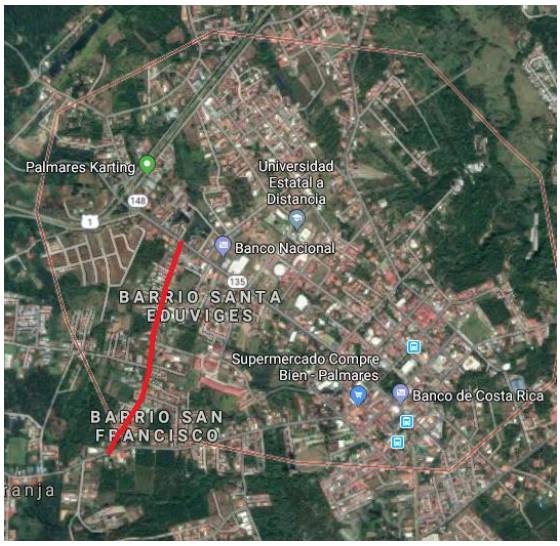



Figura 8. Mapa de calle brujos del cantón de Palmares.

Fuente: (Google Maps, 2018)

**Calle Mora:** Lugar: Centro de Palmares

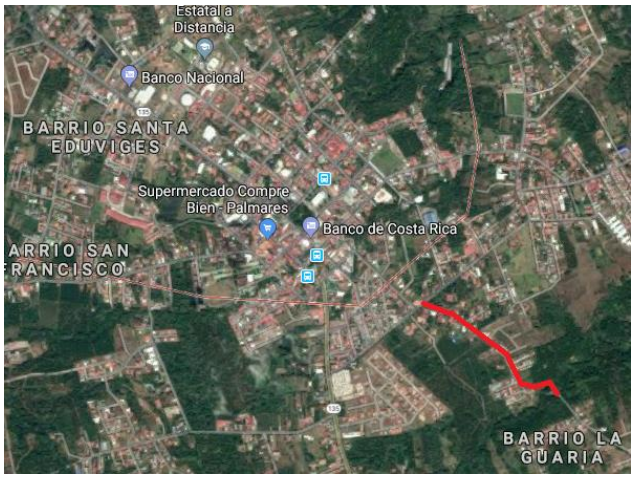



Figura 9. Mapa de calle la feria del cantón de Palmares.

Fuente: (Google Maps, 2018)

# Capítulo III Marco metodológico

## 3.1. Método de investigación

El método por utilizar es cuantitativo debido a que se recopilan y analizan datos para poder obtener los resultados de la investigación, es decir, es una forma estructurada de calcular datos obtenidos de distintas actividades. La investigación cuantitativa implica el uso de herramientas informáticas, estadísticas y matemáticas para poder obtener los resultados necesarios.

## 3.2. Operacionalización de variables

Las variables por identificar son los espesores de las capas de mezcla asfáltica, base, subbase y la losa de concreto para el diseño de pavimentos, este con el fin de ver cuál es el espesor necesario para que los diseños de pavimentos tengan una mayor vida útil y sean de mayor provecho para las personas que transitan con sus vehículos por dichas calles. Así como también sus debidas deformaciones y presupuestos.

## 3.3. Población y muestra

La población es la calle por donde transitan los vehículos, que no está en buen estado y la muestra son los vehículos que pasan por ella.

## 3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Se utilizarán norma AASHTO, reglamentos y códigos específicos para el diseño de cada pavimento, así como hojas de Excel y programas computarizados como: PITA PAVE-10, WFW 3.0 y AUTOCAD 2017.

### 3.4.1. Diseño de pavimentos flexible

Para el diseño de pavimentos flexible se utilizará la siguiente fórmula:

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

Donde:

$W_{t18}$: Número de aplicaciones de cargas equivalentes de 80 kN acumuladas en el periodo de diseño.

$Z_R$: Valor de desviador de una curva de distribución normal, función de la confiabilidad del diseño (R) o grado confianza en que las cargas de diseño no serán superadas por las cargas reales aplicadas sobre el pavimento.

$S_o$: Desviación estándar del sistema, función de posibles variaciones en las estimaciones de tránsito (cargas y volúmenes) y comportamiento del pavimento a lo largo de su vida de servicio.

$\Delta$PSI: Pérdida de serviciabilidad (condición de servicio) prevista en el diseño, y medida como la diferencia entre la planitud (calidad de acabado) del pavimento al concluirse su construcción (serviciabilidad inicial $p_o$ y su planitud al final del periodo de diseño.

$M_R$: Módulo resiliente de la subrasante y de las capas de bases y sub-base granulares, obteniendo a través de ecuaciones de correlación con la capacidad portante (CBR) de los materiales.

SN: Número estructural, o capacidad de la estructura para soportar las cargas bajo las condiciones (variables independientes) de diseño. (Iturbide, 2002, pág. 140)

#### 3.4.1.1. Variables en función del tiempo

Las dos variables que se deben de tomar en cuenta son el período de diseño y la vida útil del pavimento. El periodo de diseño es el tiempo para el

que se diseña un pavimento en función del tránsito y el tiempo que se considere apropiado para que las condiciones externas cambien drásticamente. La vida útil es el tiempo que pasa desde que se construye el pavimento hasta que el mismo alcanza el mínimo de serviciabilidad.

*Figura 10. Periodo de diseño.*

| Condiciones de la ruta | Periodo de análisis (años) |
|---|---|
| Urbana de alto volumen | 15 - 20 |
| Rural de alto volumen | 10 - 15 |
| Pavimentada de bajo volumen | 8 - 12 |
| Superficie de agregados de bajo volumen | 5 - 8 |

Fuente: (LanammeUCR, 2009)

### 3.4.1.2. Variable en función del tránsito

Es el número de repeticiones de ejes equivalentes de 80Kn, es decir los ESAL´s.

### 3.4.1.3. Nivel de confianza (R)

Es la probabilidad de que el desempeño del diseño de pavimento se desarrolla de manera satisfactoria debido a las cargas de tránsito y a las condiciones climáticas durante el período de diseño.

Tabla 19. Nivel de confianza (R).

| Clasificación funcional | Nivel de confiabilidad recpmendado ( R ) % | |
|---|---|---|
| | Urbano | Rural |
| Autopistas | 85 - 99.9 | 80 - 90.9 |
| Arterias principales | 80 - 99 | 75 - 95 |
| Colectores | 80 - 95 | 75 - 95 |
| Locales | 50 - 80 | 50 - 80 |

Fuente: (Iturbide, 2002)

### 3.4.1.4. Desviación estándar ($S_o$)

Es el número de ejes que puede soportar un pavimento hasta que su índice de serviciabilidad descienda por debajo de un determinado $P_t$.

$S_o$ pavimentos flexibles: 0.40 – 0.50 (valor comúnmente utilizado: 0.45).

### 3.4.1.5. Módulo de resiliencia ($M_R$)

Para calcular el módulo de resiliencia se utiliza la siguiente fórmula:

$$Uf = 1.18x10^{8} * Mr^{-2.32}$$

Las fórmulas que se muestran a continuación demuestran la necesidad de desarrollar módulos para obtener valores de módulos para los materiales nacionales.

Subrasantes y suelos:

$M_R$ = 1862*$CBR^{0.7125}$

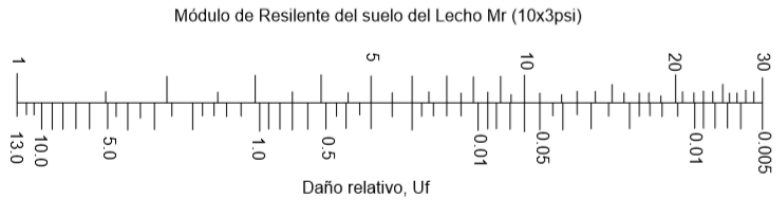



Figura 11. Correlación entre el valor de soporte del suelo (S) y el CBR

Fuente: (Rico Rodríguez, Téllez Gutiérrez, & Garnica Anguas, 1998, pág. 80)

### 3.4.1.6. Índice de serviciabilidad (ΔPSI)

El índice de serviciabilidad se explicó en el apartado 2.2.5.

- Índice de serviciabilidad inicial:

$P_O$ = 4.2 para pavimentos flexibles.

- Índice de serviciabilidad final:

$P_t$: 2.5 o más para caminos muy importantes.

$P_t$: 2.0 para caminos de tránsito menor. (Iturbide, 2002, pág. 142)

A continuación, se presenta el nomograma según AASHTO 1993 para la determinación del número estructural:

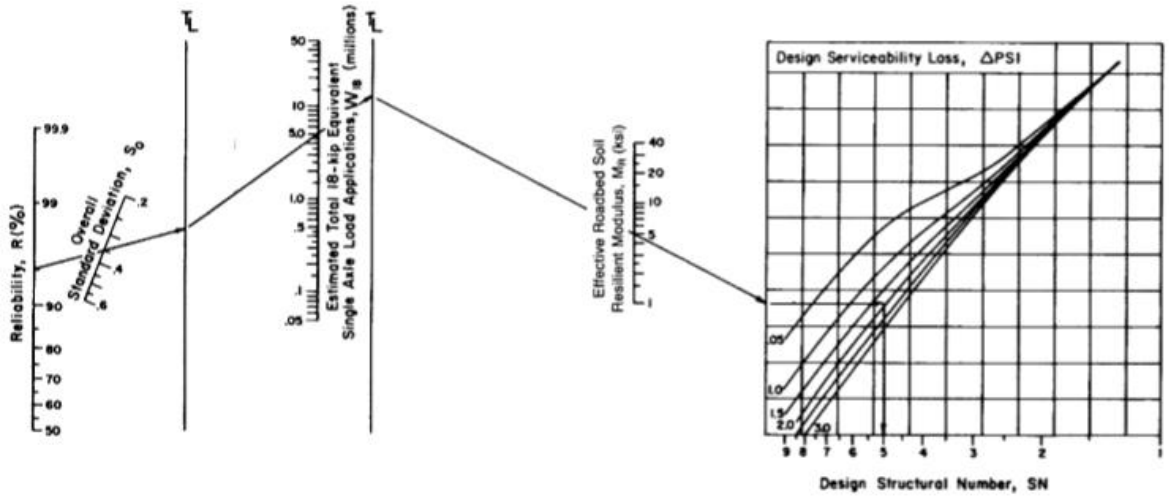



Figura 12. Nomograma para la determinación del número estructural.

Fuente: (Rico Rodríguez, Téllez Gutiérrez, & Garnica Anguas, 1998, pág. 74)

La importancia del número estructural, es la relación que se establece con la fórmula que se presenta a continuación:

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

Donde:

- ✓ $a_1$, $a_2$ y $a_3$: Coeficiente de capas representativas de carpeta, base y subbase respectivamente.
- ✓ $m_2$ y $m_3$: Coeficiente de drenaje para base y subrasante.
- ✓ $D_1$, $D_2$ y $D_3$: Espesores de la carpeta, base y subrasante.

(Rico Rodríguez, Téllez Gutiérrez, & Garnica Anguas, 1998, pág. 68)

Para poder calcular los valores de $a_1$ (capa asfáltica), $a_2$ (base) y $a_3$ (subbase) se utilizan las siguientes figuras 11, 12 y 15 de la Guía de AASHTO 1993:

- Coeficiente estructural a partir del módulo estático del concreto asfaltico. Para calcular los valores de $a_1$, $a_2$ y $a_3$, esto con base en las figuras 11, 12 y 13

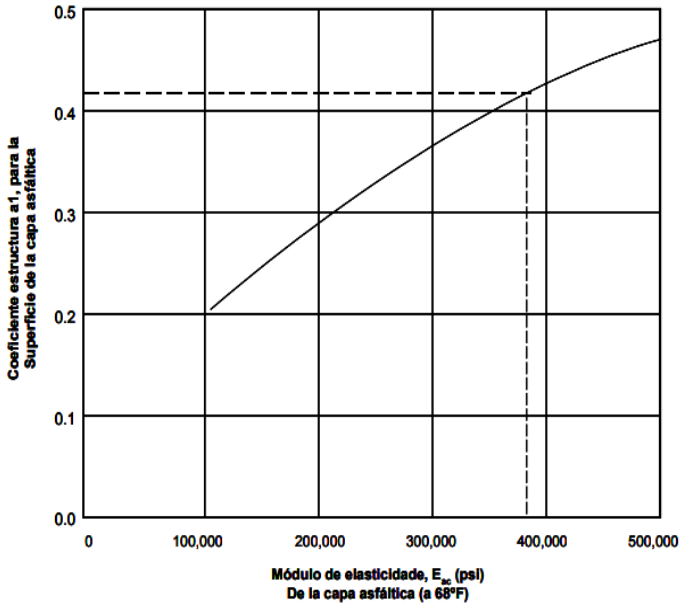



Figura 13. Módulo de elasticidad.

Fuente: (Rico Rodríguez, Téllez Gutiérrez, & Garnica Anguas, 1998)

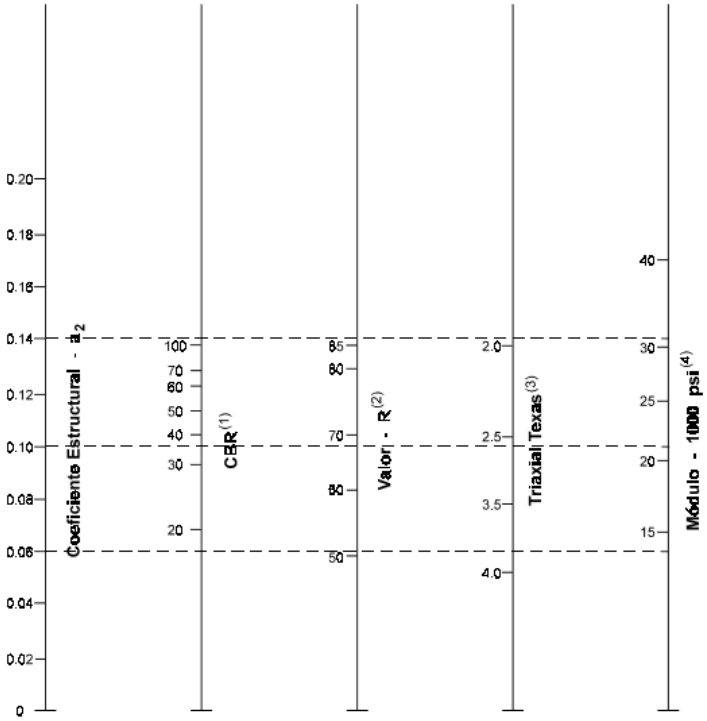



*Figura 14. Coeficiente estructural a2 para la capa de base.*

Fuente: (Rico Rodríguez, Téllez Gutiérrez, & Garnica Anguas, 1998, pág. 76)

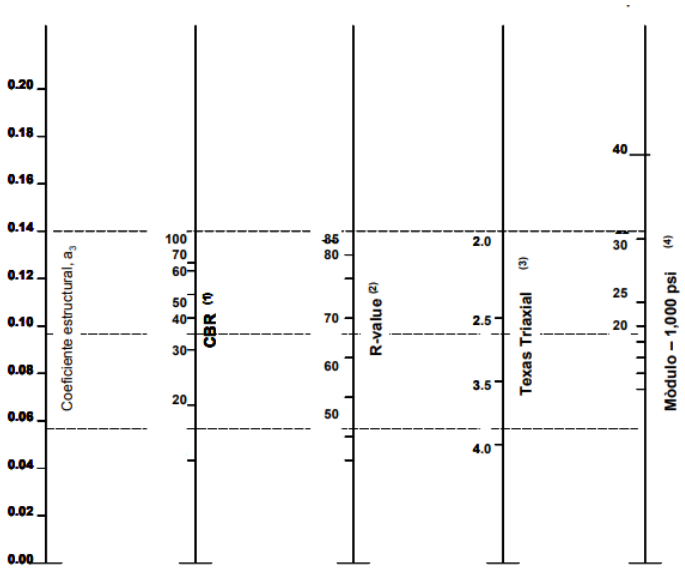



Figura 15. Coeficiente estructural a3 para la capa de subbase.

Fuente: (Rico Rodríguez, Téllez Gutiérrez, & Garnica Anguas, 1998, pág. 77)

### 3.4.2. Diseño de pavimentos rígidos:

La siguiente fórmula es precisamente para el diseño de pavimentos rígido según el método AASHTO 1993.

$$Log_{10}W_{18} = Z_r\, S_o + 7.35 * Log_{10}\,(D+1) - 0.06 + \frac{Log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1+\frac{1.624\,x\,10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32P_t)x\, Log_{10}\left(\frac{S'_c\, C_d\,(D^{0.75}-1.132}{215.63\,x\,J\left(D^{0.75}-\frac{18.42}{(E_c/K)^{0.25}}\right)}\right)$$

Donde:

$W_{82}$: Número previsto de ejes equivalentes de 80kN, a lo largo del periodo de diseño.

$Z_r$: Desviación normal estándar.

$S_o$: Error estándar combinado en la predicción del tránsito y en la variación del comportamiento esperado del pavimento.

D: Espesor de pavimento de concreto (mm).

$\Delta$PSI: Diferencia entre los índices de servicio inicial y final.

$P_t$: Índice de serviciabilidad final.

$M_R$: Resistencia media del concreto (MPa) a flexo tracción a los 28 días.

$C_d$: Coeficiente de drenaje.

J: Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas.

$E_c$: Módulo de elasticidad del concreto (MPa).

K: Módulo de reacción de la base, subbase o subrasante en la que se apoya el pavimento de concreto. (Iturbide, 2002, pág. 190)

A continuación, se presenta el nomograma según AASHTO 1993 para el diseño de pavimentos rígidos

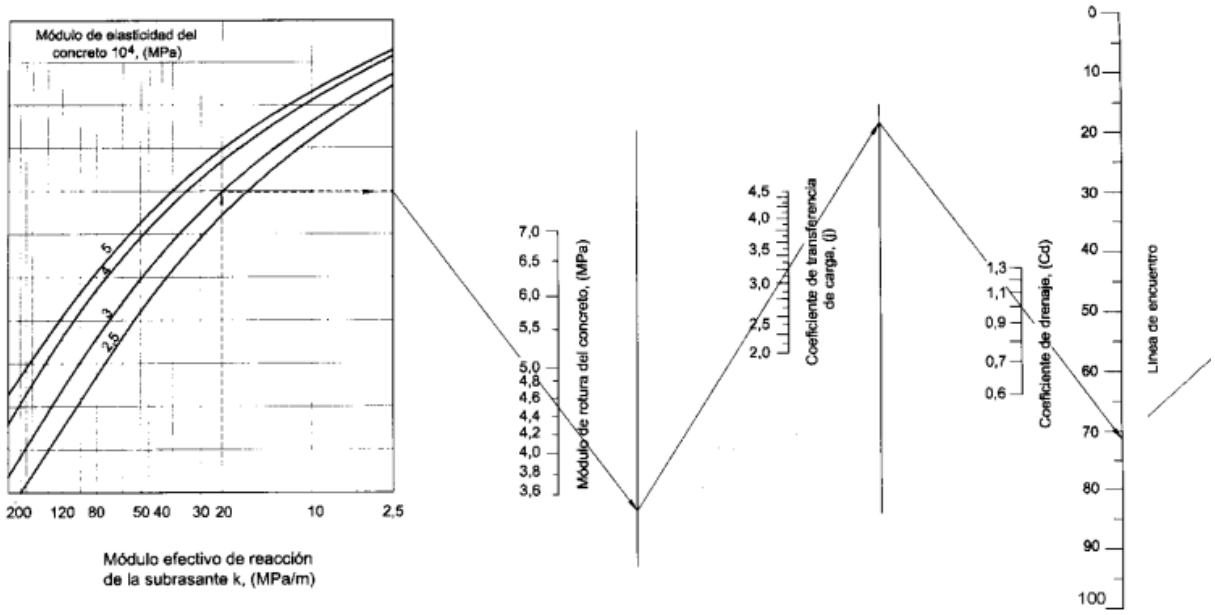



Figura 16. Nomograma AASHTO 1993 para diseño de pavimentos rígidos

Fuente: (Molina, 2018, pág. 1)

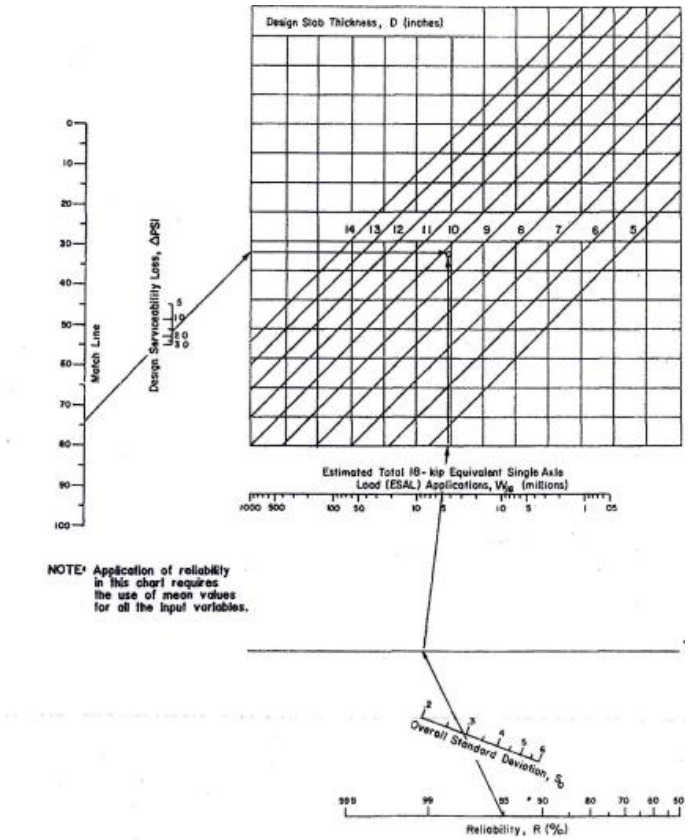



*Figura 17. Nomograma AASHTO 1993 para diseño de pavimentos rígidos.*

Fuente: (Molina, 2018, pág. 2)

Es importante conocer las variables que conforman el nomograma anterior.

#### 3.4.2.1. Ejes simples equivalentes ($W_{18}$)

En el método de AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos, se deben transformar los ejes de diferentes pesos que circulan por el pavimento a ejes equivalentes de 80Kn.

#### 3.4.2.2. Desviación estándar ($S_o$)

Es el error estadístico presente en las ecuaciones de diseño debido a la variabilidad en los materiales, construcción, etc.

La AASHTO recomienda emplear los siguientes valores:

- $S_o$: 0.39 cuando se considera la variación del tránsito previsto.
- $S_o$: 0.34 cuando no se considera la variación del tránsito previsto.

### 3.4.2.3. Nivel de confianza (R)

Es la probabilidad estadística que un pavimento alcance la vida de diseño para lo cual fue proyectada.

Tabla 20. Niveles de confianza R en función del tipo de carretera.

| **Clasificación Funcional** | **Nivel de Confiabilidad Recomendado** | |
|---|---|---|
| | **Urbano** | **Rural** |
| Autopistas | 85 – 99,9 | 80 – 99,9 |
| Arterias Principales | 80 – 99 | 75 – 99 |
| Colectoras | 80 – 95 | 75 – 95 |
| Locales | 50 – 80 | 50 – 80 |

Fuente: (Iturbide, 2002, pág. 195)

### 3.4.2.4. Coeficiente de drenaje (Cd)

La calidad de drenaje se puede especificar con la siguiente tabla.

Tabla 21. Valores de coeficiente de drenaje Cd

| **Calidad de drenaje** | **Porcentaje del tiempo que la estructura del pavimento se encuentra expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **< 1%** | **1% - 5%** | **5% – 25%** | **> 25%** |
| Excelente | 1,25 – 1,20 | 1,20 – 1,15 | 1,15 – 1,10 | 1,10 |
| Buena | 1,20 – 1,15 | 1,15 – 1,10 | 1,10 – 1,00 | 1,00 |
| Regular | 1,15 – 1,10 | 1,10 – 1,00 | 1,00 – 0,90 | 0,90 |
| Pobre | 1,10 – 1,00 | 1,00 – 0,90 | 0,90 – 0,80 | 0,8 |
| Muy Pobre | 1,00 – 0,90 | 0,90 – 0,80 | 0,80 – 0,70 | 0,7 |

Fuente: (Iturbide, 2002, pág. 197)

Donde:

- Drenaje excelente: el suelo drena al 50% de su saturación en 2 horas.
- Drenaje bueno: el suelo drena al 50% de su saturación en 1 día.
- Drenaje regular: el suelo drena al 50% de su saturación en 7 días.
- Drenaje pobre: el suelo drena al 50% de su saturación en 1 mes.
- Drenaje muy pobre: el suelo no drena.

#### 3.4.2.5. Índice de serviciabilidad

Los valores recomendados por experiencia para los pavimentos rígidos son:

- ✓ Índice de serviciabilidad inicial:

$P_O$: 4.5 para pavimentos rígidos.

- ✓ Índice de serviciabilidad final:

$P_t$: 2.5 o más para caminos muy importantes.

$P_t$: 2.0 para caminos de transito menor (Iturbide, 2002, pág. 196)

#### 3.4.2.6. Coeficiente de transmisión de carga (J)

Este factor se utiliza para tomar en cuenta la capacidad del pavimento de concreto de transmitir las cargas a través de los extremos de las losas.

En función de estos parámetros, se indican en la siguiente tabla los valores del coeficiente J:

Tabla 22. Coeficiente de transmisión de carga.

| | hombro | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Elemento de transmisión de carga | | | |
| | Concreto asfáltico | | Concreto hidráulico | |
| **Tipo de pavimento** | **si** | **no** | **si** | **no** |
| No reforzado o reforzado con juntas | 3.2 | 3.8 – 4.4 | 2.5 – 3.1 | 3.6 – 4.2 |
| Reforzado continuo | 2.9 – 3.2 | ------ | 2.3 – 2.9 | ------ |

Fuente: (Iturbide, 2002, pág. 198)

### 3.4.2.7. Módulo de elasticidad del concreto EC

Para calcular el módulo de elasticidad del concreto se utiliza la siguiente tabla:

Tabla 23. Módulo de elasticidad del concreto.

| Tipo de agregado y origen | Módulo de Elasticidad $E_c$, Mpa | Mòdulo de Elasticidad $E_c$, Kg/cm$^2$ |
|---|---|---|
| Grueso – Ígneo | $E_c = 5{,}500 \times (f'_c)^{1/2}$ | $E_c = 17{,}000 \times (f'_c)^{1/2}$ |
| Grueso - Metamórfico | $E_c = 4{,}700 \times (f'_c)^{1/2}$ | $E_c = 15{,}000 \times (f'_c)^{1/2}$ |
| Grueso – Sedimentario | $E_c = 3{,}600 \times (f'_c)^{1/2}$ | $E_c = 11{,}500 \times (f'_c)^{1/2}$ |
| Sin Información | $E_c = 3{,}900 \times (f'_c)^{1/2}$ | $E_c = 12{,}500 \times (f'_c)^{1/2}$ |

Fuente: (Iturbide, 2002, pág. 199)

### 3.4.2.8. Módulo de ruptura (psi) del concreto (S´c)

Es la resistencia del concreto a la flexión o ruptura. Cada proyecto en específico tendrá un valor diferente de Módulo de rotura, el cual depende de las exigencias del terreno de fundación y de fabricante. (Iturbide, 2002, pág. 199)

### 3.4.2.9. Módulo de reacción k

El módulo de reacción k de la superficie en que se apoya el pavimento de concreto, es el valor de la capacidad de soporte del suelo. El valor de k puede ser estimado si Mr de la subrasante es un valor conocido. (Iturbide, 2002, pág. 200)

Se presentan a continuación los tres casos que pueden presentarse en un diseño de pavimentos rígido:

1. **<u>Sin subbase:</u>**

Se dispone que el pavimento se coloque directamente sobre el terreno de fundación, es decir la subrasante. La cual para este caso el valor de k se obtiene de la siguiente formula:

$$k = \frac{Mr}{19.4} \quad k\ en\ pci\ y\ Mr\ en\ psi$$

2. **<u>Con subbase:</u>**

Cuando el pavimento rígido tiene una capa de subbase. Para encontrara el valor de k en este caso se utiliza la siguiente figura 17:

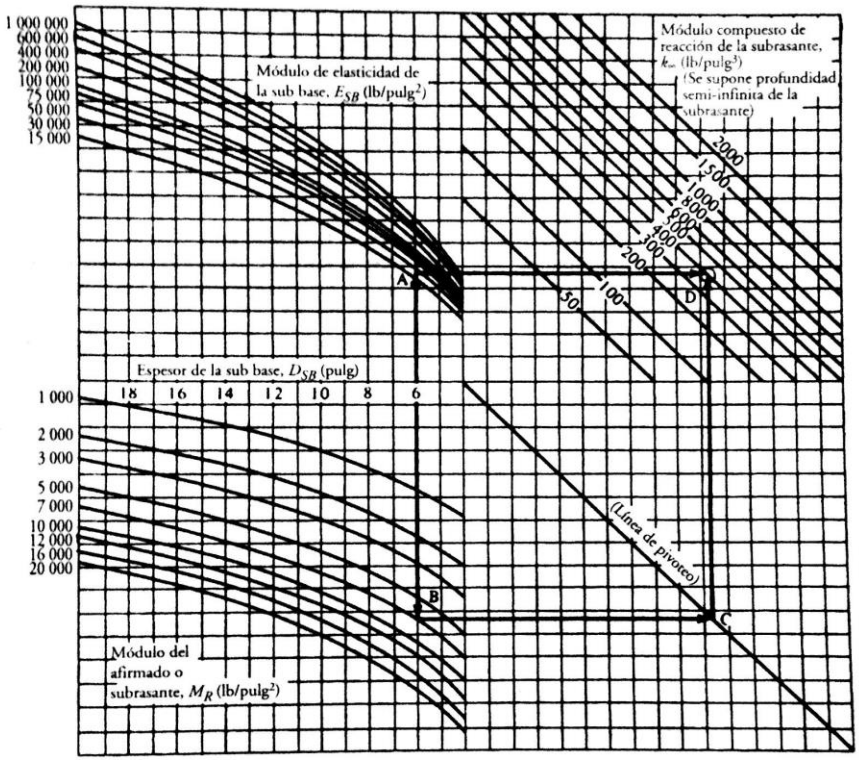


Figura 18. Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita

Fuente: (Molina, 2018, pág. 1)

**3. <u>Con roca debajo de la subrasante:</u>**

Para encontrar el valor de k en este caso se utiliza la siguiente figura.

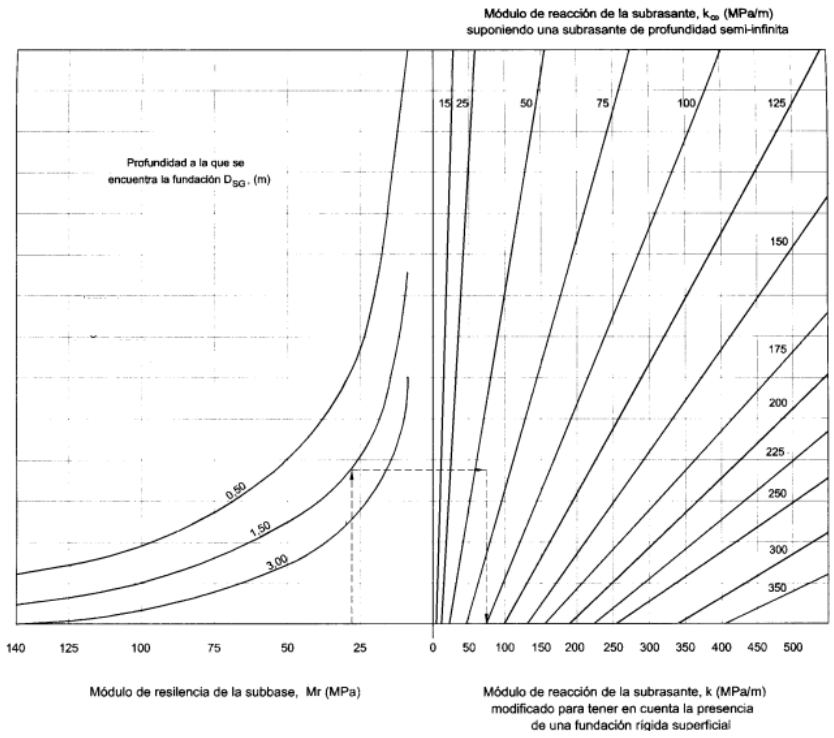



Figura 19. Nomograma para corregir el valor de K por la presencia de una capa rígida (estrato de roca a menos de 3 metro)

Fuente: (Molina, 2018, pág. 3)

### 3.5.2.10. Factor de pérdida de soporte $L_S$

El valor de $L_S$ representa la perdida pde soporte que puede llegar a tener las losas de un pavimento de concreto por efecto de la erosión en la subbase o por asentamiento diferenciales de la subrasante.

La siguiente tabla muestra los valores de $L_s$ para los diferentes tipos de subbases y bases, según la AASHTO 1993. (Iturbide, 2002, pág. 199)

Figura 20. Valores del factor de perdida de soporte Ls

| Tipos de subbase o base | Factor de pérdida de soporte |
|---|---|
| Subbases granulares tratadas con cemento (Mr : de 7,000 a 14,000 Mpa) | 0.00 a 1.00 |
| Subbases tratadas con cemento (Mr : de 3,500 a 7,000 Mpa) | 0.00 a 1.00 |
| Bases asfálticas (Mr : de 2,500 a 7,000 Mpa) | 0.00 a 1.00 |
| Subbases estabilizadas con asfalto (Mr : de 300 a 2,000 Mpa) | 0.00 a 1.00 |
| Estabilización con cal (Mr : de 150 a 1,000 Mpa) | 1.00 a 3.00 |
| Materiales granulares sin tratar (Mr : de 100 a 300 Mpa) | 1.00 a 3.00 |
| Suelos finos y subrasantes naturales (Mr : de 20 a 300 Mpa) | 2.00 a 3.00 |

Fuente: (Iturbide, 2002, pág. 200)

# 4. Cronograma

| Cronograma Proyecto Final de Graduación | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Actividad / Semana** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Fechas** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Índice de Proyecto** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Conteo de Vehículos** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Elaboración del contenido** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Reunión con tutor** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Revisión de objetivos y metas** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Entrega del primer informe parcial a tutor y lector** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Realizar cálculos de diseño y planos** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Revisión final** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Reunión con tutor** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Entrega de borrador final al lector y tutor** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Entrega de borrador del documento** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Defensa de proyecto** | | | | | | | | | | | | | | | | | |

# Capítulo IV. Análisis de resultados

En este capítulo se definen los cálculos realizados para formular las conclusiones de dicho trabajo, debido a un problema real. Se diseñarán pavimentos flexibles y rígidos para Calle Brujos y Calle Mora del cantón de Palmares.

Al analizar las calles, se observa que la topografía de las mismas es plana, las dos con un desnivel pequeño, pero en general es plana a lo largo de la vía. Se utilizaron estudios de suelos de algunos trabajos que se hicieron a la par de las calles, debido a que la municipalidad no contaba con los estudios de suelos de las vías en sí; de igual forma, estos estudios nos ayudaron para identificar los valores que necesitábamos para el desarrollo del proyecto.

Calle Brujos es una calle existente, está ubicada en el distrito de La Granja, es una calle muy transitada, ya que es muy cercana a la salida de Palmares, su longitud es de 900m y de ancho promedio a los 6m, con un carril por sentido. Esta calle presenta mucho agrietamiento y no se le da mantenimiento.

En la siguiente imagen se muestra Calle Brujos:

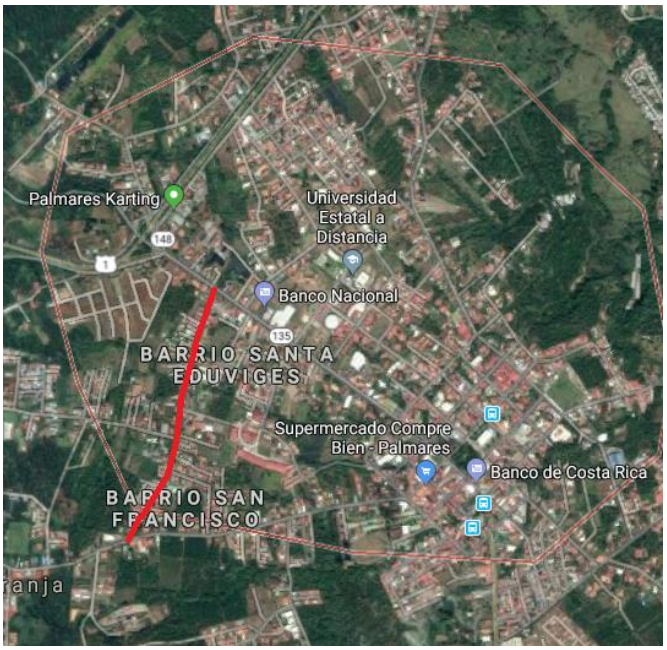


Figura 21. Ubicación Calle Brujos.

Calle Mora es una calle existente, está ubicada en el distrito Central, es una calle poco transitada, su longitud es de 600m y de ancho promedio a los 6m, con un carril por sentido. Esta calle presenta agrietamiento, muchos bacheos y no se le da mantenimiento.

En la siguiente imagen se muestra Calle Mora:

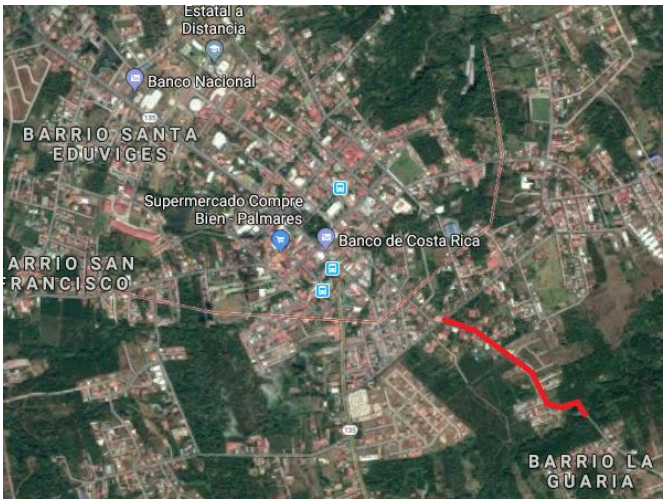



Figura 22. Ubicación Calle Mora.

### 4.1.1. Datos que se utilizan para los diseños de pavimento flexible de ambas calles.

El primer paso para diseñar un pavimento es el conteo vehicular, donde se suma un porcentaje de la distribución de volumen de una estación, posteriormente se suma el total de vehículos que se contó y ese dato se multiplica por cien y se divide entre el porcentaje obtenido anteriormente y el resultado se multiplica por el factor diario de cada día y así con los 3 días que se contaron y de las 3 se escoge el más alto.

Para obtener el tránsito promedio diario anual se utilizaron las tablas que están en los anexos tablas 59 y 60.

A continuación, se muestran los valores que se utilizarán para el cálculo de ESAL:

El factor camión lo obtenemos según la tabla 4.

Tabla 24. Valores de diseño para calcular ESAL.

| Factor camión | |
|---|---|
| Vehículo | Máximo |
| Pick up | 0.02 |
| C2 + | 0.07 |
| C2 - | 0.63 |
| C3 | 1.28 |
| Buses | 2.29 |
| T3 - S2 | 2.38 |
| Livianos | 0.005 |

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos que se muestran a continuación se utilizan para determinar los números estructurales (SN), utilizando las figuras 12, 13, 14 y 15 y así encontrar los espesores que tendrán cada capa.

Tabla 25. Datos para calcular el SN.

| Variables de diseño | Valor | Descripción | Referencia |
|---|---|---|---|
| Módulo de resiliencia de la base | 28500 | Cuando no se conoce exactamente el CBR que tiene la base, se recomienda utilizar un Mr: 30000 psi. | ----- |
| Módulo de resiliencia de la subbase | 15000 | Cuando no se conoce exactamente el CBR que tiene la subbase, se recomienda utilizar un Mr: 30000 psi. | ----- |
| Módulo de resiliencia de la subrasante | 3181 | El módulo de resiliencia indica que oara suelos y subrasantes es necesario utilozar Mr: 1500*CBR. | Apartado 4.2.4. Módulo de resiliencia. |
| CBR de subrasante | 2 | Se supuso un valor de 2, debido a que la subrasante tiene un rango de 0 - 7 | ----- |
| R | 80% | Se determina un 80% del desempeño de diseño de pavimento, debido a las cargas de tránsito. | Tabla 17. Nivel de confianza. |
| So | 0.45 | El número de ejes, para el caso de diseño de pavimento flexible se utiliza 0.45. | Apartado 4.2.4 Desviación estándar. |
| ΔPSI | 2.2 | El ΔPSI se obtiene de la resta de Po - Pt, donde, Po = 4.2 y se utiliza un Pt = 2.0 para camiones de tránsito menor. | Apartado 4.2.6. índice de serviciabilidad. |

Fuente: Elaboración propia.

### 4.1.1.1. Análisis de diseño del pavimento flexible calle mora

A continuación, se muestran las tablas de Transito Promedio Diario (TPD), obtenidas de los días 18, 20 y 22 de junio del 2018.

*Tabla 26. Tránsito promedio diario de Calle Mora.*

| Lunes 18 de junio 2018 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Periodo | Motos | Pick up | C2 + | C2 - | C3 | **Volumen** |
| 1 | 7:00 - 8:00 | 3 | 74 | 4 | 3 | 1 | **85** |
| 2 | 8:00 - 9:00 | 2 | 67 | 6 | 2 | 1 | **78** |
| 3 | 9:00 - 10:00 | 3 | 68 | 5 | 1 | 0 | **77** |
| 4 | 10:00 - 11:00 | 4 | 70 | 4 | 2 | 0 | **80** |
| 5 | 11:00 - 12:00 | 3 | 75 | 6 | 3 | 1 | **88** |
| 6 | 12:00 - 13:00 | 3 | 77 | 5 | 3 | 1 | **89** |
| 7 | 13:00 - 14:00 | 4 | 74 | 4 | 4 | 0 | **86** |
| 8 | 14:00 - 15:00 | 2 | 69 | 4 | 2 | 0 | **77** |
| 9 | 15:00 - 16:00 | 4 | 67 | 5 | 3 | 0 | **79** |
| 10 | 16:00 - 17:00 | 3 | 70 | 5 | 2 | 0 | **80** |
| 11 | 17:00 - 18:00 | 4 | 75 | 6 | 3 | 1 | **89** |
| | **TOTAL** | **35** | **786** | **54** | **28** | **5** | **908** |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Tránsito promedio diario de Calle Mora.

| Miercoles 20 de junio 2018 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Periodo | Motos | Pick up | C2 + | C2 - | C3 | **Volumen** |
| 1 | 7:00 - 8:00 | 3 | 74 | 4 | 2 | 1 | **84** |
| 2 | 8:00 - 9:00 | 4 | 70 | 3 | 3 | 1 | **81** |
| 3 | 9:00 - 10:00 | 3 | 69 | 3 | 3 | 0 | **78** |
| 4 | 10:00 - 11:00 | 2 | 65 | 4 | 2 | 0 | **73** |
| 5 | 11:00 - 12:00 | 3 | 68 | 6 | 1 | 0 | **78** |
| 6 | 12:00 - 13:00 | 4 | 73 | 6 | 2 | 1 | **86** |
| 7 | 13:00 - 14:00 | 3 | 68 | 3 | 3 | 0 | **77** |
| 8 | 14:00 - 15:00 | 2 | 65 | 4 | 1 | 0 | **72** |
| 9 | 15:00 - 16:00 | 3 | 68 | 4 | 2 | 0 | **77** |
| 10 | 16:00 - 17:00 | 3 | 70 | 4 | 2 | 0 | **79** |
| 11 | 17:00 - 18:00 | 4 | 71 | 5 | 2 | 1 | **83** |
| | **TOTAL** | **34** | **761** | **46** | **23** | **4** | **868** |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Tránsito promedio diario de Calle Mora.

| Viernes 22 de junio 2018 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Periodo | Motos | Pick up | C2 + | C2 - | C3 | **Volumen** |
| 1 | 7:00 - 8:00 | 4 | 71 | 5 | 3 | 1 | **84** |
| 2 | 8:00 - 9:00 | 3 | 69 | 3 | 2 | 1 | **78** |
| 3 | 9:00 - 10:00 | 3 | 66 | 6 | 3 | 0 | **78** |
| 4 | 10:00 - 11:00 | 3 | 69 | 5 | 2 | 0 | **79** |
| 5 | 11:00 - 12:00 | 3 | 72 | 3 | 2 | 1 | **81** |
| 6 | 12:00 - 13:00 | 4 | 77 | 4 | 3 | 1 | **89** |
| 7 | 13:00 - 14:00 | 4 | 73 | 5 | 2 | 0 | **84** |
| 8 | 14:00 - 15:00 | 3 | 67 | 4 | 2 | 0 | **76** |
| 9 | 15:00 - 16:00 | 2 | 69 | 4 | 3 | 1 | **79** |
| 10 | 16:00 - 17:00 | 3 | 70 | 6 | 3 | 1 | **83** |
| 11 | 17:00 - 18:00 | 4 | 73 | 5 | 3 | 1 | **86** |
| | **TOTAL** | **36** | **776** | **50** | **28** | **7** | **897** |

Fuente: Elaboración propia

Datos para la elaboración de ESAL:

Tabla 29. Valores para calcular ESAL.

| Variables de diseño | Valor | Descripción | Referencia |
|---|---|---|---|
| Periodo de diseño | 15 | Determinamos un periodo de diseño de 15 años debido a que es una calle pavimentada de baja intensidad de tránsito. | Tabla 5. Periodo de diseño en función del tiempo en carretera. |
| Factor de crecimiento | 20.0 | Se estipula un 4% de tasa de crecimeinto anual y 15 años de periodo de diseño. | Tabla 7. Factores de crecimiento de tránsito. |
| Factor de distribución por carril (L) | 1 | Al ser una calle de un carril por sentido se toma como 1. | Tabla 9. Factor de distribución por carril. |
| Factor de distribución por dirección (D) | 0.5 | Se determina que la mitad de los vehículos va en un sentido y la otra mitad en el otro sentido. | Tabla 8. Factor de distribución por dirección |
| TPDA | 1244.24 | Según los calculos realizados para obtener el TPDA. | Tabla 24. Factor diario y Tabla 25. Distribución del volumen horario para una estación. |

Fuente: Elaboración propia.

Ahora para calcular el ESAL se necesita de la fórmula que se presenta a continuación:

ESAL = (TPD)*(T)*(GY)*(D)*(L)*(365)

*Tabla 30. Cálculo de ESAL.*

| ESAL | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | TPD | % Composición | Factor Camión | L | D | GY | 365 | |
| Pick up | 1244.237 | 0.19 | 0.02 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 17277.92 |
| Livianos | 1244.237 | 0.76669 | 0.0005 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 1743.001 |
| C2 + | 1244.237 | 0.012 | 0.07 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 3819.33 |
| C2 - | 1244.237 | 0.0011 | 0.63 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 3150.947 |
| C3 | 1244.237 | 0.00875 | 1.28 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 50924.4 |
| | | | | | | | TOTAL | 76915.6 |
| | | | | | | | W18 | 7.7E+04 |

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de módulo de la subrasante necesita de la fórmula de módulo de resiliencia que es Mr: 1862*$CBR^{0.7125}$, donde se utilizó el CBR de la subrasante, en este caso 2, se sustituye en la fórmula y se da el resultado de Mr de cada mes, los primeros 4 meses se multiplican por 1.15 por ser meses secos, posteriormente se utiliza la fórmula del apartado E del daño relativo y se calcula para cada uno de los meses del año, consecutivamente se suman los resultados de daño relativo y se calcula un promedio, para obtener el Mr que se necesita.

*Tabla 31. Módulo de resiliencia de la subrasante.*

| No | Meses | Módulo de la subrasante Mr (PSI) | Daño relativo Uf |
|---|---|---|---|
| 1 | Enero | 3508.822417 | 0.703246509 |
| 2 | Febrero | 3508.822417 | 0.703246509 |
| 3 | Marzo | 3508.822417 | 0.703246509 |
| 4 | Abril | 3508.822417 | 0.703246509 |
| 5 | Mayo | 3051.149928 | 0.972582777 |
| 6 | Junio | 3051.149928 | 0.972582777 |
| 7 | Julio | 3051.149928 | 0.972582777 |
| 8 | Agosto | 3051.149928 | 0.972582777 |
| 9 | Septiembre | 3051.149928 | 0.972582777 |
| 10 | Octubre | 3051.149928 | 0.972582777 |
| 11 | Noviembre | 3051.149928 | 0.972582777 |
| 12 | Diciembre | 3051.149928 | 0.972582777 |
| | | **Suma** | **10.59364825** |
| | | **Uf promedio** | **0.882804021** |

| | |
|---|---|
| **Mr subrasante** | 3181.220982 |

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente con los valores de la tabla 23 se procede a calcular los SN, para calcularlos hay dos métodos, el del programa y el de las figuras 27.

Con respecto a los cálculos obtenidos anteriormente, se procede a calcular el número estructural (SN) con los espesores de capa es la siguiente:

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

Datos para realizar la fórmula anterior:

Tabla 32. Datos para calcular el número estructural (SN).

| Capa | Mr (psi) | ai | mi | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **MAC** | 450000 | 0.44 | ----- | **SN1** | 1.2 |
| **Base** | 28500 | 0.138 | 1 | **SN2** | 1.59 |
| **Subbase** | 15000 | 0.105 | 1 | **SN3** | 2.85 |
| **Subrasante** | 3181 | ----- | ----- | | |

Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo de la fórmula anterior:

Paso 1: Espesor mínimo de la capa asfáltica.

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \rightarrow \frac{1.20}{0.44} = 2.7\ in$$

$$SN^* = a_1 * D_1^* \rightarrow 0.44 * 2.7 = 1.20$$

$D_1^*$ = 2.7 in = 7 cm espesor de mezcla asfáltica.

Paso 2: Espesor de la base.

$$D_2 \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 * m_2} \rightarrow \frac{1.59 - 1.20}{0.138 * 1} = 2.83$$

$SN_2^* = a_2 * m_2 * D_2^* \rightarrow 0{,}138 * 1 * 2.83 = 0.552$

$D_2^*$= 3 in = a 8 cm de espesor de base.

Pao 3: Espesor de la subbase.

$$D_3 = \frac{SN_3 - SN_2^* - SN_1^*}{a_3 * m_3} \rightarrow \frac{2.85 - 0.552 - 1.20}{0.105 * 1} = 10.46$$

$$SN_3^* = a_3 * m_3 * D_3^* \rightarrow 0.105 * 1 * 10.46 = 1.128$$

$D_3^*$= 10.46 in = a 27 cm de espesor de subbase.

Para verificar los resultados obtenidos se aplica la siguiente fórmula:

$$SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* \geq SN_3$$

$$1.20 + 0.552 + 1.128 \geq 2.85$$

$$2.85 \geq 2.85$$

La guía de diseño AASHTO sugiere espesores mínimos para la carpeta asfáltica y base granular según el resultado de ESAL, por lo que se verifica los valores obtenidos con la tabla recomendada.

Tabla 33. Guía para diseño de estructuras de pavimento.

| Número de ESAL´s | Capas Asfálticas | Base Granular |
|---|---|---|
| Menos de 50,000 | 3.0 cm | 10 cm |
| 50,000 - 150,000 | 5.0 cm | 10 cm |
| 150,000 - 500,000 | 6.5 cm | 10 cm |
| 500,000 – 2,000,000 | 7.5 cm | 15 cm |
| 2,000,000 – 7,000,000 | 9.0 cm | 15 cm |
| Más de 7,000,000 | 10.0 cm | 15 cm |

Fuente: (Molina, 2018, pág. 21)

#### 4.1.1.1.1. Fatiga en mezcla asfáltica y deformaciones en cada capa de calle Mora

Para determinar que la fatiga no afecte antes de que se cumpla la vida útil, es necesario calcular la deformación con el programa pitra pave, también se utilizan las fórmulas del apartado 1.2.12 fatiga en mezcla asfáltica.

Tabla 34. Datos obtenidos del programa pitra pave.

Esfuerzos | Deformaciones | Deflexiones

| # | Exx (1) | Eyy (1) | Ezz (1) |
|---|---|---|---|
| 1 | -3.0222e-04 | -2.1847e-04 | 2.6067e-04 |
| 2 | -2.4997e-04 | 3.9903e-05 | 1.1288e-04 |
| 3 | -2.6167e-04 | -1.7193e-04 | 5.2097e-04 |
| 4 | -2.6438e-04 | -9.4607e-05 | 4.4015e-04 |
| 5 | -2.9911e-04 | -1.9423e-04 | 4.4881e-04 |
| 6 | -3.1791e-04 | -1.7386e-04 | 4.5137e-04 |
| 7 | -2.2947e-04 | -1.6515e-04 | 4.1698e-04 |
| 8 | -2.4480e-04 | -1.8462e-04 | 4.5247e-04 |
| 9 | -2.4831e-04 | -1.8875e-04 | 5.4067e-04 |
| 10 | -2.6285e-04 | -2.1666e-04 | 5.8789e-04 |
| 11 | -1.7611e-04 | -1.4404e-04 | 3.9591e-04 |
| 12 | -1.8285e-04 | -1.6118e-04 | 4.2233e-04 |

Fuente: Programa pitra pave.

##### 4.1.1.1.1.1. Fatiga en la mezcla asfáltica con el método de lanamme.

Para calcular la deformación por fatiga de la mezcla asfáltica se utiliza las ecuaciones que se encuentran en el apartado 1.2.12 fatiga mezcla asfáltica.

Tabla 35. Cálculos de fatiga.

| | |
|---|---|
| Et | 0.00030906 |
| Mr | 450000 |
| M | -0.750762791 |
| Vb | 4.6 |
| Va | 4 |
| C | 0.17751588 |
| ki' | 261.839145 |
| hac | 4 |

**Nf** **8.4E+05**

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos anteriores se procede a calcular la tabla de fatiga, donde primero se multiplica el total de ESAL sin el GY que se obtuvo al principio, posteriormente se calcula el ESAL acumulado, ESAL por año, el daño relativo, daño acumulado y agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga.

Tabla 36. Porcentaje de fatiga.

| Años | GY | ESALS acumulado | ESALS por año | Daño relativo | Daño acumulado | FC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 3841 | 3841 | 0.42% | 0% | 0.92 |
| 2 | 2.04 | 7836 | 3995 | 0.44% | 1% | 2.17 |
| 3 | 3.12 | 11985 | 4149 | 0.45% | 1% | 3.60 |
| 4 | 4.25 | 16325 | 4341 | 0.47% | 2% | 5.16 |
| 5 | 5.42 | 20820 | 4494 | 0.49% | 2% | 6.82 |
| 6 | 6.63 | 25467 | 4648 | 0.51% | 3% | 8.56 |
| 7 | 7.9 | 30346 | 4878 | 0.53% | 3% | 10.39 |
| 8 | 9.21 | 35378 | 5032 | 0.55% | 4% | 12.26 |
| 9 | 10.58 | 40640 | 5263 | 0.58% | 4% | 14.20 |
| 10 | 12.01 | 46133 | 5493 | 0.60% | 5% | 16.19 |
| 11 | 13.49 | 51818 | 5685 | 0.62% | 6% | 18.21 |
| 12 | 15.03 | 57734 | 5916 | 0.65% | 6% | 20.26 |
| 13 | 16.63 | 63880 | 6146 | 0.67% | 7% | 22.33 |
| 14 | 18.29 | 70256 | 6376 | 0.70% | 8% | 24.41 |
| 15 | 20.02 | 76902 | 6645 | 0.73% | 8% | 26.50 |

Fuente: Elaboración propia

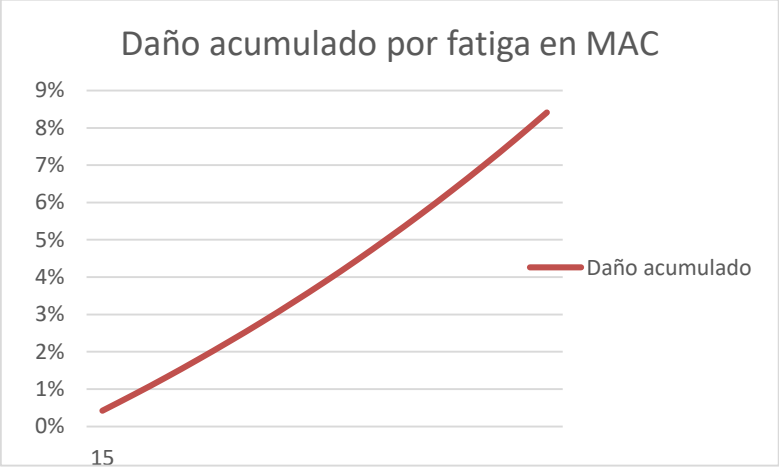



Figura 23. Grafica de daño relativo de calle mora.

Fuente: Elaboración propia.

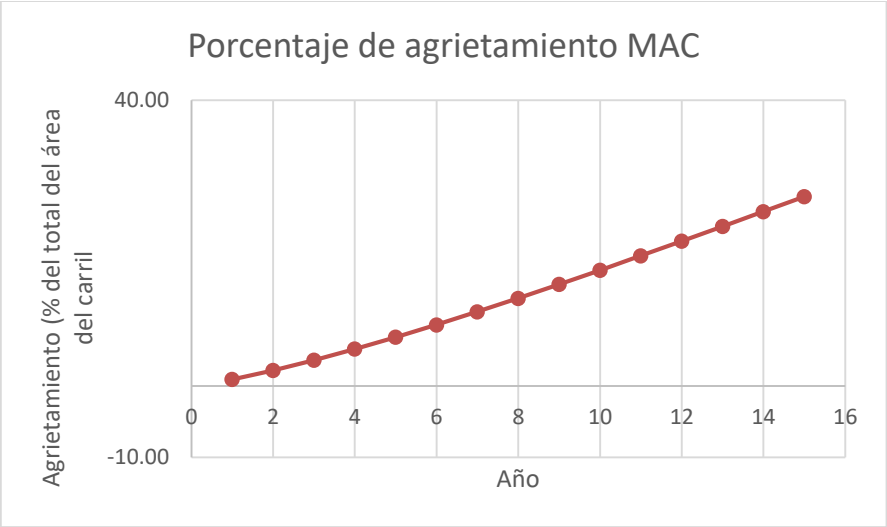



Figura 24. Porcentaje de agrietamiento MAC de calle mora.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.1.1.2. Deformación permanente de la mezcla asfáltica con el método de lanamme

Los cálculos de dicho procedimiento se utilizan las ecuaciones que se encuentran en el apartado 1.2.13.1 de deformación permanente de la mezcla asfáltica.

Tabla 37. Datos para calcular la deformación de la MAC de calle Mora.

| | |
|---|---|
| K1 | 3.498979652 |
| C1 | -9.0572 |
| C2 | 20.7708 |
| hac | 4 |
| d | 2 |

| | |
|---|---|
| Temperatura | 38 |
| N(ESALs) | 7.7E+04 |
| Er | 0.00026067 |

| | |
|---|---|
| Ɛp (in/in) | 0.0059 |
| Deformación (in) | 0.020808264 |
| Deformación (cm) | 0.052852991 |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.1.1.3. Deformación permanente de la base y subbase

Para calcular la deformación permanente de la base y subase se utilizan las ecuaciones que se encuentran en el apartado 1.2.13.2 de deformación permanente de la base y subbase.

Tabla 38. Deformación permanente de la base y subbase de calle Mora.

| | |
|---|---|
| N | 7.7E+04 |
| Ev | 0.0004778 |
| Er | 28500 |
| GWT | 20 |
| Wc | 7.495686416 |
| β1 base | 1.673 |
| log B | -0.743398917 |
| B | 0.180551493 |
| p | 7532.371619 |

| | |
|---|---|
| Eo/Er | 21.26 |
| Espesor de la base | 6 |

| | |
|---|---|
| δa (in) | 0.052845506 |
| δ (cm) | 0.134227584 |

| | |
|---|---|
| N | 7.7E+04 |
| Ev | 0.00045247 |
| Er | 15000 |
| GWT | 20 |
| Wc | 12.53232505 |
| β1 base | 1.673 |
| log B | -0.832235149 |
| B | 0.147151553 |
| p | 67505.16839 |

| | |
|---|---|
| Eo/Er | 22.76 |
| Espesor de la subbase | 10 |

| | |
|---|---|
| δa (in) | 0.064586261 |
| δ (cm) | 0.164049102 |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.1.1.4. Deformación permanente de la subrasante

Se calcula la deformación permanente de la subrasante por medio de las ecuaciones que se encuentran en el apartado 1.2.13.3 de deformación permanente de la subrasante.

#### 4.1.1.1.2. Fatiga de la mezcla asfáltica con el método de mopt

Para determinar la capacidad de carga por fatiga de la mezcla asfáltica se utiliza la siguiente ecuación: $E_t$: deformación unitaria máxima (mm/mm) y MR módulo de resiliencia de la mezcla en (kPa).

$$N_f = 1.0226x10^{25} * \left[\frac{1}{E_t}\right]^{6.308} * \left[\frac{1}{MR}\right]^{0.810}$$

$$N_f = 1.0226x10^{25} * \left[\frac{1}{302.22}\right]^{6.308} * \left[\frac{1}{3100.5}\right]^{0.810}$$

$$N_f = 3.4x10^{6}$$

#### 4.1.1.1.3Deformación plástica de la subrasante

Para determinar la capacidad de carga por deformación plástica de la subrasante se utiliza la siguiente ecuación, donde, $E_{vs}$:deformación unitaria máxima a la compresión en la subrasante.

$$E_{vs} = 1.365x10^{-9} * \left[\frac{1}{E_{vs}}\right]^{4.477}$$

$$E_{vs} = 1.365x10^{-9} * \left[\frac{1}{422.33x10^{-6}}\right]^{4.477}$$

### 4.1.2. Análisis de diseño del pavimento flexible de calle brujos

Se muestran las tablas de tránsito promedio diario (TPD), obtenidas de los días 19, 21 y 25 de junio del 2018.

Tabla 39. Tránsito promedio diario calle Brujos.

| Martes 19 de junio del 2018 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Periodo | Pick up | Livianos | C2 + | C2 - | C3 | T3 - S2 | Buses | **Volumen** |
| 1 | 7:00 - 8:00 | 34 | 280 | 6 | 10 | 1 | 0 | 1 | **332** |
| 2 | 8:00 - 9:00 | 31 | 290 | 5 | 15 | 2 | 0 | 1 | **344** |
| 3 | 9:00 - 10:00 | 38 | 283 | 8 | 8 | 1 | 0 | 1 | **339** |
| 4 | 10:00 - 11:00 | 29 | 270 | 7 | 7 | 0 | 1 | 1 | **315** |
| 5 | 11:00 - 12:00 | 31 | 273 | 6 | 17 | 2 | 0 | 1 | **330** |
| 6 | 12:00 - 13:00 | 37 | 265 | 5 | 4 | 0 | 0 | 1 | **312** |
| 7 | 13:00 - 14:00 | 34 | 298 | 6 | 10 | 1 | 1 | 1 | **351** |
| 8 | 14:00 - 15:00 | 38 | 295 | 5 | 12 | 1 | 0 | 1 | **352** |
| 9 | 15:00 - 16:00 | 29 | 280 | 6 | 8 | 1 | 0 | 1 | **325** |
| 10 | 16:00 - 17:00 | 28 | 291 | 7 | 15 | 2 | 1 | 1 | **345** |
| 11 | 17:00 - 18:00 | 30 | 272 | 5 | 3 | 1 | 0 | 1 | **312** |
| | **TOTAL** | **359** | **3097** | **66** | **109** | **12** | **3** | **11** | **3657** |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Tránsito promedio diario calle Brujos.

| Jueves 21 de junio del 2018 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Periodo | Pick up | Livianos | C2 + | C2 - | C3 | T3 - S2 | Buses | **Volumen** |
| 1 | 7:00 - 8:00 | 33 | 278 | 5 | 9 | 1 | 0 | 1 | **327** |
| 2 | 8:00 - 9:00 | 30 | 287 | 5 | 13 | 1 | 0 | 1 | **337** |
| 3 | 9:00 - 10:00 | 28 | 273 | 7 | 10 | 2 | 0 | 1 | **321** |
| 4 | 10:00 - 11:00 | 29 | 269 | 5 | 9 | 2 | 0 | 1 | **315** |
| 5 | 11:00 - 12:00 | 31 | 266 | 6 | 14 | 0 | 1 | 1 | **319** |
| 6 | 12:00 - 13:00 | 37 | 280 | 8 | 6 | 1 | 0 | 1 | **333** |
| 7 | 13:00 - 14:00 | 36 | 275 | 7 | 8 | 1 | 0 | 1 | **328** |
| 8 | 14:00 - 15:00 | 29 | 279 | 5 | 11 | 0 | 0 | 1 | **325** |
| 9 | 15:00 - 16:00 | 30 | 272 | 5 | 5 | 0 | 1 | 1 | **314** |
| 10 | 16:00 - 17:00 | 33 | 286 | 6 | 14 | 1 | 0 | 1 | **341** |
| 11 | 17:00 - 18:00 | 34 | 290 | 5 | 5 | 1 | 0 | 1 | **336** |
| | **TOTAL** | **350** | **3055** | **64** | **104** | **10** | **2** | **11** | **3596** |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Tránsito promedio diario calle Brujos.

| Lunes 25 de junio del 2018 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Periodo | Pick up | Livianos | C2 + | C2 - | C3 | T3 - S2 | Buses | **Volumen** |
| 1 | 7:00 - 8:00 | 35 | 280 | 6 | 10 | 2 | 0 | 1 | **334** |
| 2 | 8:00 - 9:00 | 28 | 290 | 5 | 13 | 2 | 0 | 1 | **339** |
| 3 | 9:00 - 10:00 | 30 | 285 | 6 | 8 | 1 | 0 | 1 | **331** |
| 4 | 10:00 - 11:00 | 27 | 273 | 7 | 9 | 1 | 0 | 1 | **318** |
| 5 | 11:00 - 12:00 | 32 | 271 | 6 | 15 | 0 | 1 | 1 | **326** |
| 6 | 12:00 - 13:00 | 38 | 268 | 6 | 5 | 1 | 0 | 1 | **319** |
| 7 | 13:00 - 14:00 | 35 | 293 | 7 | 9 | 0 | 0 | 1 | **345** |
| 8 | 14:00 - 15:00 | 31 | 288 | 5 | 13 | 1 | 1 | 1 | **340** |
| 9 | 15:00 - 16:00 | 33 | 290 | 5 | 7 | 2 | 0 | 1 | **338** |
| 10 | 16:00 - 17:00 | 36 | 279 | 8 | 11 | 2 | 0 | 1 | **337** |
| 11 | 17:00 - 18:00 | 32 | 286 | 6 | 8 | 1 | 0 | 1 | **334** |
| | **TOTAL** | **357** | **3103** | **67** | **108** | **13** | **2** | **11** | **3661** |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42. Datos para obtener ESAL.

| Variables de diseño | Valor | Descripción | Referencia |
|---|---|---|---|
| Periodo de diseño | 15 | Se determina un periodo de diseño de 15 años debido a que es una calle pavimentada de baja intensidad de tránsito. | Tabla 5. Periodo de diseño en función del tiempo en carretera. |
| Factor de crecimiento | 20.0 | Se estipula un 4% de tasa de crecimeinto anual y 15 años de periodo de diseño. | Tabla 7. Factores de crecimiento de tránsito. |
| Factor de distribución por carril (L) | 1 | Al ser una calle de un carril por sentido se toma como 1. | Tabla 9. Factor de distribución por carril. |
| Factor de distribución por dirección (D) | 0.5 | Se determina que la mitad de los vehículos va en un sentido y la otra mitad en el otro sentido. | Tabla 8. Factor de distribución por dirección |
| TPDA | 5075.59 | Según los calculos realizados para obtener el TPDA. | Tabla 24. Factor diario y Tabla 25. Distribución del volumen horario para una estación. |

Fuente: Elaboración propia.

Ahora para calcular el ESAL se necesita de la fórmula que se presenta a continuación:

ESAL = (TPD)*(T)*(GY)*(D)*(L)*(365)

Tabla 43. Cálculo de ESAL.

| ESAL | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | TPD | % Composición | Factor Camión | L | D | GY | 365 | |
| Pick up | 5075.59 | 0.19 | 0.02 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 70481.46 |
| Livianos | 5075.59 | 0.7669 | 0.0005 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 7112.135 |
| C2 + | 5075.59 | 0.012 | 0.07 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 15580.11 |
| C2 - | 5075.59 | 0.0011 | 0.63 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 12853.59 |
| C3 | 5075.59 | 0.00875 | 1.28 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 207734.8 |
| Buses | 5075.59 | 0.014 | 2.29 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 594640.9 |
| T3 - S2 | 5075.59 | 0.00725 | 2.38 | 1 | 0.5 | 20.02 | 365 | 320041.5 |
| | | | | | | | **TOTAL** | **1228444.5** |

| | |
|---|---|
| **W18** | **1.2E+06** |

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de módulo de la subrasante necesita de la fórmula de módulo de resiliencia que es Mr: 1862*$CBR^{0.7125}$, donde se utilizó el CBR de la subrasante, en este caso

2, se sustituye en la fórmula y se da el resultado de Mr de cada mes, los primeros 4 meses se multiplican por 1.15 por ser meses secos, posteriormente se utiliza la fórmula del apartado E del daño relativo y se calcula para cada uno de los meses del año, consecutivamente se suman los resultados de daño relativo y se calcula un promedio, para obtener el Mr que se necesita.

Tabla 44. Módulo de la subrasante calle brujos.

| No | Meses | Módulo de la subrasante Mr (PSI) | Daño relativo Uf |
|---|---|---|---|
| 1 | Enero | 6740.523778 | 0.154636763 |
| 2 | Febrero | 6740.523778 | 0.154636763 |
| 3 | Marzo | 6740.523778 | 0.154636763 |
| 4 | Abril | 6740.523778 | 0.154636763 |
| 5 | Mayo | 5861.325025 | 0.213861072 |
| 6 | Junio | 5861.325025 | 0.213861072 |
| 7 | Julio | 5861.325025 | 0.213861072 |
| 8 | Agosto | 5861.325025 | 0.213861072 |
| 9 | Septiembre | 5861.325025 | 0.213861072 |
| 10 | Octubre | 5861.325025 | 0.213861072 |
| 11 | Noviembre | 5861.325025 | 0.213861072 |
| 12 | Diciembre | 5861.325025 | 0.213861072 |
| | | **Suma** | **2.329435632** |
| | | **Uf promedio** | **0.194119636** |

| | |
|---|---|
| **Mr subrasante** | 6111.194334 |

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente con los valores de la tabla 23 se procede a calcular los SN, para calcularlos hay dos métodos, el del programa y el de las figuras 31.

Para calcular el nomograma de $a_1$, $a_2$ y $a_3$ utilizamos los mismos datos que nos dio en las figuras 13, 14 y 15.

Con respecto a los cálculos realizados anteriormente, procedemos a calcular el número estructural (SN) con los espesores de capa es la siguiente:

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

Datos para realizar la fórmula anterior:

Tabla 45. Datos para calcular el número estructural (SN).

| Capa | Mr (psi) | ai | mi | | |
|---|---|---|---|---|---|
| MAC | 450000 | 0.44 | ----- | SN1 | 1.97 |
| Base | 28500 | 0.138 | 1 | SN2 | 2.51 |
| Subbase | 15000 | 0.105 | 1 | SN3 | 3.44 |
| Subrasante | 6111 | ----- | ----- | | |

Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo de la fórmula anterior:

Paso 1: Espesor mínimo de la capa asfáltica.

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \rightarrow \frac{1.97}{0.44} = 4.5\ in$$

$$SN^* = a_1 * D_1^* \rightarrow 0.44 * 4.5 = 1.97$$

$D_1^*$ = 4.5 in = 11 cm espesor de mezcla asfáltica.

Paso 2: Espesor de la base.

$$D_2 \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 * m_2} \rightarrow \frac{2.51 - 1.97}{0.138 * 1} = 3.91$$

$$SN_2^* = a_2 * m_2 * D_2^* \rightarrow 0.138 * 1 * 3.91 = 0.54$$

$D_2^*$= 3.91 in = a 10 cm de espesor de base.

Pao 3: Espesor de la subbase.

$$D_3 = \frac{SN_3 - SN_2^* - SN_1^*}{a_3 * m_3} \rightarrow \frac{3.44 - 0.54 - 1.97}{0.105 * 1} = 8.86$$

$$SN_3^* = a_3 * m_3 * D_3^* \rightarrow 0.105 * 1 * 8.86 = 0.93$$

$D_3^*$= 8.86 in = a 23 cm de espesor de subbase.

Para verificar los resultados obtenidos se aplica la siguiente fórmula:

$$SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* \geq SN_3$$

$$1.97 + 0.54 + 0.93 \geq 3.44$$

$$3.44 \geq 3.44$$

Por lo tanto, cumple.

La guía de diseño AASHTO sugiere espesores mínimos para la carpeta asfáltica y base granular según el resultado de ESAL, por lo que se verifica los valores obtenidos con la tabla recomendada.

Tabla 46. Guía para diseño de estructuras de pavimento.

| Número de ESAL´s | Capas Asfálticas | Base Granular |
|---|---|---|
| Menos de 50,000 | 3.0 cm | 10 cm |
| 50,000 - 150,000 | 5.0 cm | 10 cm |
| 150,000 - 500,000 | 6.5 cm | 10 cm |
| 500,000 – 2,000,000 | 7.5 cm | 15 cm |
| 2,000,000 – 7,000,000 | 9.0 cm | 15 cm |
| Más de 7,000,000 | 10.0 cm | 15 cm |

Fuente: (Molina, 2018, pág. 21)

#### 4.1.2.1. Fatiga en la mezcla asfáltica y deformación en cada una de las capas de calle brujos

Para determinar que la fatiga no afecte antes de que se cumpla la vida útil, es necesario calcular la deformación con el programa pitra pave, también se utilizan las fórmulas del apartado 1.2.12 fatiga en mezcla asfáltica.

Tabla 47. Datos obtenidos del programa pitra pave.

Esfuerzos | Deformaciones | Deflexiones

| # | Exx (1) | Eyy (1) | Ezz (1) |
|---|---|---|---|
| 1 | -1.9790e-04 | -1.3804e-04 | 1.6554e-04 |
| 2 | -1.8321e-04 | -2.7863e-05 | 1.0698e-04 |
| 3 | -1.5588e-04 | -1.0748e-04 | 3.0016e-04 |
| 4 | -1.6315e-04 | -9.5491e-05 | 2.9603e-04 |
| 5 | -1.7450e-04 | -1.2561e-04 | 2.6121e-04 |
| 6 | -1.8504e-04 | -1.3570e-04 | 2.7916e-04 |
| 7 | -1.4539e-04 | -1.1515e-04 | 2.6655e-04 |
| 8 | -1.5145e-04 | -1.2798e-04 | 2.8562e-04 |
| 9 | -1.5756e-04 | -1.2950e-04 | 3.5448e-04 |
| 10 | -1.6259e-04 | -1.4325e-04 | 3.7532e-04 |
| 11 | -1.1746e-04 | -1.0144e-04 | 2.7146e-04 |
| 12 | -1.1869e-04 | -1.0860e-04 | 2.8124e-04 |

Fuente: Programa pitra pave.

#### 4.1.2.1.1. Fatiga en la mezcla asfáltica con el método de lanamme

Para determinar la deformación por fatiga de la mezcla asfáltica se utilizan las ecuaciones que se encuentran en el apartado 1.2.13 de fatiga en la mezcla asfáltica.

Tabla 48. Datos para calcular fatiga calle Brujos.

| | |
|---|---|
| Et | 0.0001979 |
| Mr | 450000 |
| M | -0.750762791 |
| Vb | 4.6 |
| Va | 4 |
| C | 0.17751588 |
| ki' | 250.0111832 |
| hac | 6 |

**Nf** **4.6E+06**

Fuente: Elaboración propia

Con los datos anteriores se procede a calcular la tabla de fatiga, donde primero se multiplica el total de ESAL sin el GY que se obtuvo al principio, posteriormente se calcula el ESAL acumulado, ESAL por año, el daño relativo, daño acumulado y FC.

Tabla 49. Porcentaje de fatiga calle Brujos.

| Años | GY | ESALS acumulado | ESALS por año | Daño relativo | Daño acumulado | FC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 61350 | 61350 | 1.32% | 1.3% | 5.65 |
| 2 | 2.04 | 125154 | 63804 | 1.37% | 2.7% | 11.70 |
| 3 | 3.12 | 191412 | 66258 | 1.43% | 4.1% | 17.53 |
| 4 | 4.25 | 260737 | 69325 | 1.49% | 5.6% | 23.06 |
| 5 | 5.42 | 332516 | 71779 | 1.55% | 7.2% | 28.21 |
| 6 | 6.63 | 406750 | 74233 | 1.60% | 8.8% | 32.96 |
| 7 | 7.9 | 484664 | 77914 | 1.68% | 10.4% | 37.41 |
| 8 | 9.21 | 565032 | 80368 | 1.73% | 12.2% | 41.48 |
| 9 | 10.58 | 649082 | 84049 | 1.81% | 14.0% | 45.27 |
| 10 | 12.01 | 736812 | 87730 | 1.89% | 15.9% | 48.78 |
| 11 | 13.49 | 827610 | 90798 | 1.95% | 17.8% | 52.01 |
| 12 | 15.03 | 922089 | 94479 | 2.03% | 19.9% | 55.00 |
| 13 | 16.63 | 1020248 | 98160 | 2.11% | 22.0% | 57.77 |
| 14 | 18.29 | 1122089 | 101841 | 2.19% | 24.2% | 60.33 |
| 15 | 20.02 | 1228224 | 106135 | 2.28% | 26.4% | 62.71 |

Fuente: Elaboración propia

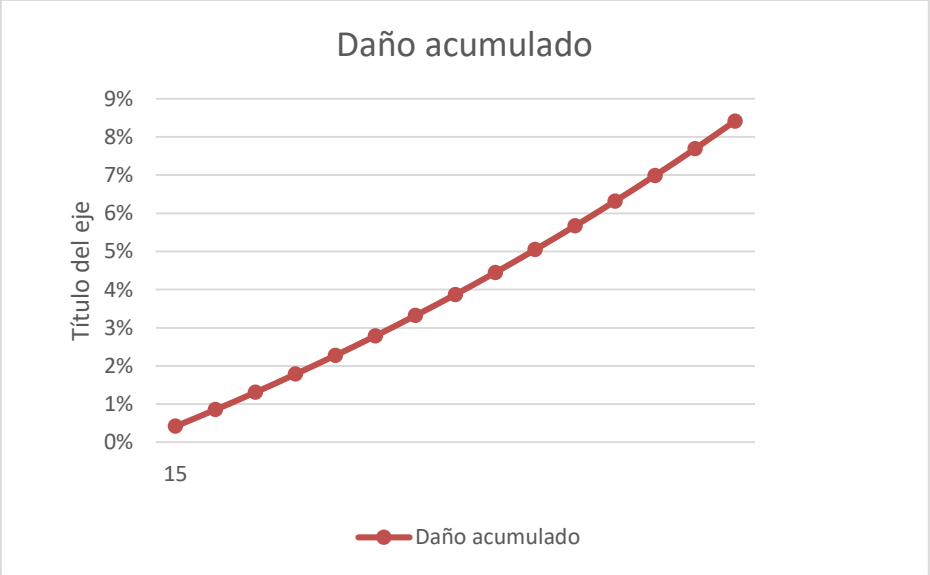



Figura 25. Gráfico de daño acumulado de la mac de calle Brujos.

Fuente: Elaboración propia.

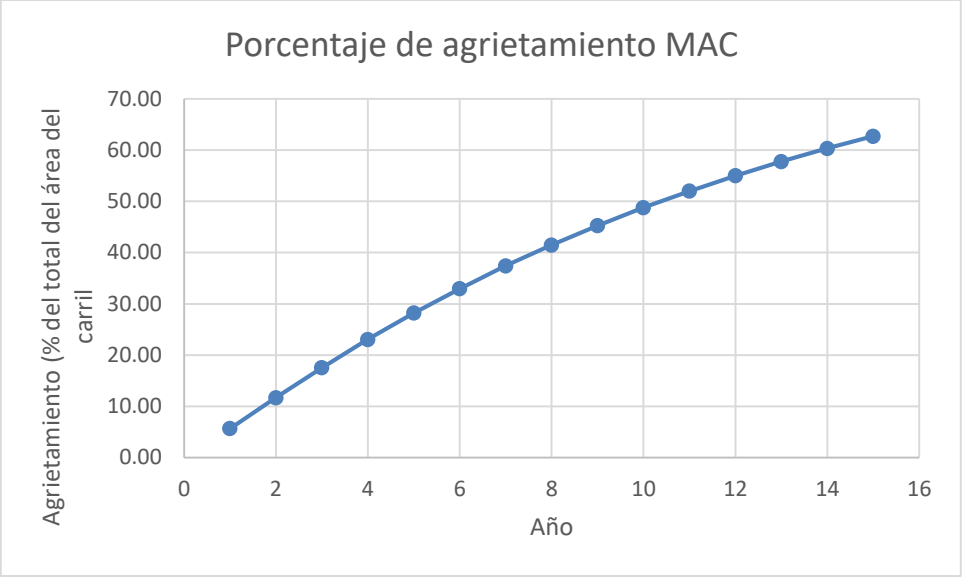



Figura 26.Porcentaje de agrietamiento mac de calle Brujos.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.1.2. Deformación permanente de la mezcla asfáltica con el método de lanamme

Para el cálculo de la deformación de la mac se utilizan las ecuaciones que se encuentran en el apartado 1.2.13.1. de deformación permanente de la mezcla asfáltica.

Tabla 50.Datos para calcular la deformación de la mac de calle Brujos.

| | |
|---|---|
| K1 | 1.653861199 |
| C1 | -6.1616 |
| C2 | 17.6486 |
| hac | 6 |
| d | 3 |

| | |
|---|---|
| Temperatura | 38 |
| N(ESALs) | 1.2E+06 |
| Er | 0.0001979 |

| | |
|---|---|
| εp (in/in) | 0.0170 |
| Deformación (in) | 0.028173593 |
| Deformación (cm) | 0.071560927 |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.1.3. Datos para calcular la deformación permanente de la base y subbase.

Para calcular la deformación permanente de la base y subbase se utilizan las ecuaciones que se encuentran en el apartado 1.2.13.2. de deformación permanente de la base y subbase.

Tabla 51. Deformación permanente de la base y subbase de calle brujos.

| | |
|---|---|
| N | 1.2E+06 |
| Ev | 0.00030016 |
| Er | 28500 |
| GWT | 20 |
| Wc | 7.495686416 |
| β1 base | 1.673 |
| log B | -0.743398917 |
| B | 0.180551493 |
| p | 7532.371619 |

Eo/Er 21.26209484

Espesor de la base 8

| | |
|---|---|
| δa (in) | 0.057336676 |
| δ (cm) | 0.145635156 |

| | |
|---|---|
| N | 1.2E+06 |
| Ev | 0.00086 |
| Er | 15000 |
| GWT | 20 |
| Wc | 12.5323 |
| β1 base | 1.673 |
| log B | -0.8322 |
| B | 0.14715 |
| p | 67505.2 |

Eo/Er 22.7556

Espesor de la subbase 10

| | |
|---|---|
| δa (in) | 0.16974 |
| δ (cm) | 0.43113 |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.1.4. Deformación permanente de la subrasante

Se calcula la deformación permanente de la subrasante por medio de las ecuaciones que se encuentran en el apartado 1.2.13.3 de deformación permanente de la subrasante.

Tabla 52. Datos para calcular la deformación permanente de la subrasante.

### 4.1.3. Análisis de diseño del pavimento rígido.

Para el diseño de pavimentos rígidos en Calle Mora y Calle Brujos se necesita de la figura 20 para poder obtener un valor k que nos lleva a las figuras 18 y 19 para poder obtener el espesor de la losa, utilizando un módulo elástico del concreto de 30000 psi y un módulo de resiliencia del suelo de 4700 psi. A continuación, se presentan los valores para determinar el valor de k y espesor de la losa.

Tabla 53. Datos para el cálculo de diseño rígido de ambas calles.

| Variables de diseño | Valor | Descripción | Referencia |
|---|---|---|---|
| Eje equivalente | 7.7E+04 | Según el ESAL establecido en el diseño de pavimento flexible (Calle Mora). | Tabla 33. Calculo de ESAL. |
| Eje equivalente | 1.2E+06 | Según el ESAL establecido en el diseño de pavimento flexible (Calle Brujos). | Tabla 44. Calculo de ESAL. |
| Desviación estandar (So) | 0.35 | Error estadistico presente en la ecuación de diseño. | Apartado 4.3.2. Desviación estándar. |
| Nivel de confianza (R) | 80% | Se utiliza un nivel de confianza de 80% por ser un lugar urbano y locales | Tabla 19. Niveles de confianza R en función del tiempo de carretera. |
| Coeficiente de drenaje (Cd) | 1 | Según el estudio de suelos, el porcentaje de drenaje es mayor a 5% y menos a | Tabla 20. Valores de coeficiente de drenaje. |
| Índice de serviciabilidad ΔPSI | 2.5 | Es la resta de 4.5 que es para pavimentos rígidos y 2 para camiones de transito menor. | Apartado 4.3.5. Índice de serviciabilidad. |
| Coeficiente de transmisión de carga (J) | 2.8 | Según el elemento de transmisión de carga, se utiliza concreto hidráulico con refuerzo continuo. | Tabla 21. Coeficiente de transmisión de carga. |
| Módulo de ruptura del concreto (S'c) | 600 | Resistencia del concreto a la flexión o ruptura. | Apartado 4.3.8. Módulo de ruptura del concreto. |
| Módulo de elasticidad del concreto | 350000 psi | El módulo de elasticiada del concreto es de 3500000 psi. | Tabla 22. Módulo de elasticiada del concreto. |
| Módulo de resiliencia del suelo | 3181 psi | Se calcula en la parte de correlación entre el valor de soporte del suelo. | Figura 11. Correlación entre el valor de soporte del suelo (S) y el CBR. |
| Módulo de resiliencia del suelo | 6111 psi | Se calcula en la parte de correlación entre el valor de soporte del suelo. | Figura 11. Correlación entre el valor de soporte del suelo (S) y el CBR. |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 54. Espesores y valores k para cada uno de las calles.

| Calle Mora | |
|---|---|
| Espesor | k |
| 8" | 490 |
| **Calle Brujos** | |
| Espesor | k |
| 12" | 530 |

Fuente: Elaboración propia.

Se presenta la figura en donde utilizamos los datos anteriores para obtener k, donde el color rojo es de calle brujos y el verde de calle mora.

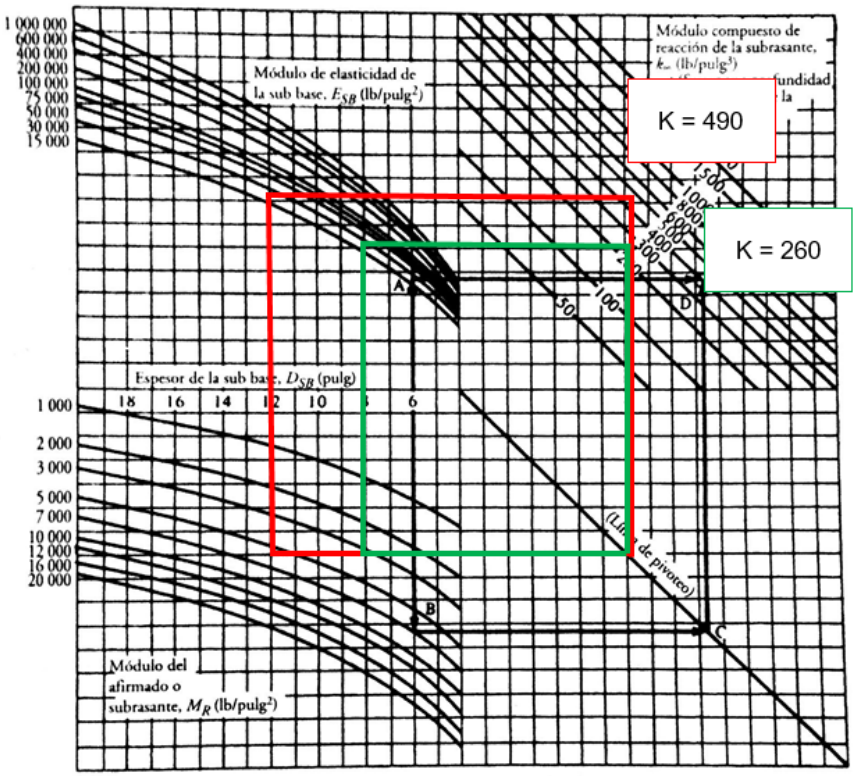



Figura 27. Cálculo de k.

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente utilizamos la figura 18 y 19 para poder tener el espesor de la losa, primero ubicamos el valor k en la figura 18 en la cuadricula, del valor k trazamos una línea verticalmente hasta que toque la línea que nos indique el módulo elástico del concreto $(E_c)$, al

tocar la línea $E_c$ trazamos otra línea horizontal hasta el final de la cuadrícula; detectamos el módulo de ruptura $(S'_c)$ para trazar una línea diagonal del punto donde terminó la cuadrícula hasta la línea de pivoteo, de ahí pasamos por el coeficiente de transmisión de carga (J) y llegamos a otra línea de pivoteo que de ahí pasamos por el coeficiente de drenaje (Cd) hasta llegar a la línea de encuentro.

Cuando se llega a la línea de encuentro se obtiene un valor, ese valor se necesita para utilízalo en la figura 19, primero se ubica el valor de la línea de encuentro de ahí se traza una línea diagonalmente que pase por el índice de serviciabilidad ΔPSI hasta llegar al inicio de la cuadricula, al llegar al inicio de la cuadricula se traza una línea horizontalmente hasta el final de la cuadricula. Luego obteniendo el nivel de confianza (R), se traza una línea diagonal que pase por desviación estándar (So) y llegue a la línea de pivoteo, donde ahí se pasa una línea que llegue al valor que se obtuvo en ESAL. Estando en el valor exacto de ESAL se traza una línea verticalmente hasta que toque la línea que se dibujó en la cuadrícula y el punto entre ellas es el valor de la losa de concreto.

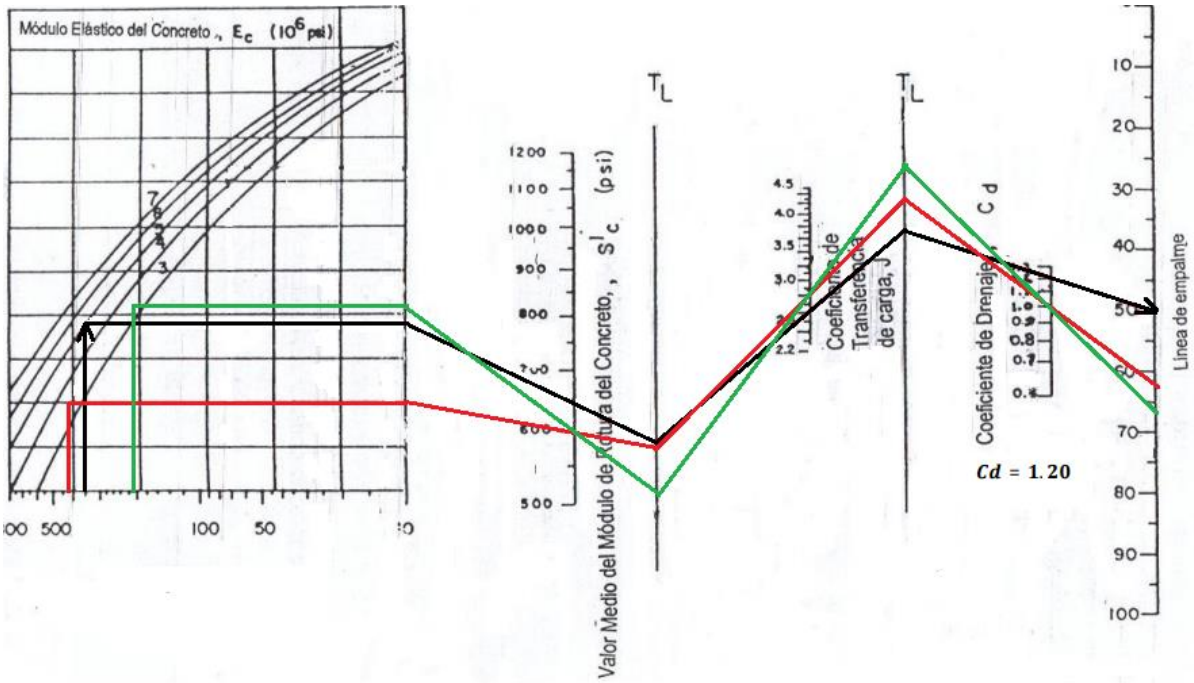



Figura 28. Nomograma

Fuente: Elaboración propia.

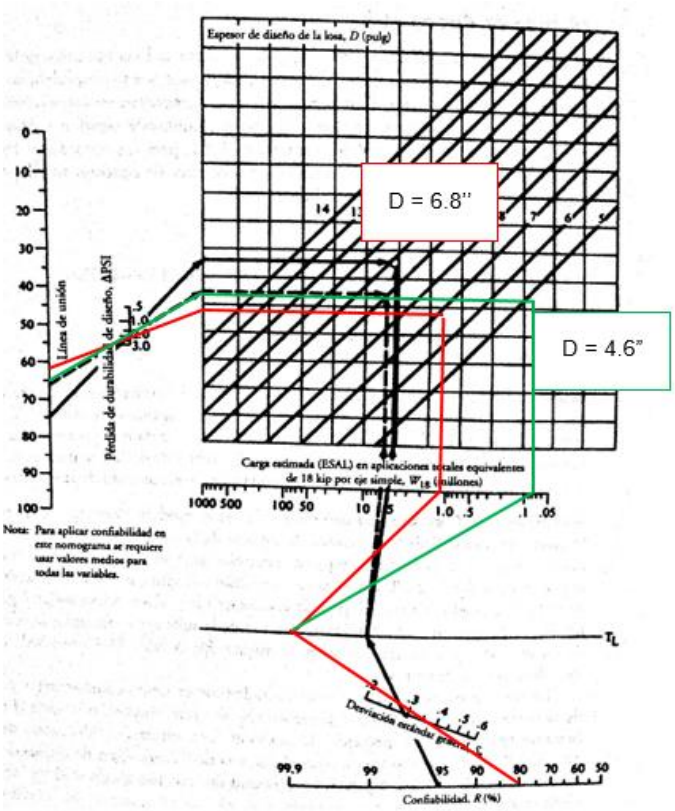



*Figura 29. Nomograma*

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Presupuesto de los pavimentos

Se calcula el presupuesto de cada uno de los pavimentos diseñados, en el pavimento flexible se contrata una constructora de asfalto donde ellos hacen el acarreo y colocación del asfalto, pero la municipalidad debe de alistar la base y subbase. Y en el pavimento rígido se calcula el concreto premezclado 280kg/cm2.

**<u>Pavimento flexible calle Mora:</u>**

Tabla 55. Presupuesto flexible calle Mora.

*Datos Generales Carretera:*

| | |
|---|---|
| Ancho Carpeta (M): | 3.5 |
| Longitud Aprox. A Intervenir (M): | 600 |
| Espesor de la Mezcla asfáltica (M): | 0.06 |
| Área Aprox. A intervenir (M3): | 126 |
| Esperos Material Granular Base: | 0.04 |
| Esperos Material Granularsubbase: | 0.1 |

*Materiales sobre el asfalto*

| Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Mezcla Asfáltica (ton), acarriada y colocada | 753 | Toneladas | ₡ 57 000.00 | ₡ 42 948 360.00 |
| Material Granular de 1.1/2" | 210 | m3 | ₡ 9 946.00 | ₡ 2 088 660.00 |
| Material Granular de 4" | 525 | m3 | ₡ 8 345.00 | ₡ 4 381 125.00 |
| | | | Subtotal (1) | ₡ 98 836 290.00 |

*Maquinaria*

| Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Niveladora | 40 | P/h | ₡ 50 000.00 | ₡ 2 000 000.00 |
| Compactadora | 30 | P/h | ₡ 15 000.00 | ₡ 450 000.00 |
| Backhoe | 30 | P/h | ₡ 15 000.00 | ₡ 450 000.00 |
| Vagoneta | 40 | p/h | ₡ 20 000.00 | ₡ 800 000.00 |
| | | | Subtotal (2) | ₡ 3 700 000.00 |

| Mano de Obra | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Peon de la municipalidad | 8 | Por hora | ₡ 1 685.00 | ₡ 1 617 600.00 |
| Maestro de obras | 2 | Por hora | ₡ 1 900.00 | ₡ 456 000.00 |
| | | | Subtotal (3) | ₡ 2 073 600.00 |

*Pintura*

| Descipción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Línea borde izquierda (continua) | 600 | km | ₡538 900.09 | ₡ 323 340.05 |
| Línea borde derecha (continua) | 1200 | km | ₡571 185.99 | ₡685 423.19 |
| Letreros de Alto | 1 | u | ₡40 862.03 | ₡40 862.03 |
| Letreros de Ceda | 1 | u | ₡40 862.03 | ₡40 862.03 |
| Letreros de Velocidad de KPH | 2 | u | ₡43 861.08 | ₡ 87 722.16 |
| Flechas | 2 | u | ₡27 383.62 | ₡ 54 767.24 |
| Captaluces 2 Cara Roja | 72 | u | ₡4 446.67 | ₡ 320 160.24 |
| Captaluces 2 Caras Amarillas | 36 | u | ₡4 446.67 | ₡ 160 080.12 |
| | | | Subtotal (4) | ₡ 1 713 217.06 |

| | |
|---|---|
| **TOTAL** | **₡ 106 323 107.06** |

Fuente: Elaboración propia.

**Pavimento rígido calle Mora:**

Tabla 56. Presupuesto rígido calle Mora.

*Datos Generales Carretera:*

| | |
|---|---|
| Ancho Carpeta (M): | 3.5 |
| Longitud Aprox. A Intervenir (M): | 600 |
| Espesor de losa de concreto (M): | 0.14 |
| Área Aprox. A intervenir (M3): | 294 |
| Esperos Material Granular Base (cm): | 0.2 |

*Materiales sobre Lastre*

| Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Concreto premezclado 280kg/cm2 | 273 | m3 | ₡177 639.84 | ₡ 48 495 676.32 |
| Material Granular de 1/2" | 420 | m3 | ₡ 9 946.00 | ₡ 4 177 320.00 |
| Varilla #8 | 144 | Unidad | ₡ 13 420.00 | ₡ 1 932 480.00 |
| Varilla #4 | 200 | Unidad | ₡ 3 060.00 | ₡ 612 000.00 |
| | | | Subtotal (1) | ₡ 110 434 952.64 |

*Maquinaria*

| Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Niveladora | 40 | P/h | ₡ 50 000.00 | ₡ 2 000 000.00 |
| Compactadora | 30 | P/h | ₡ 15 000.00 | ₡ 450 000.00 |
| Backhoe | 30 | P/h | ₡ 15 000.00 | ₡ 450 000.00 |
| Vagoneta | 40 | p/h | ₡ 20 000.00 | ₡ 800 000.00 |
| | | | Subtotal (2) | ₡ 3 700 000.00 |

| Mano de Obra | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Peon de la municipalidad | 12 | Por hora | ₡ 1 685.00 | ₡ 6 470 400.00 |
| Maestro de obras | 2 | Por hora | ₡ 1 900.00 | ₡ 456 000.00 |
| | | | Subtotal (3) | ₡ 6 926 400.00 |

*Pintura*

| Descipción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Línea borde izquierda (continua) | 600 | km | ₡538 900.09 | ₡ 323 340.05 |
| Línea borde derecha (continua) | 1200 | km | ₡571 185.99 | ₡685 423.19 |
| Letreros de Alto | 1 | u | ₡40 862.03 | ₡40 862.03 |
| Letreros de Ceda | 1 | u | ₡40 862.03 | ₡40 862.03 |
| Letreros de Velocidad de KPH | 2 | u | ₡43 861.08 | ₡ 87 722.16 |
| Flechas | 2 | u | ₡27 383.62 | ₡ 54 767.24 |
| Captaluces 2 Cara Roja | 72 | u | ₡4 446.67 | ₡ 320 160.24 |
| Captaluces 2 Caras Amarillas | 36 | u | ₡4 446.67 | ₡ 160 080.12 |
| | | | Subtotal (4) | ₡ 1 713 217.06 |

| | |
|---|---|
| **TOTAL** | **₡ 122 774 569.70** |

Fuente: Elaboración propia.

**Pavimento flexible calle brujos:**

Tabla 57. Presupuesto flexible calle Brujos.

*Datos Generales Carretera:*

| | |
|---|---|
| Ancho Carpeta (M): | 3.5 |
| Longitud Aprox. A Intervenir (M): | 900 |
| Espesor de la Mezcla asfaltica (M): | 0.15 |
| Área Aprox. A intervenir (M3): | 472.5 |
| Esperos Material Granular Base: | 0.2 |
| Esperos Material Granularsubbase: | 0.25 |

*Materiales sobre Lastre*

| Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Mezcla Asfáltica (ton), acarriada y colo | 1 087 | Toneladas | ₡ 57 000.00 | ₡ 61 944 750.00 |
| Material Granular de 1/2" | 630 | m3 | ₡ 9 946.00 | ₡ 6 265 980.00 |
| Material Granular de 4" | 788 | m3 | ₡ 8 345.00 | ₡ 6 571 687.50 |
| | | | Subtotal (1) | ₡ 149 564 835.00 |

*Maquinaria*

| Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Niveladora | 56 | P/h | ₡ 50 000.00 | ₡ 2 800 000.00 |
| Compactadora | 40 | P/h | ₡ 15 000.00 | ₡ 600 000.00 |
| Backhoe | 40 | P/h | ₡ 15 000.00 | ₡ 600 000.00 |
| Vagoneta | 56 | p/h | ₡ 20 000.00 | ₡ 1 120 000.00 |
| | | | Subtotal (2) | ₡ 5 120 000.00 |

| Mano de Obra | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Peon de la municipalidad | 8 | Por hora | ₡ 1 685.00 | ₡ 2 696 000.00 |
| Maestro de obras | 2 | Por hora | ₡ 1 900.00 | ₡ 760 000.00 |
| | | | Subtotal (3) | ₡ 3 456 000.00 |

*Pintura*

| Descipción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Línea borde izquierda (continua) | 900 | km | ₡538 900.09 | ₡ 485 010.08 |
| Línea borde derecha (continua) | 1800 | km | ₡571 185.99 | ₡1 028 134.78 |
| Letreros de Alto | 2 | u | ₡40 862.03 | ₡81 724.06 |
| Letreros de Velocidad de KPH | 3 | u | ₡43 861.08 | ₡ 131 583.24 |
| Flechas | 4 | u | ₡27 383.62 | ₡ 109 534.48 |
| Captaluces 2 Cara Roja | 162 | u | ₡4 446.67 | ₡ 720 360.54 |
| Captaluces 2 Caras Amarillas | 81 | u | ₡4 446.67 | ₡ 360 180.27 |
| | | | Subtotal (4) | ₡ 2 916 527.45 |

| | |
|---|---|
| **TOTAL** | **₡ 161 057 362.45** |

Fuente: Elaboración propia.

**Pavimento rígido calle Brujos:**

Tabla 58. Presupuesto rígido de calle brujos.

*Datos Generales Carretera:*

| | |
|---|---|
| Ancho Carpeta (M): | 3.5 |
| Longitud Aprox. A Intervenir (M): | 900 |
| Espesor de la losa de concreto (M): | 0.18 |
| Área Aprox. A intervenir (M3): | 162 |
| Esperos Material Granular Base: | 0.3 |

*Materiales sobre Lastre*

| Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Concreto premezclado 280 kg/cm2 | 536 | m3 | ₡177 639.84 | ₡ 95 126 134.32 |
| Material Granular de 1.1/2" | 945 | m3 | ₡ 9 946.00 | ₡ 9 398 970.00 |
| Varilla #8 | 216 | unidad | ₡ 13 420.00 | ₡ 2 898 720.00 |
| Varilla #4 | 300 | unidad | ₡ 3 060.00 | ₡ 918 000.00 |
| | | | Subtotal (1) | ₡ 216 683 648.64 |

*Maquinaria*

| Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Niveladora | 56 | P/h | ₡ 50 000.00 | ₡ 2 800 000.00 |
| Compactadora | 40 | P/h | ₡ 15 000.00 | ₡ 600 000.00 |
| Backhoe | 40 | P/h | ₡ 15 000.00 | ₡ 600 000.00 |
| Vagoneta | 56 | p/h | ₡ 20 000.00 | ₡ 1 120 000.00 |
| | | | Subtotal (2) | ₡ 5 120 000.00 |

| Mano de Obra | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Peon de la municipalidad | 16 | Por hora | ₡ 1 685.00 | ₡ 9 705 600.00 |
| Maestro de obras | 3 | Por hora | ₡ 1 900.00 | ₡ 2 743 600.00 |
| | | | Subtotal (3) | ₡ 12 449 200.00 |

*Pintura*

| Descipción | Cantidad | Unidad | Costo Unitario | Costo Total |
|---|---|---|---|---|
| Línea borde izquierda (continua) | 900 | km | ₡538 900.09 | ₡ 485 010.08 |
| Línea borde derecha (continua) | 1800 | km | ₡571 185.99 | ₡1 028 134.78 |
| Letreros de Alto | 2 | u | ₡40 862.03 | ₡81 724.06 |
| Letreros de Velocidad de KPH | 3 | u | ₡43 861.08 | ₡ 131 583.24 |
| Flechas | 4 | u | ₡27 383.62 | ₡ 109 534.48 |
| Captaluces 2 Cara Roja | 162 | u | ₡4 446.67 | ₡ 720 360.54 |
| Captaluces 2 Caras Amarillas | 81 | u | ₡4 446.67 | ₡ 360 180.27 |
| | | | Subtotal (4) | ₡ 2 916 527.45 |

| | |
|---|---|
| **TOTAL** | **₡ 237 169 376.09** |

Fuente: Elaboración propia.

## 4.3. Especificaciones técnicas

### 4.3.1. Especificaciones técnicas de la mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica en caliente utilizada para capas, sobre-capas y actividades de conservación donde la superficie de ruedo existente consiste en concreto asfáltico, deberá cumplir con los requisitos que se indican a continuación, mismos que se determinarán a partir de la metodología de diseño Marshall, estándar o modificada, según el tamaño máximo del agregado de diseño, conforme a lo indicado en el Manual MS-2, Métodos de diseño de mezcla, del Instituto del Asfalto o bien otro método requerido y aprobado por la Ingeniería de Proyecto.

1. En todo caso aplicable se empleará la normativa de preparación de especímenes Marshall de la norma nacional INTE 04-01-10-06 (ASTM D 6926), “Método de ensayo para preparar especímenes de mezcla asfáltica usando el equipo Marshall estándar”.
2. El tamaño máximo nominal de los agregados por utilizar en la elaboración de la mezcla asfáltica deberá ser el que corresponde a 12.7 mm.
3. La estabilidad (INTE 04-01-11-06) deberá ser mayor o igual a 800 kg, para el método Marshall estándar; y mayor o igual a 1800 kg, para el método Marshall modificado.
4. El flujo (INTE 04-01-11-06) estará dentro del rango de 27,5 ± 7,5 centésimas de centímetro, para el método Marshall; y dentro del rango de 41,25 ± 11,25 centésimas de centímetro, para el método Marshall modificado.
5. La tolerancia en el contenido de cemento asfáltico será de ± 0,5 % respecto al contenido óptimo de cemento asfáltico, con respecto al peso total de la mezcla.
6. El contenido de vacíos con aire en pastillas Marshall será de 4,0 ± 1,0 %, para mezcla asfáltica por usar como superficie de ruedo o capa intermedia, y de 5,5 ± 2,5 %, para mezcla asfáltica por usar como base asfáltica.
7. La relación de polvo / asfalto efectivo tendrá un valor mínimo de 0,6 y un valor máximo de 1,3. Definida como el porcentaje por agregado que pasa el tamiz No. 200 dividido por el contenido de ligante efectivo por peso total de la mezcla.
8. El contenido de vacíos en el agregado mineral (VMA) será función del tamaño nominal del agregado en la mezcla y del contenido de vacíos en la fórmula de la mezcla para el trabajo, debe cumplir con los requisitos del CR-2010.

9. El resultado del método de ensayo para determinar el efecto del agua en la resistencia a la compresión de mezclas asfálticas compactadas (INTE 04-01-07-05) será mayor o igual a 75.

10. El porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VFA) estará dentro del rango conforme con la especificación vigente en el manual CR-2010

11. La temperatura de mezclado es la que deberá tener el cemento asfáltico para obtener una viscosidad cinemática de 170 +/-20 cSt, determinada a partir de la gráfica de viscosidad vrs. Temperatura (aportada por el proveedor de cemento asfaltico), usando determinaciones de viscosidad al menos a temperaturas de 125, 135 y 145 grados centígrados.

12. La superficie de la mezcla asfáltica colocada deberá ser cuidadosa y uniformemente compactada por apisonamiento. En la operación de compactación no se debe producir agrietamiento, deformación u ondulaciones de la mezcla asfáltica. La compactación deberá continuarse hasta que la mezcla quede con el espesor final deseado, con una superficie uniforme y con la densidad especificada. No se debe compactar la mezcla a temperaturas inferiores a los 110 °C.

13. El proceso de compactación debe ser controlado con densímetros nucleares calibrados con base en los núcleos de mezcla asfáltica extraídos del tramo de prueba. La mezcla deberá ser compactada a un valor de al menos el 92,0 por ciento de la gravedad específica máxima teórica, determinada de acuerdo con INTE 04-01-03-05.

14. De la capa compactada se deberán extraer núcleos de mezcla asfáltica de 150 mm de diámetro de acuerdo con lo indicado en AASHTO T 230, método B. Los agujeros remanentes de los núcleos deberán ser rellenados con mezcla asfáltica en frio o caliente. Dicha mezcla será compactada y nivelada al mismo espesor de la capa previamente colocada. Los núcleos de mezcla asfáltica deberán ser adecuadamente etiquetados en sitio y transportados cuidadosamente al laboratorio para su ensayo o almacenamiento. Ensayos de densidad y espesor de capa deberán ser ejecutados en los núcleos extraídos. Los resultados de dichos ensayos deberán ser suministrados al Ingeniero de Proyecto. No se permite el uso de ninguna mezcla de concreto hidráulico.

15. La mezcla deberá ser compactada con equipo alternativo en los bordillos de caño, paredes, cabezales y otras obras de arte que no son accesibles para los compactadores convencionales. La compactación deberá empezar por los bordes y avanzar gradualmente hacia el centro, excepto en las curvas peraltadas en donde el equipo de compactación avanzará del borde inferior al superior, paralelamente al eje de la vía y traslapando a cada paso en la forma definida en el patrón definido en la franja de control de compactación, hasta que la superficie total haya sido compactada. Los rodillos deberán llevar su llanta motriz del lado cercano a la Pavimentadora, excepto en los casos que autorice el Ingeniero de Proyecto y los cambios de dirección del compactador se harán sobre la mezcla ya compactada. Se tendrá cuidado durante el proceso de compactación en no desplazar lateralmente los bordes de la mezcla extendida. La compactación se deberá realizar de manera continua durante la jornada de trabajo y se complementará con el trabajo manual necesario para la corrección de todas las irregularidades que se puedan presentar. Se cuidará que los elementos de compactación estén siempre limpios, y si es preciso, húmedos. No se permitirán, sin embargo, excesos de agua en los aspersores de la maquinaria, que generen un choque térmico en el concreto asfáltico recién colocado. La compactación se continuará mientras las mezclas se encuentren en condiciones de ser compactada hasta alcanzar la densidad especificada y se concluirá con un apisonado final con un compactadores llantas de hule que borre las huellas dejadas por los compactadores de rodillos metálicos precedentes y sellen la superficie. La mejor temperatura para iniciar la compactación, es la máxima temperatura en que la mezcla soporta el rodillo sin originar excesivos movimientos horizontales. (Palmares, 2017, pág. 14)

### 4.3.2. Especificaciones técnicas de la base

Suministrar partículas duras y durables o fragmentos de piedra triturada, escoria o grava triturada y no contendrá partículas elongadas, raíces y restos vegetales; debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Abrasión de los Ángeles, AASHTO T 96 (50 % máx.)
- Índice de durabilidad (agregado grueso), AASHTO T 210 (35 mín)

- Índice de durabilidad (agregado fino), AASHTO T 210 (35 mín)
- Caras fracturadas retenidas en malla No. 4, ASTM D 5821 (50 % mín)
- Índice plástico no mayor de 4.
- Límite líquido, ASSHTO T 89 (25 máx.).
- La granulometría de los agregados se obtendrá quebrando, tamizado y mezclando si es necesario. El agregado fino, material que pasa la malla 4,75 mm, consiste en arena natural o quebrada, y partículas minerales finas.
- Granulometría Graduación C según CR-2010.
- CBR mayor o igual a 80
- Compactación 95% de la prueba AASHTO T 180, método D
- Libre de materia orgánica, grumos o arcillas (Palmares, 2017, pág. 20)

### 4.3.3. Especificaciones técnicas de la subbase

Suministrar partículas duras y durables o fragmentos de piedra triturada, escoria o grava triturada y no contendrán partículas elongadas, raíces y restos vegetales; debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Abrasión de los Ángeles, AASHTO T 96 (50 % máx.)
- Índice de durabilidad (agregado grueso), AASHTO T 210 (35 mín)
- Índice de durabilidad (agregado fino), AASHTO T 210 (35 mín)
- Caras fracturadas retenidas en malla No. 4, ASTM D 5821 (50 % mín)
- Índice plástico no mayor de 7.
- Límite líquido, AASHTO T 89 (30 máx.).
- La granulometría de los agregados se obtendrá quebrando, tamizando y mezclando si es necesario. El agregado fino, material que pasa la malla 4,75 mm, consiste en arena natural o quebrada, y partículas minerales finas.
- Granulometría Graduación B según CR-2010.
- CBR mayor o igual a 30
- Compactación 95% de la prueba AASHTO T 180, método D
- Libre de materia orgánica, grumos o arcilla. (Palmares, 2017, pág. 17)

# Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

## 5.1. Conclusiones

Se determina que para los diseños de pavimentos flexibles se pueden obtener los espesores de cada capa para cada una de las calles por investigar. Las dos calles en estudio cuentan con diferentes espesores debido al número de ESAL con el que cuenta cada una de ellas. Se define que para Calle Mora son de 3 pulg de mezcla asfáltica, 3 pulg de base y 10 pulg de subbase, lo que generaría un agrietamiento del 35% con un daño relativo del 13%, sin embargo, para reducir el porcentaje de agrietamiento y daño relativo se toma le decisión de aumentar el espesor de la mezcla asfáltica a 6 pulg para que cumpla con su vida útil de 15 años, reduciendo un 9% el agrietamiento y un 5% el daño relativo.

Para Calle Brujos los espesores de las capas son de 4.5 pulg de mezcla asfáltica, 4 pulg de base y 9 pulg de subbase, lo que genera un 90% de agrietamiento y un 123% de daño relativo, esto implica que no se cumpla con el 75% de agrietamiento máximo establecido por el LANAMME. Debido a lo anterior, se aumentan los espesores de las capas, pasando a 6 pulg de mezcla asfáltica, 8 pulg de base y 10 pulg de subbase, logrando con esta nueva combinación un 62% de agrietamiento y un 26% de daño relativo.

Comparando los porcentajes de LANAMME con los del MOPT se observa que, con la fórmula del MOPT de hace 11 años, se obtiene para calle Mora un 20% menos con respecto al porcentaje de agrietamiento que da el LANAMME, el cual está vigente. En calle Brujos este porcentaje da un 50% menor que con respecto al del LANANME, por lo que la rigurosidad y el nivel de detalle que utiliza la norma del LANAMME hace que sea de mayor utilidad y veracidad. Además, al estar vigente hace que los cálculos se actualicen a la realidad que enfrenta el país.

La deformación total con respecto al del LANAMME es de 8.8 mm para calle Mora y de 11 mm para calle Brujos, por lo que la deformación de esta vía va a ser 25% mayor debido a la cantidad de ejes equivalentes.

Se establece que, para los diseños de pavimentos rígidos, con una subbase de 8 pulg para calle Mora, el espesor de la losa debe ser de 5.4 pulg. De igual manera, los cálculos para calle Brujos definen que con una subbase de 12 pulg se obtiene un espesor de la losa de 6.8 pulg.

Para calle Mora se obtiene un presupuesto de alrededor de ₡107 000 000 para asfalto y un 15% mayor a esto en el caso de concreto. Comparado el presupuesto de calle Brujos se obtiene un 50% mayor en asfalto y un 92% mayor en concreto y debido a que calle Mora mide 600 m y calle Brujos mide 900 m. El presupuesto por metro lineal de cada una es de ₡178 000 en asfalto y ₡205 000 en concreto para calle Mora. A su vez, para calle Brujos es de ₡179 000 en asfalto y ₡264 000 en concreto, variando estos precios debido a los requerimientos que hay en cada una de ellas.

## 5.2. Recomendaciones

Para una buena carretera es importante un buen diseño de pavimentos, pero también debe cumplir con los parámetros de diseño y especificaciones técnicas asignadas para cada etapa, con el fin de garantizar que la carretera no sufra daños o no cumpla con su vida útil. También para que las calles se encuentren en buen estado, se debe darle un mantenimiento adecuado; no dejar que hasta que se fisuren, se le hagan huecos o sufra algún daño mayor repararlas.

Es importante que cuando se vaya a construir una carretera ver qué problemas pueden afectar la estructura de la calle, en los cantones pequeños a las orillas de las calles se construye el alcantarillado pluvial, problema que si no se construye como se debe esto afecta una estructura de pavimentos porque el agua al salirse de las alcantarillas, se mete entre las capas de material, produce una saturación, que las capas no resistan las características establecidas o bien el funcionamiento que deben de cumplir y pueden fallar.

Todo tipo de construcción debe cumplir con los requisitos establecidos como: que las personas que están a cargo de la obra sean especializadas en el área, que los materiales

por utilizar sean los adecuados y cumplan con los requisitos solicitados, la maquinaria sea conveniente para la obra.

La inspección de los encargados como ingenieros de la obra es muy importante para que la construcción se lleve a cabo de la mejor manera y así corregir los errores a tiempo y no cuando el proyecto está terminado.

## VI. Bibliografía


*Análisis General de los Pavimentos Flexibles.* (s.f.). Obtenido de Diseño de Pavimentos Flexibles: http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Pavimentos%20Flexibles/4%20Dise%C3%B1o%20de%20Pavimentos%20Flexibles.pdf

*Arcillas.* (2011). Obtenido de Arcillas: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_tecic/211/algloki/pdfs/ARCILLAS.pdf

Barrantes, I. E. (2014). *Programa de infraestructura del transporte.* LANAME, Unidad de Gestión Municipal, San José. Recuperado el 21 de Marzo de 2018

Calo, I. D. (19 de 11 de 2014). *Diseño de pavimentos rígidos*. Obtenido de http://www.icpa.org.ar/publico/files/03-Jornada-ICPA-DNV-y-Presentacion-manual-CABA-noviembre-2014/03-Diseno-de-Pavimentos-Rigidos.pdf

Castillo, C. L. (2011). *175 años de historia de Palmares 1834 - 2009.* San José : Universidad Estatal a Distancia .

Castro Herrera, J. A., & Barrantes Jiménez, R. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010.*

Chinchilla, E. (1987). Atlas Cantonales de Costa Rica. En C. M. Hernández, *El Valle de los Palmares* (pág. 100). Palmares, Alajuela: Ministerio de Cultura, Juventud y Deporte.

Duravía. (s.f). *El pavimento de concreto.*

*El Pavimento de Concreto.* (s.f.). Obtenido de Duravía: http://www.duravia.com.pe/wp-content/uploads/COLECCIONABLE-DURAVIA-V.2.pdf

*Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.* (s.f.). Obtenido de Instituto Nacional de Vías: ftp://ftp.ani.gov.co/Ruta%20del%20Sol%20I/Tramo%20Villetas%20%20-%20Guaduas/ENTREGA%20FINAL/disco28/ANEXO%20B%20-%20ESPECIFICACIONES/ESPECIFICACIONES%20CIVILES/G320.pdf

*Estimacion y Proyeccion de Población Distrital*. (Octubre de 2014). Obtenido de http://www.inec.go.cr/sites/default/files/documetos-biblioteca-virtual/reestimacionesdistritales_0.pdf

*Factor de distribución por carril*. (07 de 03 de 2011). Obtenido de Pavimentos: http://libro-pavimentos.blogspot.com/2011/03/factor-de-distribucion-por-carril.html

*Factor de distrinución por dirección*. (20 de 01 de 2013). Obtenido de Pavimentos: http://libro-pavimentos.blogspot.com/2013/01/factor-de-distribucion-por-direccion.html

Fernández, F. (2000). El modelo de las Cooperativas de Autogestión. En C. M. Hernández, *El Valle de los Palmares* (pág. 100). Palmares, Alajuela: Ministerio de Cultura, Juventud y Deportes.

Fernández, I. (2000). Palmares jirones de su historia. En C. M. Hernández, *El Valle de los Palmares* (pág. 100). Palmares, Alajuela: Ministerio de Cultura, Juventud y Deportes.

Giordani, C., & Leone, D. (s.f.). *Pavimentos.* Obtenido de Pavimentos: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Pavimentos.pdf

*Google Maps*. (2018). Obtenido de https://www.google.co.cr/maps/@10.0503466,-84.4387534,14.5z?hl=es

Hernández, C. M. (2000). *El Valle de los Palmares .* Palmares: Ministerio de Cultura, Juventud y Deportes .

Institute, A. (s.f). *Principios de construcción de paviemntos de Mezcla asfaltica en caliente.*

Iturbide, J. C. (11 de 2002). *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos.* Obtenido de Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos: http://www.concretonline.com/pdf/07construcciones/art_tec/cam060.pdf

LANAMME. (12 de 2009). *Análisis de Diseño Estructural del Pavimento Propuesto en la Concesión de la Carretera San José - Caldera.* Obtenido de LanammeUCR: http://www.lanamme.ucr.ac.cr/banco-de-informacion-digital-on-line/07-02-13/2009/asesorias-san-jose-caldera.pdf

LanammeUCR, L. N. (2009). *Estimaciones de Pesaje.* San Jose, Costa Rica: Universidad de Costa Rica. Obtenido de Lanamme UCR .

Loría, G. (2005). *Determinación de leyes y una especificación costarricense para fatiga de mezclas asfálticas en caliente.* Recuperado el 20 de Julio de 2018, de http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/productos-PITRA/Publicaciones/2005/LM-PI-PV-IN-17C%E2%80%9302IAF.pdf

Maldonado, I. J. (2000). *Acuerdo Centroamericano sobre Circulación por Carretera.* Guatemala: SEICA.

Molina, I. C. (2018). *Curso diseño de paviemntos.*

Montoya, I. G. (2008). *Clasificación de la Red Vial.* Obtenido de Ingeniería de Tránsito: https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/apuntes-ingenieria-de-transito.pdf

*Municipalidad de Palmares*. (26 de Febrero de 2016). Obtenido de http://www.munipalmares.go.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=2206:historia&catid=10007:informacion&Itemid=96

*Pavimentos* . (2010). Obtenido de Apuntes Ingeniería Civil: http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/09/tipos-de-pavimentos.html

Pérez, J. P., & Gardey, A. (2009). *Definición.de*. Obtenido de https://definicion.de/pavimento/

*Periodo de diseño - Pavimentos de concreto asfáltico método AASHTO - 93*. (09 de 2011). Obtenido de http://www.ingenierocivilinfo.com/2011/09/periodo-de-diseno-pavimentos-de.html

Rico Rodríguez, A., Téllez Gutiérrez, R., & Garnica Anguas, P. (1998). *Pavimentos flexibles. Problematica Metodologías de diseño y tendencias.*

*Volumenes de Tránsito Promedio Diario*. (05 de 2011). Obtenido de Cueva del Ingeniero Civil: http://www.cuevadelcivil.com/2011/05/volumenes-de-transito-promedio-diarios.html

# VII. ANEXOS

Para los cálculos de TPD (transito promedio diario) se necesita de la siguiente tabla, para obtener el factor diario por día.

Tabla 59. Factores diarios.

| | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 1,409 | 1,158 | 1,129 | 1,123 | 1,206 | 1,544 | 1,899 |
| Febrero | 1,163 | 1,104 | 0,994 | 0,996 | 0,963 | 1,437 | 1,547 |
| Marzo | 1,036 | 1,001 | 1,042 | 1,004 | 0,886 | 1,186 | 1,309 |
| Abril | 0,933 | 0,872 | 0,882 | 0,855 | 0,859 | 1,122 | 1,186 |
| Mayo | 1,027 | 0,938 | 0,901 | 0,894 | 0,852 | 1,214 | 1,414 |
| Junio | 0,934 | 0,946 | 0,906 | 0,916 | 0,846 | 1,179 | 1,305 |
| Julio | 0,861 | 0,827 | 0,816 | 0,858 | 0,813 | 1,176 | 1,094 |
| Agosto | 0,921 | 0,848 | 0,865 | 0,835 | 0,783 | 1,140 | 1,125 |
| Septiembre | 0,930 | 0,850 | 0,835 | 0,862 | 0,783 | 1,186 | 1,248 |
| Octubre | 0,888 | 0,881 | 0,907 | 0,810 | 0,727 | 0,982 | 1,165 |
| Noviembre | 1,079 | 0,882 | 0,870 | 1,042 | 0,828 | 1,103 | 1,234 |
| Diciembre | 1,005 | 1,012 | 1,005 | 0,995 | 0,980 | 1,364 | 1,460 |

Fuente: (Blanco, 2017)

Tabla 60. Distribución del volumen horario para una estación.

| Período | | Volumen | % |
|---|---|---|---|
| 00:00 | 01:00 | 12 | 0.36 |
| 01:00 | 02:00 | 6 | 0.18 |
| 02:00 | 03:00 | 14 | 0.43 |
| 03:00 | 04:00 | 22 | 0.67 |
| 04:00 | 05:00 | 46 | 1.4 |
| 05:00 | 06:00 | 134 | 4.08 |
| 06:00 | 07:00 | 213 | 6.48 |
| 07:00 | 08:00 | 216 | 6.57 |
| 08:00 | 09:00 | 196 | 5.96 |
| 09:00 | 10:00 | 179 | 5.44 |
| 10:00 | 11:00 | 181 | 5.5 |
| 11:00 | 12:00 | 191 | 5.81 |
| 12:00 | 13:00 | 184 | 5.6 |
| 13:00 | 14:00 | 206 | 6.27 |
| 14:00 | 15:00 | 216 | 6.57 |
| 15:00 | 16:00 | 208 | 6.33 |
| 16:00 | 17:00 | 239 | 7.27 |
| 17:00 | 18:00 | 225 | 6.84 |
| 18:00 | 19:00 | 192 | 5.84 |
| 19:00 | 20:00 | 134 | 4.08 |
| 20:00 | 21:00 | 123 | 3.74 |
| 21:00 | 22:00 | 80 | 2.43 |
| 22:00 | 23:00 | 56 | 1.7 |
| 23:00 | 00:00 | 15 | 0.46 |
| **Total** | | **3288** | **100.01** |

Fuente: (Blanco, 2017)

Gráficas para el cálculo de SN de calle Mora:

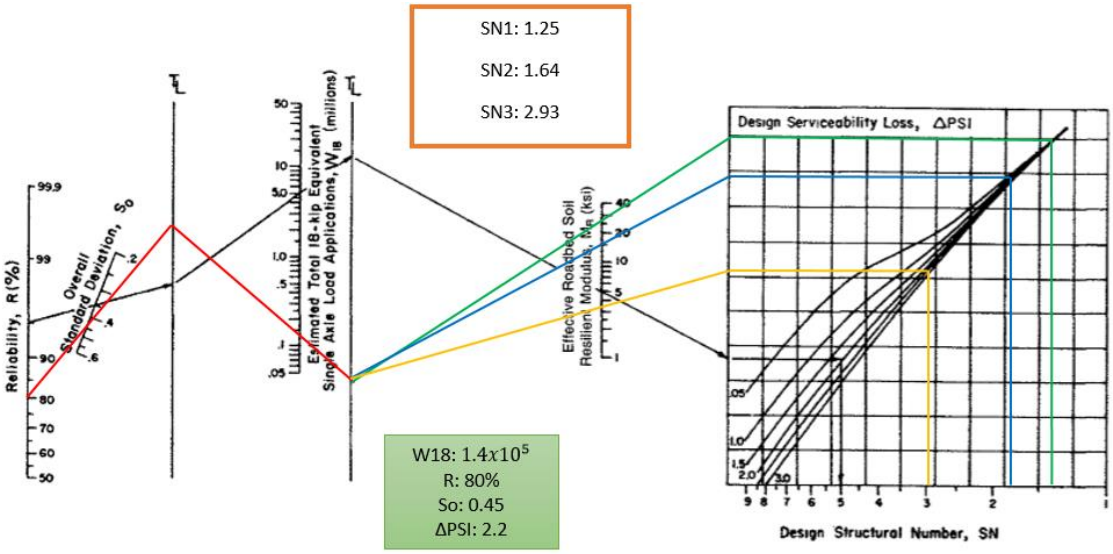



Figura 30. Valores números estructurales (SN).

Fuente: Elaboración propia.

Se presenta el nomograma para determinar $a_1$ que corresponde a la mezcla asfáltica, con el módulo de resiliencia de 450000 psi, se traza una línea vertical del punto 400000 psi hasta tocar con la línea de barrera y de ahí se traza otra línea horizontal hasta llegar al final de la cuadrícula.

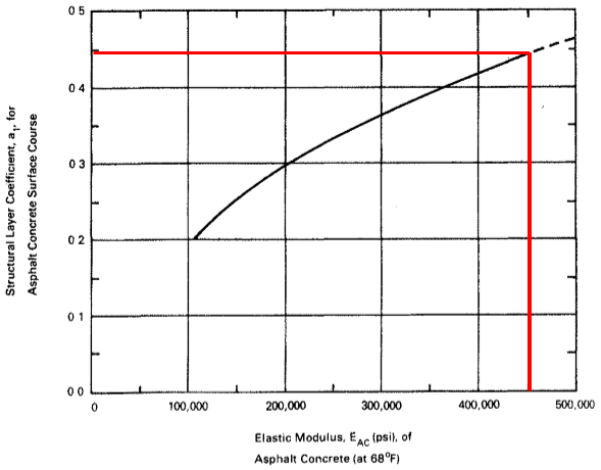



Figura 31. Valor $a_1$, para mezcla asfáltica.

Fuente: Elaboración propia.

En el nomograma para encontrar $a_2$ que corresponde a la base, se utiliza el CBR (80), en el valor de CBR se traza una línea horizontal de extremo a extremo y se determina el valor de $a_2$.

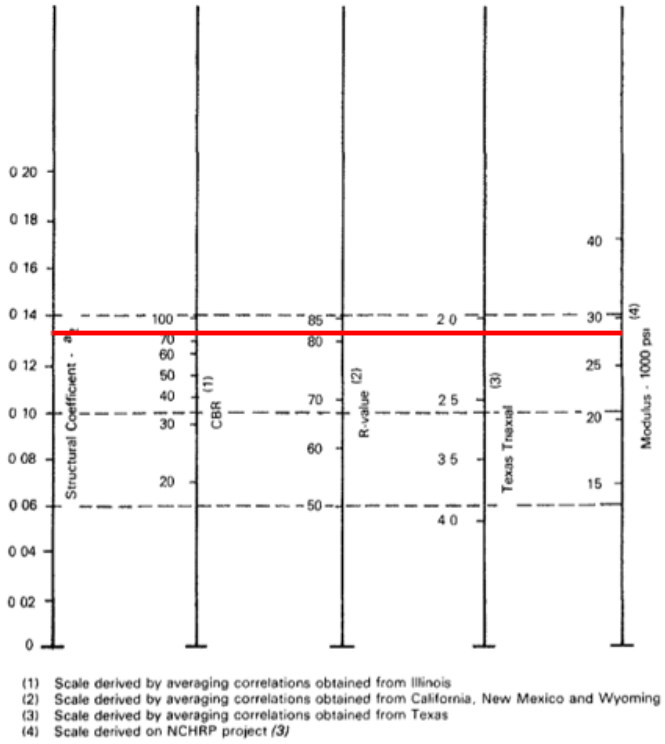



Figura 32. Valor $a_2$, base.

Fuente: Elaboración propia.

En el nomograma para encontrar $a_3$ que corresponde a la base, se utiliza el módulo de resiliencia de 15000 psi, en el valor de Mr se traza una línea horizontal de extremo a extremo y se determina el valor de $a_3$.

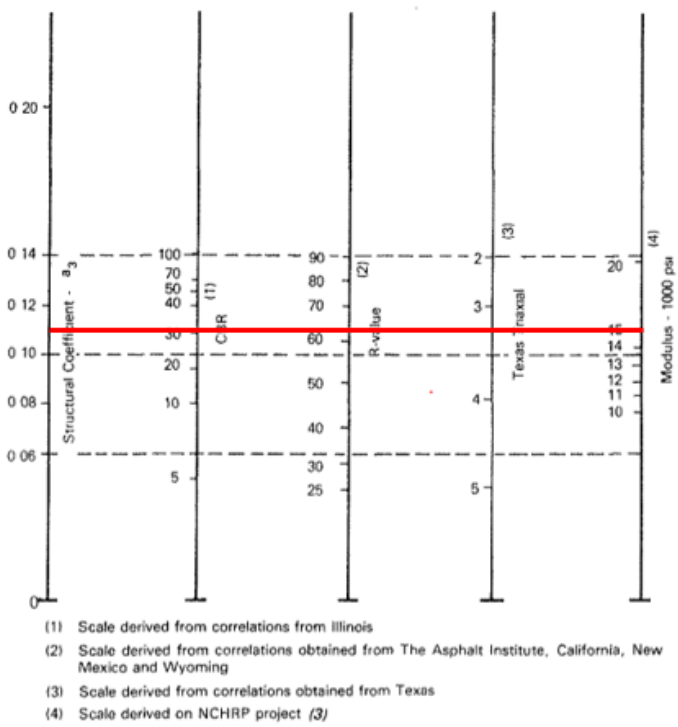



Figura 33. Valor $a_3$, subbase.

Fuente: Elaboración propia.

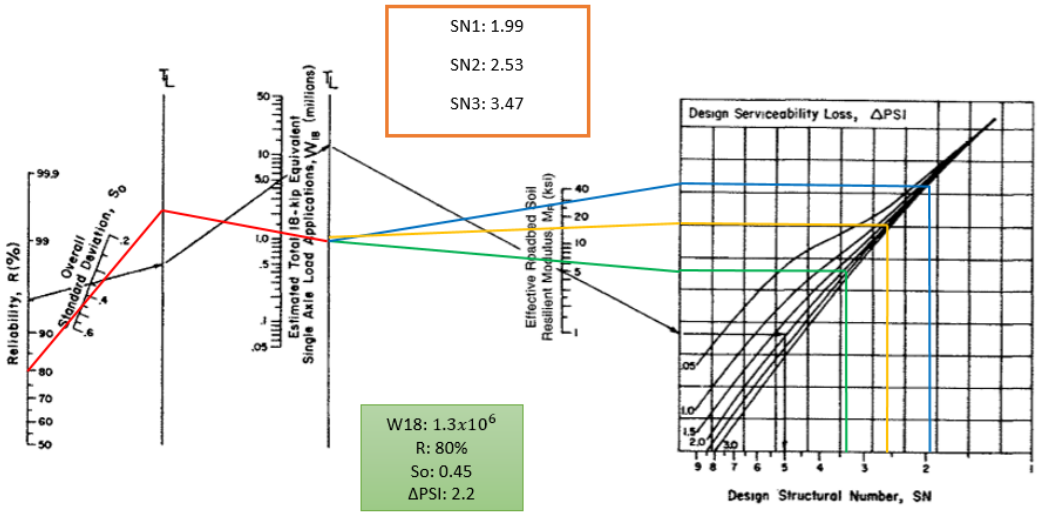



Figura 34. Cálculo de número de estructuras.

Fuente: Elaboración propia.