



UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA

Facultad Ingenierías y Tecnologías de la
Información

Escuela de Ingeniería Civil

Grado académico de licenciatura

Proyecto Final de Graduación

Propuesta de diseño de pavimento y diseño geométrico horizontal
y vertical de 1.9 km en San Rafael de Heredia, calles La Saca,
Naranjo y La Escuela

Sustentante:

Dylana Araya Mendoza

Tutor:

José María Ulate Zárate

Fecha de elaboración:

05/05/2021



COMITÉ ASESOR

Ing. Carlos Solís Molina

Tutor

Ing. José María Ulate Zárata

Lector

Ing. Giovanni Arguedas Morales

Representante



TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: “***Propuesta de Diseño de Pavimento y Diseño Geométrico Horizontal y Vertical de 1.9 km, en San Rafael de Heredia, Calles (La Saca, Naranja y La Escuela).***”, por el (la) estudiante: Dylana Araya Mendoza, fue aprobada por el Tribunal Examinador de la carrera de **Ingeniería Civil** de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en **Ingeniería Civil**:

Carlos Solís Molina

Tutor

José María Ulate Zárate

Lector

Giovanni Arguedas Morales

Representante

CARTA DE APROBACION POR PARTE DEL TUTOR Y DEL LECTOR DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN.

Heredia, 1 de mayo de 2021

Sres. Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: "Propuesta de Diseño de Pavimento y Diseño Geométrico Horizontal y Vertical de 1.9 km, en San Rafael de Heredia, Calles (La Saca, Naranjo y La Escuela)", elaborado por el (los) estudiante (s): Dylana Araya Mendoza, como requisito para que el (los) citado (s) estudiante (s) puedan optar por Licenciatura de 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,

JOSE MARIA
ULATE ZARATE
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por JOSÉ MARIA ULATE
ZARATE (FIRMA)
Fecha: 2021.05.04
17:46:13 -06'00'

Ing. José María Ulate Zárate

Heredia, 1 de mayo de 2021

Sres. Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

SD

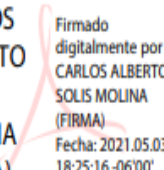
Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: "Propuesta de Diseño de Pavimento y Diseño Geométrico Horizontal y Vertical de 1.9 km, en San Rafael de Heredia, Calles (La Saca, Naranjo y La Escuela)", elaborado por el (los) estudiante (s): Dylana Araya Mendoza, como requisito para que el (los) citado (s) estudiante (s) puedan optar por Licenciatura de 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,

CARLOS
ALBERTO
SOLIS
MOLINA
(FIRMA)



Firmado digitalmente por
CARLOS ALBERTO
SOLIS MOLINA
(FIRMA)
Fecha: 2021.05.03
18:25:16 -06'00'

Ing. Carlos Solís Molina

Lector

CARTA DE APROBACIÓN DEL FILÓLOGO

San José, domingo 9 de mayo de 2021

Señores

Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

Facultad de Ingenierías y Tecnologías de Información

Universidad Latina de Costa Rica

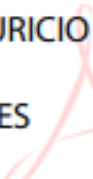
Estimados señores:

Yo, Edin Mauricio Buzano Barrantes, en mi condición de filólogo graduado en la Universidad de Costa Rica, certifico que leí y corregí el Proyecto de Graduación denominado: **“PROPUESTA DE DISEÑO DE PAVIMENTO Y DISEÑO GEOMÉTRICO HORIZONTAL Y VERTICAL DE 1.9 KM EN SAN RAFAEL DE HEREDIA, CALLES LAS SACA, NARANJO Y LA ESCUELA”**, el cual fue elaborado por la estudiante **Dylana Araya Mendoza**, como requisito para que la citada estudiante pueda optar por el grado académico de **Licenciatura en Ingeniería Civil**.

Se hizo la corrección del trabajo en aspectos tales como: construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, concordancia, coherencia, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico, por lo tanto, desde ese punto de vista considero que está listo para ser presentado como Proyecto de Graduación, por cuanto cumple con los requisitos establecidos por la Universidad.

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

Suscribe de ustedes cordialmente,

**EDIN MAURICIO
BUZANO
BARRANTES
(FIRMA)**  Firmado digitalmente
por EDIN MAURICIO
BUZANO BARRANTES
(FIRMA)
Fecha: 2021.05.09
07:23:52 -06'00'

Lic. Edin Mauricio Buzano Barrantes

No. de adscripción a COLYPRO 0502760638

“Carta autorización del autor (es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016, revisada el 24 de Abril de 2020

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 Mendoza, Dylana de los Angeles

De la Carrera / Programa:

autor(es) del trabajo final de graduación titulado:

"Propuesta de Diseño de Pavimento y Diseño Geométrico Horizontal y Vertical de 1.9 km, en San Rafael de Heredia, Calles La Saca, Naranja y La Escuela". Licenciatura Ingeniería Civil.

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, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo a 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 la misma.

La presente autorización se extiende el día (Día, fecha) 5 del mes mayo de año 2021 a las 6:00pm. Asimismo doy fe de la veracidad de los datos incluidos en el documento y eximo a la Universidad 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:



Agradecimientos

A Dios, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por permitirme sonreír ante mis logros, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias.

A mis padres, por el apoyo en todo momento, por los valores que me han inculcado y por confiar en mí. ¡Gracias por la motivación de siempre dar lo mejor de mí ante cualquier situación!

A mi familia, porque, con sus oraciones, consejos y palabras de aliento, hicieron de mí una mejor persona y de, una u otra forma, me acompañan en todas mis metas.

A mi abuelita Ener, con la sabiduría de Dios, me ha enseñado a ser mi ejemplo de fuerza. Gracias por el amor que me has dado y por enseñarme que nada es imposible si tengo fe. A través de su historia, soy la mujer que no se rinde fácilmente y enfrenta todo con valentía.

A todos los colaboradores de la Municipalidad de San Rafael de Heredia, que, en cierta forma, formaron parte de este proyecto. Gracias, en especial, a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron de sus conocimientos.

A mi tutor Ing. José María Ulate Zarate y a mi lector Ing. Carlos Solís, por el apoyo incondicional en el transcurso de mi proyecto de graduación. Gracias por esa enseñanza y esa motivación para llegar a ser ingenieros(as) con principios éticos.

A todos mis amigos y compañeros de carrera, especialmente a Jefferson, Aarón, Jeffrey y Leo, porque, en cada uno de ustedes, hay una persona muy especial. He aprendido y disfrutado con ustedes mis horas de estudio. Gracias por la ayuda y por la amistad sincera. ¡Los voy a extrañar futuros colegas!

Dedicatorias

A Dios, principalmente, porque ha sido mi guía. Gracias a Él he logrado concluir mi carrera.

A mis padres Andrés Araya y Lilliana Mendoza, quienes, con su amor, paciencia y esfuerzo, me han permitido llegar a cumplir hoy una meta más. Gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, y de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A toda mi familia, porque estuvieron siempre a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona, por apoyarme cuando más las necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día. ¡Siempre la llevo en mi corazón!

Resumen

El presente proyecto de graduación surge como una necesidad de la Municipalidad de San Rafael, donde se pretende contribuir con el diseño geométrico horizontal y vertical en calle La Saca, Naranjo y La Escuela, ubicadas en el cantón de San Rafael de Heredia, en el distrito de San Rafael y los Ángeles. Ello con el fin de que los conductores que transitan por la zona puedan desplazarse a los distintos distritos o cantones.

Se pretende, con el diseño, un mejoramiento de la ruta cantonal, al igual del diseño de pavimento donde se ve comprometido por el mal estado como se encuentra, con el fin de genera una mayor confortabilidad y seguridad como tal.

Se considera la metodología AASTHO-93 para el diseño convencional de pavimentos flexible, además del Manual Centroamericano de Diseño de Pavimentos. Por otro lado, la topografía del sitio será brindada por la Municipalidad de San Rafael, en el cual se hace un aporte para el nuevo trazado de la calle, desarrollando una propuesta de diseño geométrico vertical y horizontal, generando una circulación vehicular segura y adecuada.

Posteriormente, se diseñó la estructura del pavimento a partir del TPD. De esta forma, se pretende definir el tipo de flujo vehicular presente para que, mediante la implementación de los criterios y especificaciones técnicas que rigen en el país, se logre brindar una mayor calidad y seguridad a los usuarios de la ruta. El TPD se realizó por parte del estudiante por tres días y, por medio de informes de CBR brindados por la Municipalidad de San Rafael, se determina la estructura del pavimento, obteniendo los espesores de cada capa, como subrasante, subbase y base de diseño.

Por otro lado, se pretende ofrecer, a los usuarios, una estructura adecuada para la movilización en la zona. Además, con el mejoramiento de esta ruta, no involucra únicamente los vehículos, sino que busca una solución integral sin dejar de prever el desarrollo de la zona y las facilidades que se pueden proyectar a futuro.

Una vez culminada la propuesta, los planos detallados de los diseños de la carretera serán entregados a la Municipalidad de San Rafael de Heredia y, de esta forma, para que los puedan tomar en cuenta para el desarrollo del proyecto.

Summary

This graduation project was born as a need of the Municipalidad of San Rafael, where it is intended to contribute with the horizontal and vertical geometric design in La Saca Street, Naranjo and La Escuela, located in San Rafael of Heredia, to drivers passing through the area can travel to the different districts or cantons.

In addition, the design is intended to improve the route, as well as the pavement design where it is compromised by the poor condition in which it is located, generating greater comfort and safety.

AASTHO-93 methodology is considered for the conventional design of flexible pavements jointly by Central American Manual of Pavement Design. On the other hand, the topography of the site will be provided by Municipalidad of San Rafael, in which a contribution is made for the new layout of the street, developing a proposal for a vertical and horizontal geometric design, generating a safe and adequate vehicular circulation.

Subsequently, the pavement structure was designed from the ADT (average daily traffic), in this way it is intended to define the type of the current vehicular flow, by means of the implementation of the criteria and technical country specifications and to provide greater quality and safety to route users. The ADT was carried out by the student for seven days and CBR (Californian Bearing Ratio) tests are made to determine the soil parameter that quantifies its resistance capacity as a subgrade, subbase, and design base.

On the other hand, it is intended to offer users an adequate structure for mobilization in the area, in addition, with the improvement of this route, it does not only involve vehicles, but also seeks a comprehensive solution, while anticipating the development of the area and the facilities that can be projected in the future

Once the project proposal is completed, the detailed plans of the highway designs will be delivered to the Municipalidad of San Rafael de Heredia, so that they can take them into account for the development of the project.

Tabla de contenidos

Agradecimientos.....	viii
Dedicatorias.....	ix
Resumen	x
Summary	xi
Capítulo I: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
<i>1.1.1 Antecedentes nacionales</i>	<i>1</i>
<i>1.1.2 Antecedentes internacionales.....</i>	<i>2</i>
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
<i>1.3.1 Objetivo general</i>	<i>4</i>
<i>1.3.2 Objetivo específicos</i>	<i>4</i>
1.4 Justificación.....	4
1.5 Alcances.....	5
1.6 Limitaciones.....	6
1.7 Impacto.....	7
1.8 Hipótesis.....	7
Capítulo II: Marco teórico.....	8
2.1 Carreteras.....	8
<i>2.1.1 Clasificación de las carreteras</i>	<i>8</i>
2.1.1.1 Según su función.....	8
2.1.1.2 Según el tipo de terreno	9
2.1.1.3 Clasificación según características.....	10
2.1.1.4 Clasificación por tipo de diseño.....	11

2.2 Estructuras de pavimentos	13
2.2.1 Elementos de la estructura de pavimento	13
2.2.1.1 Tipos de pavimento	13
2.2.1.1.1 Pavimiento flexible	15
2.2.1.1.2 Pavimiento rígido	17
2.2.2 Levantamiento topográfico	17
2.2.2.1 Levantamiento planimétrico	18
2.2.2.2 Levantamiento altimétrico	18
2.2.3 Fallas en el pavimento	18
2.2.3.1 Tipo de fallas en los pavimentos flexibles	19
2.3 Parámetros y elementos del diseño	27
2.3.1 Análisis de tránsito	27
2.3.1.1 Estaciones permanentes de conteo	28
2.3.2 Volúmenes de tránsito	30
2.3.2.1 Tránsito Promedio Diario Anual	31
2.3.2.2 Tránsito de hora pico	31
2.3.3 Proyecciones futuras de la demanda del tránsito	32
2.3.4 Factor de distribución por carril	33
2.3.5 Velocidades	34
2.3.5.1 Velocidad de operación	34
2.3.5.2 Velocidades de diseño	35
2.3.5.3 Velocidades de ruedo	36
2.4 Diseño geométrico	37
2.4.1 Distancia de visibilidad	37
2.4.1.1 Visibilidad de parada	38
2.4.1.2 Visibilidad de adelantamiento	38

2.4.2 Alineamiento horizontal	39
2.4.2.1 Curvas circulares simples	40
2.4.2.2 Curvas circulares compuestas	41
2.4.2.3 Radio mínimo	43
2.4.3 Alineamiento vertical	44
2.4.3.1 Tangentes verticales	46
2.4.3.2 Curvas verticales	46
2.4.4 Diseño geométrico transversal	50
2.4.4.1 Calzada	51
2.4.4.2 Bermas	52
2.5 Diseño de pavimento	53
2.5.1 Análisis de tránsito	53
2.5.2 Cálculo de ejes equivalentes	55
2.5.2.1 Factor de distribución de carril	56
2.5.2.2 Factor de crecimiento	56
2.5.2.3 Factor de distribución por direccional	57
2.5.3 Variables de diseño	57
2.5.3.1 Índice de serviciabilidad	57
2.2.3.2 Nivel de confianza	58
2.5.3.3 Módulo de resiliencia	59
2.5.3.4 Ecuación de diseño AASHTO 93	61
2.5.3.5 Número estructural	62
2.5.3.6 Espesores de cada capa	62
2.5.4 Criterios de falla	63
2.5.4.1 Capacidad de carga por fatiga de la capa asfáltica	63
2.5.4.2 Capacidad de carga para la falla por deformación de subrasante	64

2.6 Señalización vial	64
2.6.1 Señalización vertical.....	65
2.6.2 Señales horizontales	67
Capítulo III: Marco metodológico	69
3.1 Enfoque metodológico de la investigación	69
3.2 Variables	70
3.3 Población y muestra	71
3.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	71
3.4.1 Levantamiento topográfico.....	71
3.4.2 Conteo vehicular	72
3.4.3 Criterios de diseño geométrico	73
3.4.4 Criterios de diseño de pavimento, ASSHTO 1993	76
3.4.4.1 Ejes equivalentes	77
3.4.4.2 Módulo de resiliente de la subrasante	78
3.4.4.3 Diseño pavimento	78
3.4.5 Falla por agrietamiento.....	81
3.4.6 Deformación permanente	83
3.4.6.1 Deformaciones permanentes de la mezcla asfáltica	83
3.4.6.2 Deformación permanente de la base y subbase granular	84
3.4.6.3 Deformación permanente de la subrasante	85
3.5 Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos	86
Capítulo IV: Análisis de los resultados.....	88
4.1 Análisis de diseño geométrico vertical y horizontal.....	88
4.1.1 Alineamiento horizontal.....	88
4.1.1.1 Velocidad de diseño	88
4.1.1.2 Radio mínimo	88

4.1.1.3 Curvas horizontales.....	88
4.1.2 <i>Alineamiento vertical</i>	91
4.1.2.1 Pendiente máxima y mínima en curvas verticales.....	91
4.1.2.2 Curvas verticales	91
4.1.3 <i>Dimensiones del carril</i>	93
4.2 Análisis del diseño de pavimentos	94
4.2.1 <i>Tránsito Promedio Diario (TPD)</i>	94
4.2.2 <i>Ejes Equivalentes (ESAL'S)</i>	96
4.2.3 <i>Estudio del suelo</i>	96
4.2.4 <i>Módulo de resiliencia de la subrasante</i>	97
4.2.5 <i>Números estructurales</i>	97
4.2.6 <i>Diseño de espesores</i>	99
4.2.7 <i>Fallas del pavimento</i>	100
4.2.7.1 <i>Deformaciones por fatiga</i>	101
4.2.7.2 <i>Falla por deformaciones permanentes</i>	102
4.3 Señalización vial	103
4.3.1 <i>Señalización vertical</i>	103
4.3.2 <i>Señalización horizontal</i>	105
Capítulo V: Propuesta	107
5.1 <i>Estructura propuesta de pavimento</i>	107
Conclusiones.....	108
Recomendaciones	109
Referencias bibliográficas	111
Anexos.....	113
Anexo A. Ubicación del prediseño de las calles	113
Anexo B. Planos del diseño geométrico	115

Anexo C. Conteo vehicular por día y volumen de tránsito diario	126
Anexo D. Cálculo de ESAL'S de cada calle.....	127
Anexo E. Número estructural por medio del programa AASHTO 93	128
Anexo F. Cálculos del <i>software</i> PITRA PAVE de cada calle.....	131
Anexo G. Informe de ensayos CBR.....	132
Anexo H. Cálculo de la propuesta de los espesores de la estructura de pavimento.....	138
Anexo I. Cálculo de falla por área de porcentaje de agrietamiento	139
Anexo J. Cálculo de falla por deformaciones permanentes	146

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Niveles de servicio de carreteras</i>	12
Tabla 2. Factor de distribución carril.....	34
Tabla 3. Velocidades de diseño de tramos homogéneos	35
Tabla 4. Distancia de visibilidad de parada (metros)	38
Tabla 5. Distancia de visibilidad de adelantamiento.	39
Tabla 6. Radios mínimos de curvas horizontales para distintas velocidades de diseño	44
Tabla 7. Clasificación de los terrenos en función a la pendiente	46
Tabla 8. Control de diseño para curvas vertical en cresta	49
Tabla 9. Control de diseño para curvas verticales cóncavas.....	50
Tabla 10. Ancho mínimo deseable de la calzada en la tangente	51
Tabla 11. Bombeo normal de calzada.....	52
Tabla 12. Ancho de berma.....	53
Tabla 13. Factor de distribución de carril.....	56
Tabla 14. Factores de crecimiento de tránsito	56
Tabla 15. Valores Z_r para diversos grados de confiabilidad	58
Tabla 16. Niveles recomendados de confiabilidad (R).....	59
Tabla 17. Valores recomendados para la desviación estándar (S_o).....	59
Tabla 18. Espesores mínimos sugeridos	63
Tabla 19. Variables	70
Tabla 20. Sistema de clasificación funcional	73

Tabla 21. Clasificación de las carreteras	74
Tabla 22. Pendientes máximas para carreteras locales	74
Tabla 23. Control de diseño para curvas verticales en cresta	75
Tabla 24. Control de diseño para curvas verticales cóncava o en columpio	75
Tabla 25. Guía para seleccionar el nivel de servicio para diseñar	76
Tabla 26. Ancho mínimo de los hombros y aceras.....	76
Tabla 27. Periodo de diseño.....	77
Tabla 28. Factor de distribución por dirección.....	77
Tabla 29. Factor de distribución por carril.....	78
Tabla 30. Factores camión MOPT	78
Tabla 31. Niveles de confianza e índices terminales de servicio.....	79
Tabla 32 Coeficiente de drenaje para pavimentos flexibles	79
Tabla 33. Espesores mínimos de pavimento flexible.....	80
Tabla 34. Falla para porcentaje de área agrietada	82
Tabla 35. Falla para deformaciones permanentes	83
Tabla 36. Elementos de curvas horizontales, calle Naranjo.....	89
Tabla 37. Elementos de curvas horizontales, calle La Saca	89
Tabla 38. Elementos de curva horizontales, calle La Escuela.....	90
Tabla 39. Elementos de curva verticales, calle Naranjo.....	92
Tabla 40. Elementos de curvas verticales, calle La Saca.....	92
Tabla 41. Elementos de curvas verticales, calle La Escuela	93
Tabla 42. Conteo vehicular, calle Naranjo	94
Tabla 43. Conteo vehicular, calle La Saca.....	94
Tabla 44. Conteo vehicular, calle La Escuela.....	95
Tabla 45. Resultados de TPD de cada calle, con un factor horario de 15	95
Tabla 46. Resultados de TPD de casa calle, con factor de 30,76.....	95
Tabla 47. Resultados de ESAL'S de cada calle	96
Tabla 48. CBR de las subrasantes.....	96
Tabla 49. Módulo resiliente de la subrasante de cada calle	97
Tabla 50. Módulo resiliente de las distintas capas.....	97
Tabla 51. Variables de diseño, calle Naranjo	97
Tabla 52. Variables de diseño, calle La Saca.....	98

Tabla 53. Variables de diseño, calle La Escuela	98
Tabla 54. Resultado de SN de cada calle	99
Tabla 55. Espesores de la estructura de pavimento, calle Naranja	99
Tabla 56. Espesores de la estructura de pavimento, calle La Saca	100
Tabla 57. Espesor de la estructura de pavimento, calle La Escuela	100
Tabla 58. Resultados de falla por fatiga	101
Tabla 59. Resultado de daños acumulados de cada calle	101
Tabla 60. Resultado de agrietamiento por fatiga	102
Tabla 61. Resultados de falla por deformación permanente	102
Tabla 62. Señalamiento vertical calle Naranja	104
Tabla 63. Señalamiento vertical, calle La Saca	104
Tabla 64. Señalamiento vertical, calle La Escuela	104
Tabla 65. Señales horizontales, calle Naranja	105
Tabla 66. Señales horizontales, calle La Saca.	106
Tabla 67. Señales horizontales, calle La Escuela	106
Tabla 68. Resultado de espesores, calle Naranja	107
<i>Tabla 69. Resultado de espesores, calle La Saca</i>	107
<i>Tabla 70. Resultado de espesores, calle La Escuela</i>	107
Tabla 71. Conteo vehicular por día, calle Naranja	126
Tabla 72. Conteo vehicular por día, calle La Saca	126
Tabla 73. Conteo vehicular por día, calle La Escuela.	126

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de terreno en carreteras	10
<i>Figura 2. Comportamiento de pavimento flexible y rígido</i>	14
<i>Figura 3. Estructura de pavimentos flexibles</i>	15
<i>Figura 4. Estructura de pavimento rígido</i>	17
<i>Figura 5. Deformación por ahuellamiento</i>	20
<i>Figura 6. Deformación por hundimiento</i>	20
<i>Figura 7. Deformación por corrugación</i>	21
<i>Figura 8. Deformación por corrimiento</i>	21
<i>Figura 9. Deformación por hinchamiento</i>	22

<i>Figura 10. Fisuras o agrietamientos longitudinales</i>	22
<i>Figura 11. Deformación de fisura transversal</i>	23
<i>Figura 12. Fisuras de piel de cocodrilo</i>	24
<i>Figura 13. Fisura en arco o parabólica</i>	24
<i>Figura 14. Desprendimiento asfáltico</i>	25
<i>Figura 15. Desintegración por peladura</i>	25
<i>Figura 16. Falla por exudación de asfalto</i>	26
<i>Figura 17. Exudación de agua</i>	26
<i>Figura 18. Bacheo y reparaciones</i>	27
Figura 19. Estación permanente de radar	30
Figura 20. Relación entre hora pico y volúmenes de TPD rural	32
Figura 21. Elementos geométricos de una curva circular simple	41
Figura 22. Curva circular compuesta por dos radios	42
Figura 23. La tangente vertical	46
Figura 24. Parábola de eje vertical simétrica	48
Figura 25. Curva vertical asimétrica	48
Figura 26. Curvas verticales convexas y curvas cóncavas	49
Figura 27. Sección típica pavimentada en recta	51
Figura 28. Distribución direccional	57
Figura 29. Señales de reglamentación	65
Figura 30. Señales de prevención	66
Figura 31. Señales de información	66
Figura 32. Fotografía #1	72
Figura 33. Fotografía #2.	72
Figura 34. Espesores en función del número estructural	79
Figura 35. Deformación del pavimento	100
Figura 36. Dimensiones de los dispositivos verticales	103
Figura 37. Ubicación del prediseño calle Naranjo.	113
Figura 38. Ubicación del prediseño calle La Saca.	113
Figura 39. Ubicación del prediseño calle La Escuela.	114
Figura 40. Planta calle Naranjo	115
Figura 41. Planta calle La Saca	116

Figura 42. Planta calle La Escuela	117
Figura 43. Tablas calle Naranjo	118
Figura 44. Tablas calle La Saca	119
Figura 45. Tablas calle La Escuela.	120
Figura 46. Perfil calle Naranjo	121
Figura 47. Perfil calle La Saca	122
Figura 48. Perfil calle La Escuela	123
Figura 49. Detalles de señalización	124
Figura 50. Secciones típicas TFG	125
Figura 51. ESAL´S, calle Naranjo	127
Figura 52. ESAL´S, calle La Saca	127
Figura 53. ESAL´S, calle La Escuela	127
Figura 54. Número estructural, calle Naranjo	128
Figura 55. Número estructural, calle La Saca	129
Figura 56. Número estructural, calle La Escuela	130
Figura 60. Resultados, calle Naranjo	131
Figura 64. Resultados, calle La Saca	131
Figura 68. Resultados, calle La Escuela	131
Figura 69. Informe de ensayo 1	132
Figura 70. Informe de ensayo 2	133
Figura 71. Informe de ensayo 3	134
Figura 72. Informe de ensayo 4	135
Figura 73. Informe de ensayo 5	136
Figura 74. Informe de ensayo 6	137
Figura 75. Cálculo de espesores, calle Naranjo	138
Figura 76. Cálculo de espesores, calle La Saca.	138
Figura 77. Cálculo de espesores, calle La Escuela.	138
Figura 78. Datos generales, calle Naranjo	139
Figura 79. Datos generales, calle La Saca	139
Figura 80. Datos generales, calle La Escuela	140
Figura 81. Cálculo del daño acumulado, calle Naranjo	140
Figura 82. Cálculo de daño acumulado, calle La Saca	141

Figura 83. Cálculo de daños acumulado, calle La Escuela.....	141
Figura 84. Porcentaje de agrietamiento por fatiga, calle Naranjo	142
Figura 85. Porcentaje de agrietamiento por fatiga, calle La Saca	142
Figura 86. Porcentaje de agrietamiento por fatiga, calle La Escuela.....	143
Figura 87. Gráfico 1, calle Naranjo	143
Figura 88. Gráfico 2, calle Naranjo	144
Figura 89. Gráfico 1, calle La Saca	144
Figura 90. Gráfico 2, calle La Saca	145
Figura 91. Gráfico 1, calle La Escuela.....	145
Figura 92. Gráfico 2, calle La Escuela	146
Figura 93. Deformación permanente MAC, calle Naranjo	146
Figura 94. Deformación permanente MAC, calle La Saca.....	146
Figura 95. Deformación permanente MAC, calle La Escuela	147
Figura 96. Deformaciones de la base, subbase y subrasante, calle Naranjo	147
Figura 97. Deformaciones de base, subbase y subrasante, calle La Saca	148
Figura 98. Deformaciones de base, subbase y subrasante, calle La Escuela.....	148
Figura 99. Deformación total, calle Naranjo	149
Figura 100. Deformación total, calle La Saca	149
Figura 101. Deformación total, calle La Escuela	149

Tabla de ecuaciones

Ecuación 1.....	43
Ecuación 2.....	61
Ecuación 3.....	61
Ecuación 4.....	61
Ecuación 5.....	61
Ecuación 6.....	62
Ecuación 7.....	63
Ecuación 8.....	63
Ecuación 9.....	64
Ecuación 10	73
Ecuación 11	77

Ecuación 12.....	77
Ecuación 13.....	79
Ecuación 14.....	80
Ecuación 15.....	80
Ecuación 16.....	80
Ecuación 17.....	80
Ecuación 18.....	80
Ecuación 19.....	81
Ecuación 20.....	81
Ecuación 21.....	81
Ecuación 22.....	81
Ecuación 23.....	82
Ecuación 24.....	82
Ecuación 25.....	83
Ecuación 26.....	83
Ecuación 27.....	84
Ecuación 28.....	84
Ecuación 29.....	84
Ecuación 30.....	84
Ecuación 31.....	84
Ecuación 32.....	84
Ecuación 33.....	84
Ecuación 34.....	85
Ecuación 35.....	85
Ecuación 36.....	86
Ecuación 37.....	86
Ecuación 38.....	86
Ecuación 39.....	86
Ecuación 40.....	86

Capítulo I: Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes nacionales

El cantón de San Rafael de Heredia presenta una topografía variada, ya que geológicamente está constituido por roca volcánica de la cordillera Volcánica Central, ubicado a 8 km norte de la ciudad de San José. Está dividido en 5 distritos y su superficie abarca 48.39 km². Se encuentra al norte con el Parque Nacional Braulio Carrillo y el distrito de Vara Blanca al sur con el cantón de San Pablo, al este con San Isidro, al oeste con el cantón de Barva y el cantón Central de Heredia

Las carreteras siempre han sido un mecanismo para el transporte. En el diseño y la ingeniería de carreteras, ha permitido, en la actualidad, un proceso de mejoramiento donde los factores, tales como eficiencia, seguridad e impacto viene a implementar. El diseñar una calzada le permite eliminar los obstáculos geográficos y reducir considerablemente el tiempo para trasladarse de una zona a otra.

Para los métodos de diseño para carreteras que se han desarrollado hasta la fecha en Costa Rica, son muy importantes, ya que vienen a determinar un buen comportamiento en las carreteras. Esto porque, en los años 1898 y 1944, las calles eran sinuosas e irregulares, y en los lugares montañosos, muchas calles contaban con una pendiente muy pronunciada, pues tenían valores entre el 10% y el 20% y en épocas lluviosas eran casi intransitables.

Existen muchos métodos de diseño para el pavimento, actualmente, en el país, se utiliza el AASHTO 93, ya que la mayoría o cierta parte de las vías o rutas nacionales es diseñada con pavimento flexible. Este método es uno de los más conveniente, pues considera aspectos como resistencia de los materiales, distribución, tasa de crecimiento anual y efectos de los esfuerzos producidos por la carga vehicular. Además, tiene las alternativas de poder estabilizar capas para tener un diseño más económico.

Por otro lado, Costa Rica, como parte de la región centroamericana, se caracteriza por ser un país que permite romper esa barrera del subdesarrollo, lo cual se complementa con la infraestructura vial. Por lo tanto, la mayor parte de la GAM posee un acceso vial a las distintas zonas, no obstante, todos los accesos cuentan con un mantenimiento adecuado, por lo cual se recomienda hacer un prediseño geométrico horizontal y vertical.

En ingeniería civil, el diseño geométrico de carreteras es el método más consistente en situar el trazado de una carretera o calle en el terreno; los parámetros para situar una carretera sobre la superficie son muchos, entre ellos la topografía del terreno, la geología, el medio ambiente, la hidrología o los factores sociales, urbanísticos y económicos. El primer paso para el trazado de una carretera es un estudio de viabilidad que determine el corredor donde podría situarse el trazado de la vía.

Para estos diseños de carreteras, el país realiza la siguiente división: las rutas nacionales serán diseñadas por el MOPT y las rutas secundarias estarán a cargo las municipalidades de cada cantón.

1.1.2 Antecedentes internacionales

Dentro del nivel internacional, según el Manual Centroamericano de Diseño de Pavimentos, (2002):

A finales de 1920, los gobiernos de la región centroamericana concedieron importancia a las carreteras y ampliaron antiguas veredas. En 1945, se considera la red vial en Centroamérica, ya que supera a los 40,000 kilómetros. En su mayoría, eran carreteras de tierra, transitables en época seca y muy pocos caminos, quizás el 10%, tenía una cubierta de rodadura.

En Centroamérica, el transporte automotor por carretera era el medio más importante para la movilización, siendo esta relevante en el intercambio comercial. En el año 1964, solo dos de cada tres toneladas utilizaban el transporte por carretera y en 1970 atendió al 94% de la carga total.

El crecimiento vial va desde 1945 a los años 2000, donde se muestra una tendencia de crecimiento respecto a las carreteras que eran recubiertas con una estructura de distribución de carga (pág. 1).

En el año de 1993, AASHTO publicó una guía de diseño para pavimentos que utilizaba ecuaciones provenientes de métodos empíricos desarrollados en el AASHO Road Test, donde se determinaron relaciones entre las distintas variables que intervienen en el diseño de pavimentos ya sea flexible o rígidos. Estas investigaciones fueron patrocinadas por la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales (AASHO ahora AASHTO). Fue creada como un estudio del desempeño de las estructuras de pavimentos de conocido espesor frente a distintas cargas de tráfico.

Por otro lado, para el diseño de pavimento flexible, se han utilizado, en sus inicios, métodos que tenían un enfoque empírico que se basan en resultados de experimentos y experiencias como se mencionó anteriormente. Estas observaciones y experiencias en un diseño de pavimentos flexible no fueron suficientes, por tanto, se buscaron nuevos métodos.

1.2 Planteamiento del problema

La Municipalidad de San Rafael de Heredia ofrece a los ciudadanos servicios de recolección de basura, limpieza de caños, administración de cementerios, mantenimiento y construir vías públicas y parques, además de ofrecer y dirigir servicios públicos. Por lo tanto, las carreteras son de suma importancia para el cantón.

Las condiciones actuales de la calle La Saca, Naranjo y La Escuela brindadas por la Municipalidad de San Rafael de Heredia presentan un grado de deterioro. Las condiciones como se encuentran no permiten un buen tránsito a la población, ya que poseen hundimientos severos, desplazamiento del pavimento provocados por vehículos pesados, déficit en la calidad del material asfáltico y, de igual modo, se provoca una mala circulación vehicular con los usuarios y genera un deterioro más rápido. Al mismo tiempo, el diseño geométrico de las calzadas se encuentra obsoleto y ha generado que las cargas transmitidas por los automóviles provoquen daños a la superficie de rodamiento de la carretera, lo cual se convierte en un problema para los que transitan en la zona.

Cuando una carretera ya no cumple los requisitos para un mantenimiento, es necesario buscar soluciones inmediatas para que el usuario que transita no se vea afectado, al igual que no le afecte al usuario de emergencias (ambulancias). Esto obliga a la municipalidad a reconstruir o ampliar los caminos existentes para obtener un buen tránsito en el sitio.

En la actualidad, el camino no se encuentra en un 100% de su superficie de ruedo, por lo que presenta material granular expuesto (lastre), provocando la granulometría de éste y que el circular con automóviles sea de alto riesgo para la vida útil de los vehículos, así como el tiempo de recorrido que se vuelve mayor con respecto a las distancias totales.

En este caso específico, la municipalidad opta por hacer un diseño geométrico horizontal y vertical, además de hacer un diseño de pavimento flexible que le permite flexionarse dependiendo de las cargas que transitan sobre la vía. Ello se debe a que, cada día, existe un crecimiento en la zona, pues existe la probabilidad de construir urbanizaciones y es de suma importancia impulsar el desarrollo económico con una reconstrucción de la infraestructura vial.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Elaborar una propuesta de diseño de pavimento y diseño geométrico horizontal y vertical de carreteras de 1.9 km, en el cantón de San Rafael de Heredia, calles La Saca, Naranjo y La Escuela.

1.3.2 Objetivo específicos

- Desarrollar un diseño geométrico vertical y horizontal en las calles La Saca, Naranjo y La Escuela con base en lo estipulado en el Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA 2011).
- Realizar una propuesta de señalización vertical y horizontal de las calles La Saca, Naranjo y La Escuela con base en lo estipulado en el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito (SIECA 2014).
- Efectuar una nueva propuesta de diseño de pavimentos para las calles La Saca, Naranjo y La Escuela en el cantón de San Rafael de Heredia, con base en lo estipulado en el AASTHO 1993.
- Calcular el volumen de tránsito promedio que se presenta en las calles La Saca, Naranjo y La Escuela por medio del TPD por tres días.
- Mostrar, en el *software* Pitra Pave, las deformaciones de las distintas capas de pavimento y mediante el Manual de Recomendaciones Técnicas para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles con la Incorporación de Criterios Mecánicos- Empíricos (2014). Se compara para obtener el cumplimiento de los espesores estructura de pavimento.

1.4 Justificación

Es importante mencionar que la estructura de una carretera es el progreso económico, social y cultural del país. Por ende, se quiere lograr, en este proyecto de graduación, un diseño que, mediante su ejecución, se puedan mejorar las condiciones del cantón de San Rafael de Heredia, lo cual beneficiaría a la población al tener un medio que les facilite el transporte de los principales recursos hacia los centros de consumo para su posterior venta.

La propuesta de diseño del presente proyecto es importante, ya que mejora la conectividad entre zonas locales y el acceso a servicios del cantón de San Rafael de Heredia, así como también se elabora un diseño geométrico horizontal y vertical y un diseño de pavimento aplicando *softwares* especializados para tal fin. Cabe resaltar que todo proyecto vial impulsa el crecimiento

urbano del cantón, por lo tanto, se debe hacer un buen trazado geométrico y un excelente diseño de pavimento.

Un buen diseño geométrico se basa en que se realicen estudios topográficos, geológicos, hidrológicos e hidráulicos si fuera el caso, para un mejor desarrollo constructivo. No obstante, este proyecto de graduación se basa más en los estudios topográficos, ya que no se pretende entrar al área de aguas o de suelos como tal.

Debido a las condiciones presentadas por las vías dadas por la Municipalidad de San Rafael del Heredia, se determina que es necesario el prediseño geométrico horizontal y vertical de la calzada, ya que, en un sector, se pretende ampliar la calzada. También, considerando el estado actual de las calles, no se recomienda un mantenimiento, por lo cual se pretende que, con este prediseño, se pueda mejorar la calzada, cumpliendo las normativas de diseño del Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA, 2011).

Por otro lado, se procura analizar una medida de la resistencia de soporte del suelo (CBR) brindado por la municipalidad, debido a las condiciones en mal estado en las que se encuentra la calzada, tal es el caso de calles La Saca, Naranjo y La Escuela. Además, se tiene la oportunidad de prediseñar el pavimento flexible totalmente nuevo, complementándolo con AASHTO 93, no obstante, poder definir los puntos críticos de baja capacidad y así diseñar. Además, se deben investigar y realizar los TPD necesarios para dar más fluidez y continuidad del flujo vehicular, para las obras viales del futuro tomando en cuenta una buena serviciabilidad de la vía.

Al mismo tiempo, se debe intervenir la vía antes de que llegue a su colapso por las fallas de ahuellamiento o fatiga.

1.5 Alcances

- Se realizó del diseño geométrico de las calles La Saca, Naranjo y La Escuela usando *software* como lo es el Civil 3D para la alineación geométrica.

- El diseño se basó con el Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA, 2011).

- La señalización vial se apoyó con el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito (SIECA, 2014).

- EL diseño de pavimento se ejecutó basado con el Manual Centroamericano de Diseño de Pavimentos (SIECA, 2002).

- Se generaron perfiles en Civil 3D para la determinación de una tabla resumen de movimiento de cortes y rellenos por realizar con el diseño geométrico propuesto (sin entrar en costos).
- Para el diseño de pavimentos nuevo se utilizó únicamente el método de AASHTO 93.
- Dentro de las investigaciones, la estudiante calculó el TPD por tres días.
- Para el conteo vehicular, se aplica el Manual de Especificaciones Técnicas para Realizar el Inventario y Evaluación de la Red Cantonal del MOPT.
- Para obtener la deformación máxima a tensión en la carpeta asfáltica y la deformación máxima a la compresión en la subrasante, se utiliza el *software* PITRA PAVE.
- Para determinar las deformaciones por fatiga y permanentes, se utiliza el Manual de Recomendaciones Técnicas para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles con la Incorporación de Criterios Mecánicos Empíricos (2014) de la Lanamme.
- Para obtener los números estructurales de cada estructura de pavimento, se utiliza el *software* AASHTO.

1.6 Limitaciones

- Topografía del sitio con curvas de nivel de toda el área a trabajar fueron brindadas por la Municipalidad de San Rafael de Heredia.
- La Municipalidad de San Rafael de Heredia brindó los CBR mediante el informe CACISA-CR-CCA-2020-373 de la subrasante de todas las calles, por lo tanto, se toma la decisión de diseñar un pavimento flexible nuevo, ya que no se cuenta con las características de los distintos materiales.
- Para el TPD, se realizó únicamente con el factor que evalúa la red cantonal de MOPT, pues no existe un factor que analice el impacto provocado por la pandemia COVID-19.
- Se utilizó únicamente la metodología AASHTO 93 para el diseño de pavimentos flexible.
- No se realizó un análisis o diseños de alcantarillado, sino el diseño de pavimentos y diseño geométrico únicamente, puesto que es el análisis hidráulico requiere de más estudios y la municipalidad no cuenta con ellos.
- Se diseñó una tabla resumen de movimiento de cortes y rellenos del diseño geométrico propuesto, sin embargo, no se pretende entrar en tema de costos.

- La Municipalidad de San Rafael no cuenta con los estudios de suelo (SPT), y por falta de recursos y tiempo, de la estudiante, se decide no entrar en el diseño de alcantarillado.

1.7 Impacto

Para los diseños de infraestructura de carreteras, se producen distintos efectos al medio ambiente que son importantes siempre de tener en cuenta. Por ende, efectos son sometidos a un análisis de impacto ambiental con el objetivo de identificar y valorar los impactos potenciales que futuras obras de este tipo le generarán al ambiente.

El objetivo de la evaluación ambiental es asegurar que los problemas potenciales sean identificados y tratados en la fase inicial de la planificación y diseño del proyecto.

Se espera que este proyecto de graduación tenga un impacto social positivo para el cantón de San Rafael de Heredia. Al realizar el prediseño geométrico vertical y horizontal, y el diseño de pavimento, se provocará un mejoramiento en el cantón de San Rafael. Además, se pretende generar un beneficio para las comunidades aledañas, elevando la calidad de un tránsito vehicular adecuado, es decir, una mejor transitividad y un menor tiempo de traslado para los usuarios que transitan esas vías.

Asimismo, se pretende provocar un crecimiento demográfico al mejorar el camino, ya que es razonable comprender el incremento en la demanda de hogares, en lo cual no se pretende enfocar el tema. Por otro lado, se prevé un mejoramiento en el sistema de transporte colectivo actual, pues la inversión privada en este rubro permitirá mejorar la movilización de la población y de las dinámicas económicas de la zona.

1.8 Hipótesis

Para el proyecto de graduación se consideró que no lleva hipótesis puesto que los diseños de pavimento y los diseños geométricos se van a basar en manuales o normas ya establecidas.

Por otro lado, se entiende que una hipótesis inicia de la suposición hecha a partir de unos datos que sirven de base para iniciar una investigación o una argumentación y como se mencionó anteriormente el prediseño geométrico se va a basar en Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA 2011) y para el diseño de pavimento se cuenta con AASHTO 93.

Capítulo II: Marco teórico

2.1 Carreteras

El libro *Diseño Geométrico de Carreteras* (2013) realiza la siguiente definición:

Una carretera es la infraestructura de transporte especialmente acondicionada dentro de todas unas fajas de terreno denominado derecho de vía, con el propósito de permitir la circulación de vehículos de manera continua en el espacio y en el tiempo, con niveles adecuados de seguridad (Cárdenas Grisales, 2013, pág. 1).

2.1.1 Clasificación de las carreteras

Para el diseño geométrico de cualquier calle, es importante conocer la ubicación la carretera, la cual se va a diseñar, ya que es agrupada por clase o sistemas de acuerdo con las características.

2.1.1.1 Según su función

Las carreteras se pueden clasificar según su función, necesidad operacional o de los intereses de la nación en sus diferentes niveles y los términos de servicios brindados. Éstas se clasifican (Cadenas Grisales, 2013 pag.3) de la siguiente forma:

- **Carreteras primarias o de primer orden:** son aquellas vías troncales, transversales y de accesos a las capitales de los departamentos, que cumplen la función básica de integración de las principales zonas de producción y de consumo del país y de éste con los demás países. Este tipo de carreteras puede ser de calzadas divididas según las exigencias del proyecto, y deben ser siempre pavimentadas (Cárdenas Grisales, 2013).
- **Carreteras secundarias o de segundo orden:** son aquellas vías que unen cabeceras municipales entre sí y/o que provienen de una cabecera municipal y conectan con una carretera Primaria. Las carreteras consideradas como secundarias pueden funcionar pavimentadas o en afirmado (Cárdenas Grisales, 2013).
- **Carreteras terciarias o de tercer orden:** son aquellas vías de acceso que unen cabeceras municipales con sus veredas, o que unen veredas entre sí. Las carreteras consideradas como terciarias deben funcionar en afirmado. En caso de pavimentarse, deben cumplir con las condiciones geométricas estipuladas para las carreteras secundarias (Cárdenas Grisales, 2013).

2.1.1.2 Según el tipo de terreno

Es de suma importancia conocer de la topografía en toda construcción de carretera. Según el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2013), se menciona que:

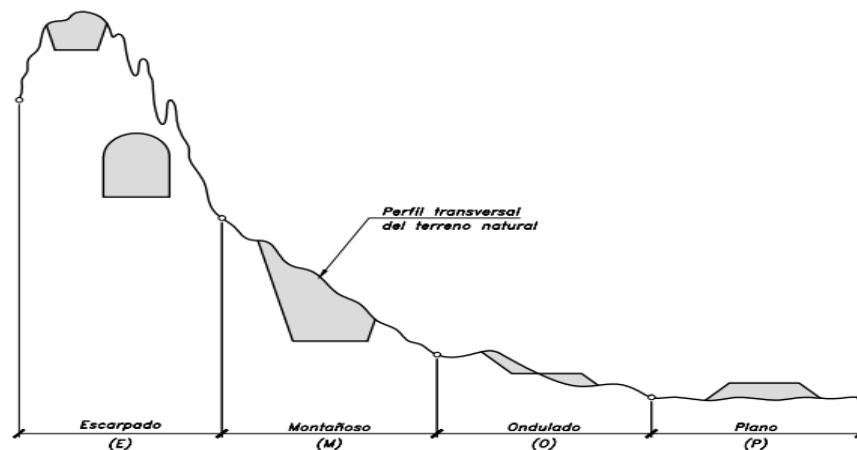
A lo largo de una carretera, pueden presentarse tramos homogéneos en diferentes tipos de terreno. Éstos se clasifican con base en las pendientes de sus laderas naturales en el entorno y transversalmente a la vía.

Las pendientes longitudinales y transversales del terreno son las inclinaciones naturales del terreno, medidas en el sentido longitudinal y transversal del eje de la vía. A su vez, la línea de máxima pendiente sobre el terreno natural es la inclinación máxima del terreno natural en cualquier dirección, alrededor del entorno del eje de la vía.

- **Carreteras en terreno plano:** es la combinación de alineamientos horizontal y vertical, que permite a los vehículos pesados mantener aproximadamente la misma velocidad que la de los vehículos livianos. Exigen mínimo movimiento de tierras durante la construcción, por lo que no presentan dificultad ni en el trazado ni en la explanación. Las pendientes longitudinales de las vías son normalmente menores al 3%.
- **Carreteras en terreno ondulado:** es la combinación de alineamientos horizontal y vertical que obliga a los vehículos pesados a reducir sus velocidades significativamente por debajo de la de los vehículos livianos, sin ocasionar que aquellos operen a velocidades sostenidas en pendiente por intervalos de tiempo prolongado. Durante la construcción, los movimientos de tierra son moderados, lo cual permite alineamientos más o menos rectos, sin mayores dificultades en el trazado y explanación. Sus pendientes longitudinales se encuentran entre el 3% y el 6%.
- **Carreteras en terreno montañoso:** es la combinación de alineamientos horizontal y vertical que obliga a los vehículos pesados a circular a velocidades sostenidas en pendiente a lo largo de distancias considerables o durante intervalos frecuentes. Generalmente, requieren grandes movimientos de tierra durante la construcción, razón por la cual presentan dificultades en el trazado y en la explanación. Sus pendientes longitudinales predominantes se encuentran entre el 6% y el 8%.

- **Carreteras en terreno escarpado:** es la combinación de alineamientos horizontal y vertical que obliga a los vehículos pesados a operar a menores velocidades sostenidas en pendiente que aquellas a las que operan en terreno montañoso, para distancias significativas o a intervalos muy frecuentes. Exigen el máximo movimiento de tierras durante la construcción, con muchas dificultades para el trazado y explanación, pues los alineamientos están prácticamente definidos por divisorias de aguas. Generalmente, sus pendientes longitudinales son superiores al 8% (Cárdenas Grisales, 2013, pág. 4).

Figura 1. Tipos de terreno en carreteras



Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2013)

En la figura 1, se muestra, de manera esquemática, un perfil trasversal de un terreno natural, donde se puede apreciar los tipos de terrenos que se explicaron anteriormente.

2.1.1.3 Clasificación según características

- **Autopistas:** son vías de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles y con control total de accesos. Las entradas y salidas de las autopistas se realizan únicamente a través de intersecciones a desnivel comúnmente llamadas distribuidores o intercambiadores (Cárdenas Grisales, 2013, pág. 7).
- **Carreteras multicarriles:** son carreteras divididas o no, con dos o más carriles por sentido y con control parcial de accesos. Las entradas y salidas se realizan a través de intersecciones a desnivel y a nivel (Cárdenas Grisales, 2013, pág. 7).

- **Carreteras de dos carriles:** constan de una sola calzada de dos carriles, uno por cada sentido de circulación, con intersecciones a nivel y acceso directo desde sus márgenes. (Cárdenas Grisales, 2013, pág. 7).

2.1.1.4 Clasificación por tipo de diseño

Normalmente, para la clasificación de diseño de carreteras, se usa el sistema funcional, sin embargo, es importante tomar en cuenta los criterios únicos que demandan una designación del diseño como tal. Por otro lado, se toma en cuenta los niveles de servicio como volúmenes comparables de tránsito. Según el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2013):

El primer paso en el proceso de diseño es definir la función que la vía va a tener. El nivel de servicio requerido para realizar esta función para el volumen previsto y composición del tránsito provee una base racional y de efectividad de costo para la selección de la velocidad de diseño y los criterios geométricos dentro de los rangos de valores disponibles para el proyectista. El uso de la clasificación funcional como un criterio de diseño debería integrar adecuadamente el proceso de planeamiento y diseño vial.

La aplicación del criterio de clasificación funcional de las carreteras es útil para dividir la red vial en segmentos de características similares en función de la demanda. La demanda ha sido expresada mediante los volúmenes de tránsito que comúnmente se expresan por el Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA), que ofrece la base fundamental para la subsiguiente identificación y cuantificación de los componentes primarios del diseño geométrico. Así, pueden agruparse en rangos de volúmenes que varían desde menos de 50 vehículos por día (VPD), de 500 a 3,000 vehículos por día, de 3,000 a 10,000 vehículos por día, de 10,000 a 20,000 vehículos por día, hasta mayores de 20,000 vehículos por día.

La oferta presentada en la solución vial adoptada se expresa mediante la capacidad expresada como “el máximo número de vehículos que pueden circular en un punto dado durante un período específico de tiempo, bajo condiciones prevalecientes de la carretera y el tránsito, asumiendo que no hay influencia del tránsito más adelante, dentro del punto en análisis”. Bajo condiciones ideales del tránsito y de las vías, las autopistas tienen una capacidad de 2,000 vehículos livianos por carril por hora. En carreteras de dos carriles, por otra parte, se alcanzan capacidades de 3,200 vehículos livianos por hora en ambos sentidos de la circulación. Las condiciones ideales se alcanzan con flujos ininterrumpidos, sin

interferencia lateral de vehículos o peatones, sin mezcla de vehículos pesados en la corriente del tránsito, con carriles normales de 3.60m de ancho, hombros de ancho apropiado, altas velocidades de diseño y carencia de restricciones en la distancia de visibilidad de adelantamiento o rebase.

Relacionado con la capacidad está el nivel de servicio, en que el flujo vehicular de servicio para diseño es el máximo volumen horario de tránsito que una carretera puede acomodar, sin que el grado de congestionamiento alcance los niveles preseleccionados por el diseñador, tras conciliar los intereses de los conductores, dispuestos quizá a tolerar un mínimo de congestionamiento. Los estándares de diseño vigentes predeterminarán algunos requerimientos básicos según la clasificación funcional de la vía.

El dimensionamiento de la capacidad y del nivel de servicio resulta crucial para el diseñador de cualquier carretera, tanto para establecer el tipo al que corresponde diseñarla, como para seleccionar los elementos que la conforman y sus dimensiones, tales como número y ancho de carriles, alineamientos, restricciones laterales, etc. (SIECA, 2011, pág. 31).

Tabla 1. Niveles de servicio de carreteras

Nivel de Servicio	Descripción
A	Flujo libre de vehículos, bajos volúmenes de tránsito y relativamente altas velocidades de operación (90 km/h o más).
B	Flujo libre razonable, pero la velocidad empieza a ser restringida por las condiciones del tránsito (80 km/h).
C	Se mantiene en zona estable, pero muchos conductores empiezan a sentir restricciones en su libertad para seleccionar su propia velocidad (70 km/h).
D	Acercándose a flujo inestable, los conductores tienen poca libertad para maniobrar. La velocidad se mantiene alrededor de 60 km/h.
E	Flujo inestable, suceden pequeños embotellamientos. La velocidad cae hasta 40 km/hr.
F	Flujo forzado, condiciones de "pare y siga", congestión de tránsito.

Fuentes: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras, 2011

2.2 Estructuras de pavimentos

El libro *Pavimentos, materiales, construcción y diseño* (2015) define los pavimentos como:

Estructuras viales multicapa, es decir, están constituidas por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales compuestas por materiales seleccionados. Estas estructuras son diseñadas para soportar las cargas impuestas por el tránsito y por las condiciones ambientales (función estructural). Asimismo, deben diseñarse con el fin de ofrecer un paso cómodo, seguro y confortable al parque automotor que se imponga sobre su superficie en determinado periodo de tiempo (objetivo funcional). Las cargas dinámicas de los vehículos que transitan sobre estas estructuras producen en las interfaces de las capas esfuerzos cíclicos y deformaciones verticales, horizontales y de corte. El pavimento se soporta sobre una subrasante natural o sobre una plataforma, que puede ser la subrasante mejorada, estabilizada o un terraplén (Rondón Quintana, 2015, pág. 13).

2.2.1 Elementos de la estructura de pavimento

La estructura de pavimentos está conformada por los tipos de pavimento y por los materiales, los cuales se explicarán a continuación.

2.2.1.1 Tipos de pavimento

La selección del tipo de pavimento adecuado para una carretera, según el “Manual de diseño de pavimento concreto” (2008, pág. 9) menciona:

La opción para un mejor pavimento está determinada por muchas variables entre las que están los criterios técnicos, los factores económicos del país o de la zona, de las fuentes de materiales, su idoneidad y distancia de acarreo, ahorros en energía, materiales y otros que en determinadas ocasiones pueden inclinar la decisión hacia un pavimento, como pueden ser las condiciones ambientales o la disponibilidad de equipos y de mano de obra.

Desde el punto de vista de la competitividad y de alcanzar mejores ofertas económicas, siempre será deseable mantener el máximo número posible de tipos de pavimentos ya que eso mantiene al día, técnica y económicamente hablando, los sistemas constructivos y evita que en determinadas ocasiones se pueda presentar una parálisis en la construcción de obras, si llegase a faltar un insumo de la construcción.

Hay condiciones que favorecen la utilización de un tipo de pavimento y otras que le quitan posibilidades, por lo tanto, en cada obra, se debe sopesar la pertinencia de una solución en

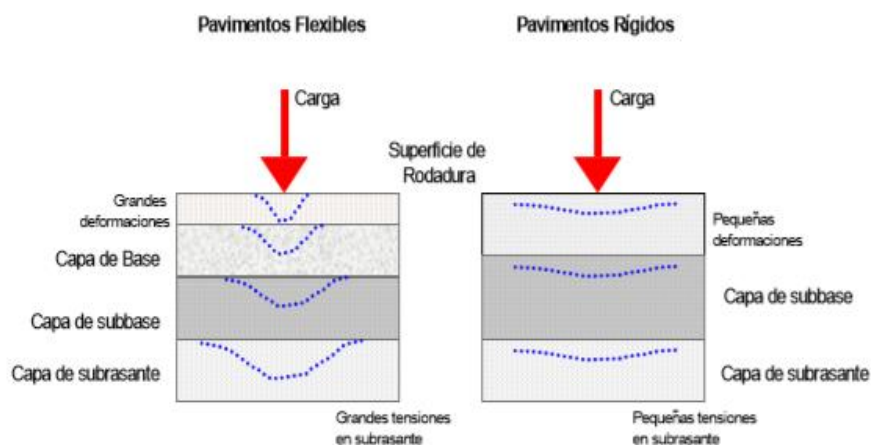
particular. A continuación, se enumerarán las variables que influyen en la elección del tipo de pavimento

En su contra, está que la presencia de juntas y la alta rigidez hacen que cuando se construyen sobre materiales erosionables se dé el fenómeno del bombeo que ocurre por la acción conjunta del paso de los vehículos y del agua, sobre todo, cuando las vías están destinadas a tránsitos medios y altos. El deterioro se puede atenuar y aun controlar cambiando el material de soporte de las losas, con una buena concepción de juntas y dotándolas de barras de transferencia de carga de acero liso (dovelas) e implementando un buen sistema de drenaje.

Es necesario en este punto advertir que los pavimentos de concreto son muy sensibles al subdiseño, o a la presencia de sobrecargas no contempladas en el estudio del tránsito. Por el contrario, un aumento en el espesor de diseño, de uno o dos centímetros proporciona una buena protección con relación a eventuales sobrecargas y pueden llegar a duplicar la vida útil del pavimento.

Una característica de las estructuras de los pavimentos de concreto es que se construyen en una sola etapa, lo cual hace que no exista incertidumbre sobre su comportamiento a largo plazo, pues no necesita sobre capas rutinarias, para mantener un adecuado nivel de servicio. Los pavimentos se dividen en rígidos y flexibles, de los cuales las cargas que transmiten en la fundación son muy diferentes según lo indican la Norma AASTHO 93 y el Manual Centroamericano de Diseño de Pavimentos.

Figura 2. Comportamiento de pavimento flexible y rígido



Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (2002)

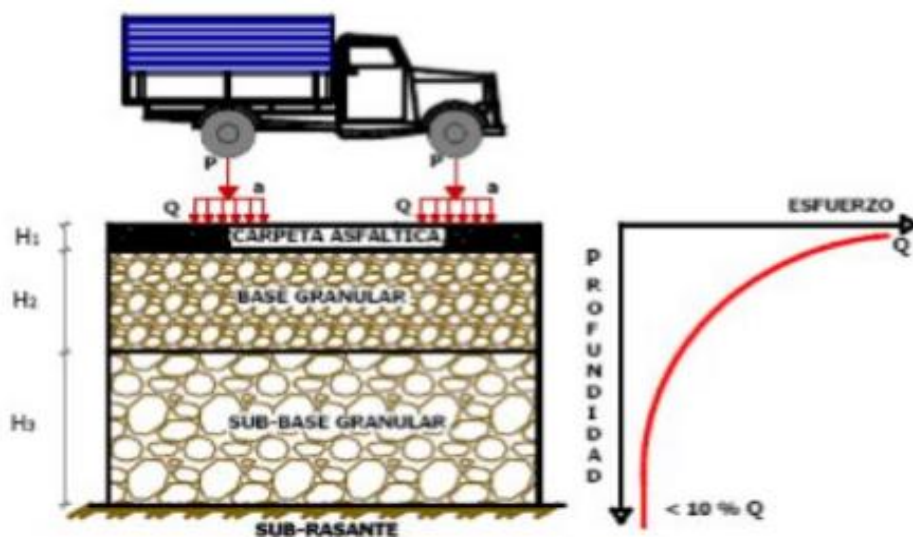
Como se muestra en la figura 2, en el de pavimento rígido, se produce una buena distribución de las cargas, produciendo como resultado tensiones muy bajas en la subrasante. Por otro lado, en el pavimento flexible, se deforma más y se producen mayores tensiones en la subrasante.

2.2.1.1.1 Pavimento flexible

Según el libro *Pavimentos: Materiales, Construcción y Diseño* (2015), se pueden definir como pavimentos flexibles:

Aquellas estructuras de viales conformadas por una capa asfáltica apoyada sobre capas de menor rigidez, compuestas por materiales granulares no tratados o ligados (base, subbase y en algunos casos subrasante mejorada o material de conformación), que a su vez se soportan sobre el terreno natural o subrasante. Los esfuerzos que generan las cargas vehiculares se disipan a través de cada una de las capas de la estructura de tal forma que, al llegar a la subrasante, la resistencia mecánica del suelo que la compone debe ser capaz de resistir dicho esfuerzo sin generar deformaciones que permitan el deterioro funcional o estructural de la vía. Adicionalmente, cada una de las capas de la estructura debe resistir la influencia del medio ambiente. La capa asfáltica en un pavimento flexible está conformada por la carpeta de rodadura, la base intermedia y la base asfáltica, sin embargo, esta capa puede estar constituida únicamente por la capa de rodadura cuando los niveles de tránsito son bajos (Rondón Quintana, 2015, pág. 14).

Figura 3. Estructura de pavimentos flexibles



Fuente: Material didáctico (curso de Diseño de Pavimento, 2019)

Para el caso del pavimento flexible, es importante primero conocer los elementos que lo integran para obtener los números estructural y luego proceder a diseñar los espesores de las distintas capas utilizando los coeficientes asociados los distintos materiales. Según el Manual Centroamericano para Diseño de Pavimento (2002, pág. 2), se dividen en:

- **Subrasante:** capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende a una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al número de repeticiones de carga generada por los ejes equivalentes proporcionado por la cantidad de vehículos que pasa por determinado sector.

Se indica que el espesor del pavimento depende en gran medida de la calidad de la subrasante, ya que con ella se inicia la elaboración del diseño del pavimento.

- **Subbase:** capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad la carga aplicada a la superficie de rueda. La subbase debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

Esta capa de material se debe colocar entre la subrasante y la capa de base, la cual sirve como material de transición.

- **Base:** ésta es la capa de pavimento que tiene como función primordial distribuir y transmitir a la subbase las cargas ocasionadas por el tránsito y a través de ésta a la subrasante que es la capa sobre la cual se coloca la de rodadura.

Generalmente, está hecha con piedra de buena calidad, triturada y mezclada con material de relleno, o bien, por una combinación de piedra o grava, con arena y suelo en su estado natural. Todos estos materiales deben ser clasificados para formar una base integrante de la estructura de pavimento.

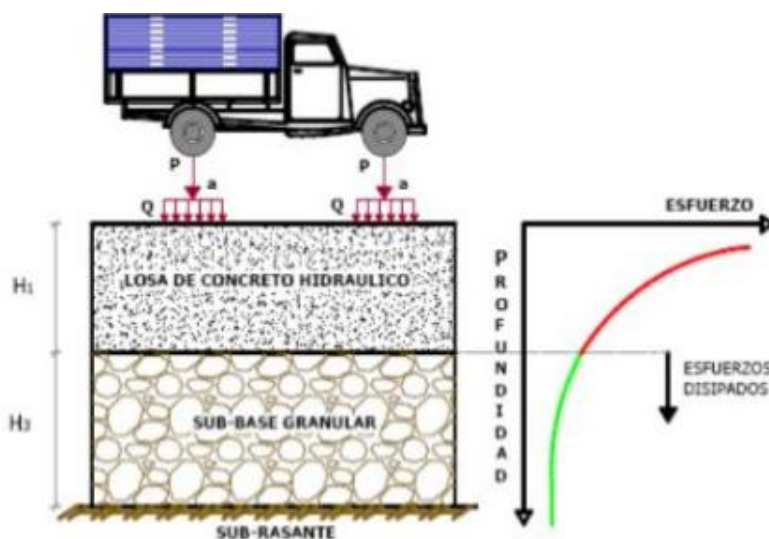
- **Superficie de rueda:** capa asfáltica que se coloca sobre la base. Su objetivo principal es proteger la estructura de pavimento, impermeabilizando la superficie para evitar filtraciones de agua de lluvia que podrían saturar las capas inferiores, así como evitar la desintegración de las subyacentes a causa del tránsito de vehículos

2.2.1.1.2 Pavimento rígido

Los pavimentos rígidos se pueden definir de la siguiente manera, tal como se presenta a continuación:

Pavimentos de concreto hidráulico (mezcla de cemento, agua, y material granular). Fundamentalmente, está constituido por una losa de concreto hidráulico, apoyado sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además, como el concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento (Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica, 2016, pág. 3).

Figura 4. Estructura de pavimento rígido



Fuente: Material didáctico (curso de Diseño de Pavimento, 2019).

2.2.2 Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico se debe incluir para el diseño de pavimentos, ya que se debe tener en cuenta el polígono del área por pavimentar y las pendientes de las calles conectadas al mismo, además de los pozos existentes, los niveles de aceras y la presencia de obstáculos existentes

en el lugar como: postes de alumbrado público, postes de teléfono y algún hidrante. Los levantamientos topográficos se pueden dividir en dos:

2.2.2.1 Levantamiento planimétrico

Los levantamientos planimétricos se hacen por el método de conservación de azimut, por deflexiones, por rumbo y distancia u otro de los usados generalmente.

El levantamiento de planimetría se realizó por el método de conservación de azimut, con vuelta de campana. Los datos del levantamiento están consignados en la libreta de campo, acompañado del croquis correspondiente (Sotz Roquel, 2003, pág. 48).

2.2.2.2 Levantamiento altimétrico

La nivelación debe ser con precisión, hecha sobre la línea de eje escogida en forma práctica, debido a que el área por pavimentar tiene la forma de un polígono cerrado. Se recomiendan distancias de 20 metros, donde se tomaron las elevaciones con un nivel de mano con ayuda del estadal, cinta métrica y la respectiva plomada. Los datos del levantamiento topográfico están consignados en la libreta de campo, acompañado del croquis correspondiente (Sotz Roquel, 2003 pág. 48).

2.2.3 Fallas en el pavimento

Cuando se inicia un diseño de pavimentos, se debe tomar en cuenta la conservación de la estructura del pavimento, llegando así a su vida útil. No obstante, se debe tener en cuenta el mantenimiento previsto, el cual es retrasar las fallas del pavimento, por lo tanto, se debe localizar, identificar y determinar qué causó la falla para hacerle las reparaciones. Según estudios realizados por el TEC:

Para poder darle a la carretera un adecuado mantenimiento, se debe identificar y clasificar las fallas. Moncayo sugiere que se pueden reconocer dos tipos de fallas: la falla funcional y la falla estructural. La falla funcional se da cuando el pavimento ha perdido su función inicial o la que fue asignada de antemano. Generalmente, se ubica en la carpeta asfáltica, cuando la carpeta está arrugada, boluda o resbaladiza y no sigue proporcionando confort al conducir. La falla estructural se puede dar en todas las capas de la estructura del pavimento. Se da cuando hay ruptura en la carpeta, lo cual imposibilita el tránsito y también se puede dar cuando el terraplén que soporta la estructura colapsa. Para poder identificar la falla, se necesita hacer estudios de campo y laboratorio por una persona de amplia experiencia, con el fin de decir dónde se originó, si es progresiva y el tipo de falla presente.

Un estudio hecho en México identificó en cuál parte del proceso fallan más los pavimentos. Se dice que el 15% de las fallas es debido a un mantenimiento inadecuado, el 25% de las fallas es por un inadecuado diseño y el 60% de las fallas es debido a una mala construcción de la carretera (Moncayo, 1987, s.p.)

2.2.3.1 Tipo de fallas en los pavimentos flexibles

Según el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de República Dominicana:

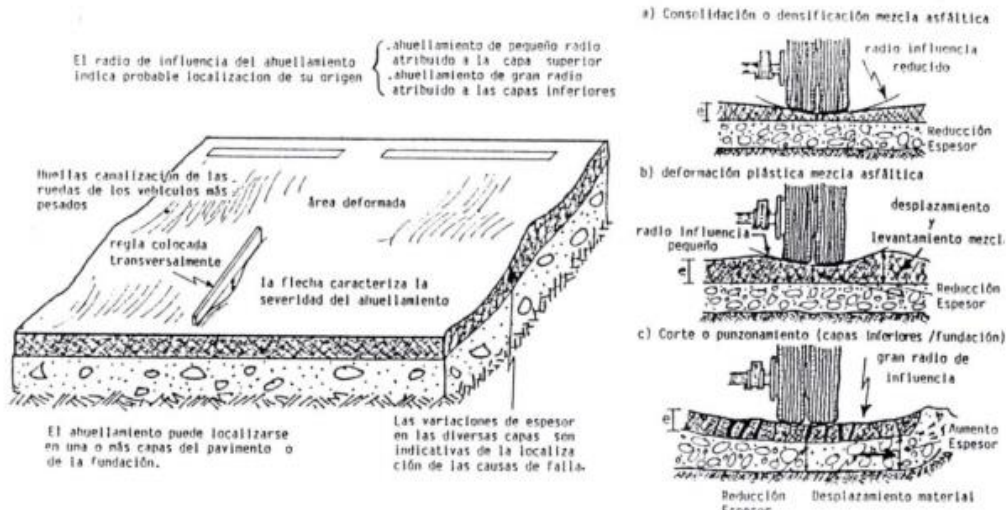
Estos daños afectan, de diferente manera, la condición y el comportamiento del pavimento. Algunos afectan las características superficiales (condiciones operativas) del pavimento, reduciendo su serviciabilidad; suele referirse a éstos como defectos de superficie o daños funcionales, por cuanto no afectan la capacidad estructural del pavimento. En contraposición, otros afectan la integridad del pavimento reduciendo su habilidad para soportar las cargas del tránsito; se denominan daños estructurales, y si bien afectan en grado diverso la serviciabilidad presente del pavimento, conducen más rápidamente a una pérdida de esta a mediano plazo.

Un mismo daño puede ser asociado a una u otra categoría, atendiendo al mecanismo específico que la origina. Por su importancia, al describir cada uno de los daños y sus posibles causas, se incluyen también los elementos de juicio necesarios para su correcta valoración (Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 17).

La falla en un pavimento es la que señala un desempeño insatisfactorio en la función principal del pavimento. A continuación, se mencionan y se describen los diferentes tipos de fallas y causas en los pavimentos (Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 18).

Ahuellamiento: se entiende por ahuellamiento cuando la longitud afectada es mayor es mayor de 6m. Las repeticiones de las cargas conducen a una acumulación de las deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento o su fundación.

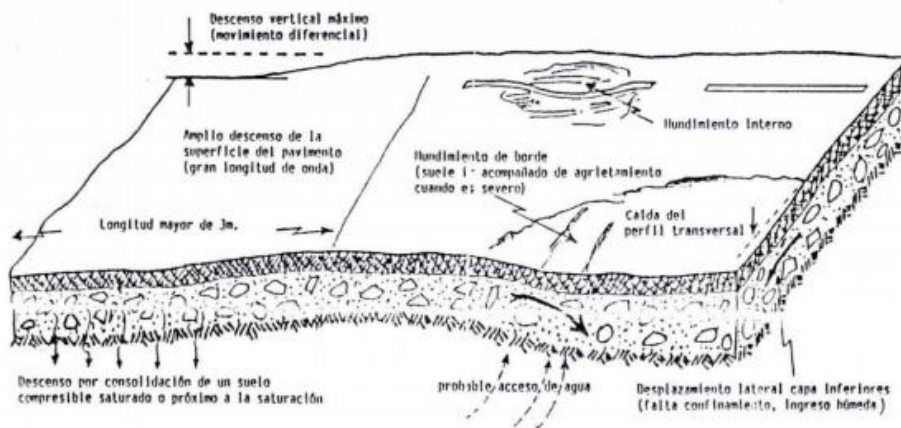
Figura 5. Deformación por ahuellamiento



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 19

Hundimiento: puede ocurrir en los bordes o internamente en la calzada. En muchos casos, las depresiones son difíciles de detectar, si no es luego de una lluvia por la acumulación de agua o vestigios de humedad. En otros, da lugar a distorsiones apreciables, de gran longitud de onda o, por el contrario, abruptas y localizadas.

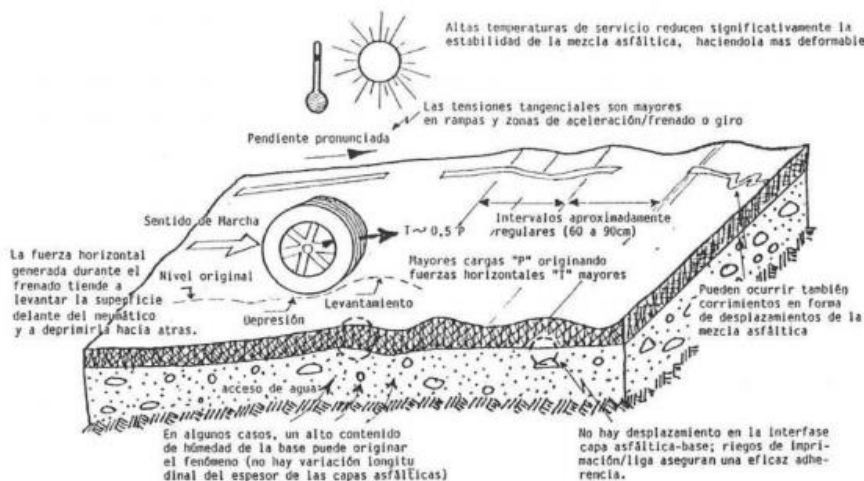
Figura 6. Deformación por hundimiento



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 23

Corrugación: es caracterizado por la ondulación de la superficie del pavimento, formando crestas y valles que se suceden próximas unas de otras perpendicularmente a la dirección del tráfico. La separación entre crestas es menor de 3m, encontrándose, por lo general, en un rango de 0.60 a 0.90 m.

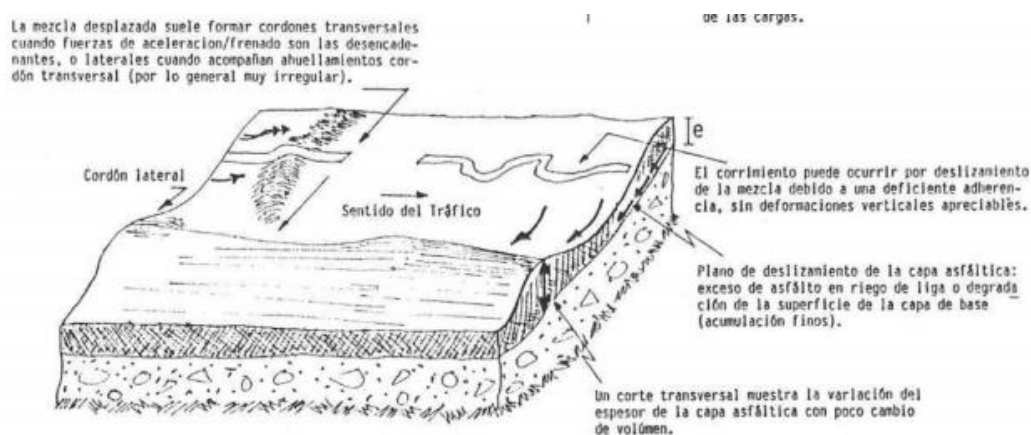
Figura 7. Deformación por corrugación



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 26

Corrimiento: movimiento plástico caracterizado por el desplazamiento o deslizamiento de la mezcla asfáltica, a veces, acompañado por el levantamiento del material, formando “cordones” principalmente laterales. En forma típica, pueden identificarse a través de la señalización horizontal observándose una serpenteante demarcación de carriles.

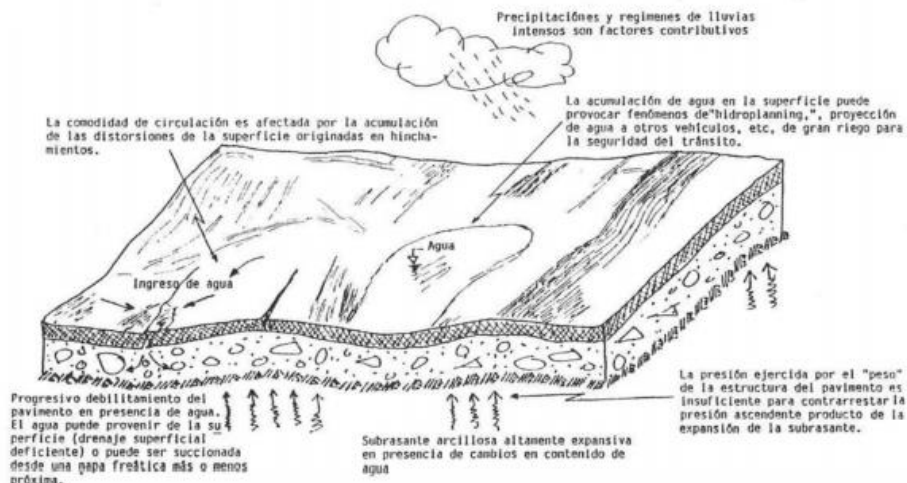
Figura 8. Deformación por corrimiento



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 29

Hinchamiento: abultamiento o ascenso vertical de la superficie del pavimento, puede ocurrir en forma de onda abrupta y pronunciada sobre una pequeña área, o por el contrario, en forma de una onda gradual de más de 3 m de longitud, que distorsiona el perfil de la vía. En ambos casos, puede ser acompañado de agrietamientos.

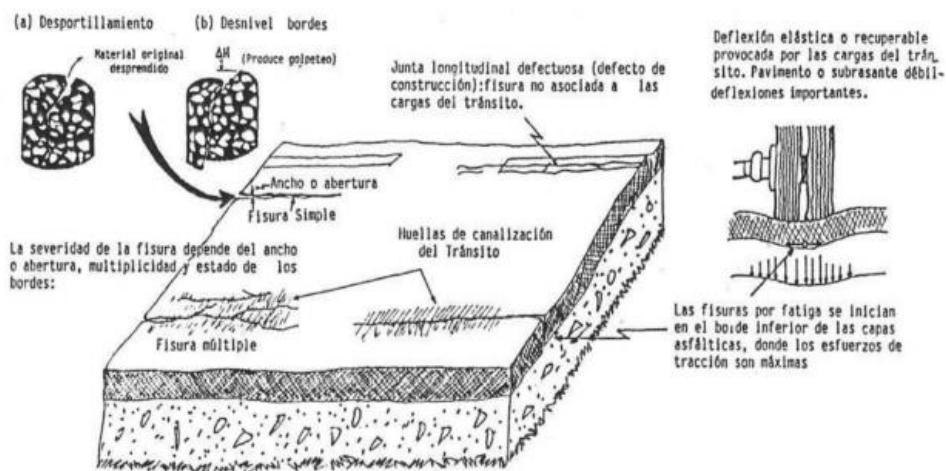
Figura 9. Deformación por hinchamiento



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 32

Fisura longitudinal: fracturación extendida a través de la superficie del pavimento paralelamente al eje de la calzada. Puede localizarse en las huellas de canalización del tránsito, próxima a los bordes en el eje o en correspondencia con los anchos de distribución de las mezclas asfálticas; con frecuencia, su ubicación es indicativa de la causa o mecanismo más probable que la original y, por ende, debe ser tenida en cuenta durante la evaluación. En sus instancias iniciales, suele presentarse como una fisura simple, pero a medida que avanza el deterioro del pavimento, desarrolla ramificaciones laterales y fisuras paralelas, el cual es un aspecto al que suele referirse como "multiplicidad".

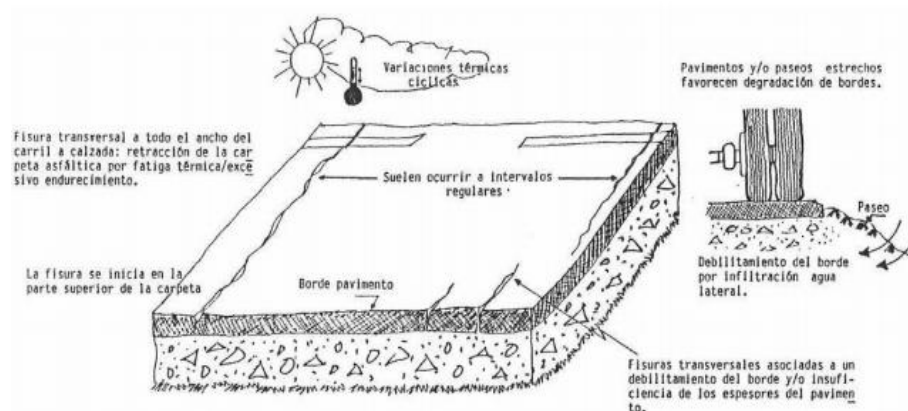
Figura 10. Fisuras o agrietamientos longitudinales



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 37

Fisuras transversales: fracturación rectilínea que se extiende a través de la superficie del pavimento perpendicularmente al eje de la calzada. Puede afectar todo el carril o ancho de calzada como limitarse a los 0.60m próximos al borde. A veces, las fisuras transversales se distribuyen a intervalos más o menos regulares, con espaciamiento variables entre 5 y 20m. Al igual que las fisuras longitudinales, puede desarrollar ramificaciones y fisuras paralelas “multiplicidad”. Se excluyen de este grupo las fisuras provenientes de la reflexión de juntas transversales, características de pavimentos mixtos en los que existe una losa de hormigón bajo la capa asfáltica.

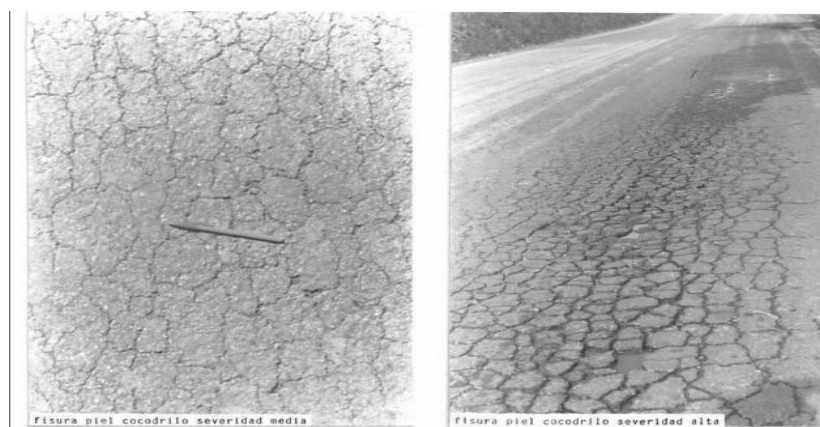
Figura 11. Deformación de fisura transversal



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 42

Fisuras tipo piel de cocodrilo: serie de fisuras interconectadas entre sí, formando en la superficie del pavimento pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos y dimensión mayor normalmente inferior de 0.30 m. Fenómeno asociado a las repeticiones de carga (fatiga), estas fisuras ocurren solo en áreas expuesta a las solicitaciones del tránsito (principalmente huellas de canalización); por tanto, raramente, cubren toda el área del pavimento. No tienen por qué ocurrir en pavimentos mixtos (refuerzo asfáltico sobre losas de hormigón); en estos casos, ciertos patrones de fisuración que pueden asemejarse a la piel de cocodrilo responden más bien a una reflexión de las grietas de la losa subyacente y pueden ser identificadas como fisuras en bloques.

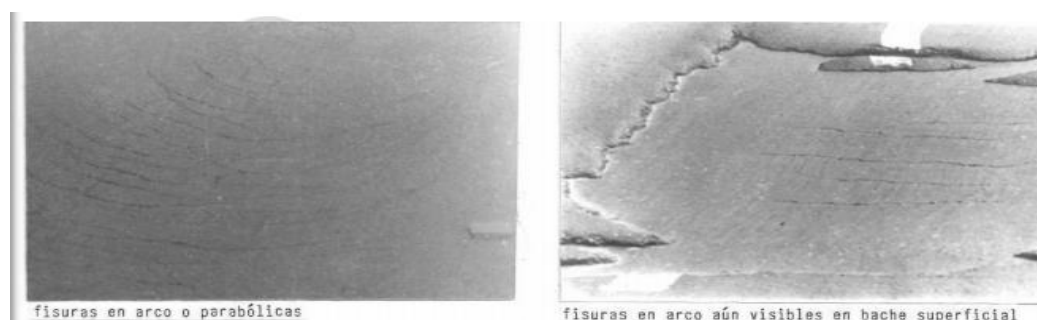
Figura 12. Fisuras de piel de cocodrilo



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 51

Fisura en arco: tienen generalmente sus dos extremos apuntando hacia fuera en la dirección del tráfico. Ocurren fundamentalmente en la huella de canalización del tránsito en correspondencia con sectores de frenado o cambio de dirección. A veces, se les denomina también “fisuras por resbalamiento”, aludiendo al mecanismo que las produce.

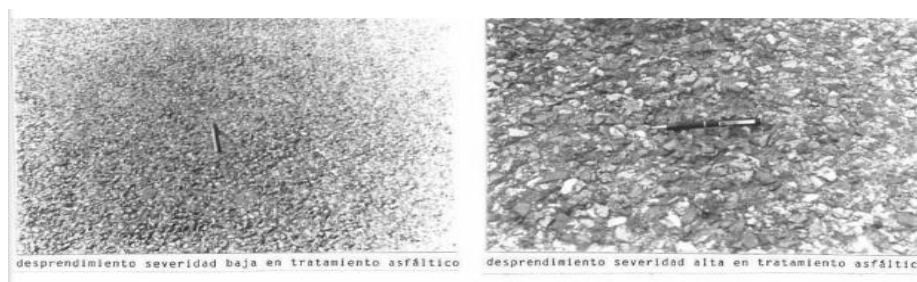
Figura 13. Fisura en arco o parabólica



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 59

Fisuras por desprendimiento o descubrimiento de agregados: desgaste gradual de la superficie de rodamiento como consecuencia de la disgregación y desprendimiento del material fino que la conforma, o de la separación y pérdida del material alrededor de la matriz de agregados, dejando a ésta cada vez más expuesta a la acción abrasiva del tránsito y del clima. La superficie parece desintegrarse en pequeños trozos dando lugar a una textura más abierta y rugosa. Ocurren con más frecuencia en tratamientos asfálticos y mezclas en frío; pueden cubrir amplios sectores de la calzada o concentrarse en las huellas de canalización del tránsito.

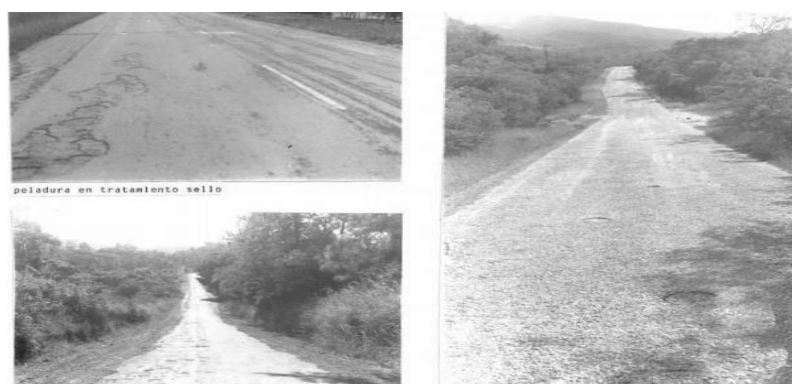
Figura 14. Desprendimiento asfáltico



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 64

Desintegración por peladuras: desprendimiento de pequeñas placas o porciones del material que conforme la superficie de rodamiento, originando pequeños hoyos o cavidades en el pavimento, no relacionados con agrietamientos ni otros efectos estructurales. Normalmente, estas cavidades no sobrepasan los 15 a 20 mm de profundidad, y su diámetro es menor de 15 cm. Cuando alcanzan mayores dimensiones (extensión y/o profundidad), se identifican como “baches”.

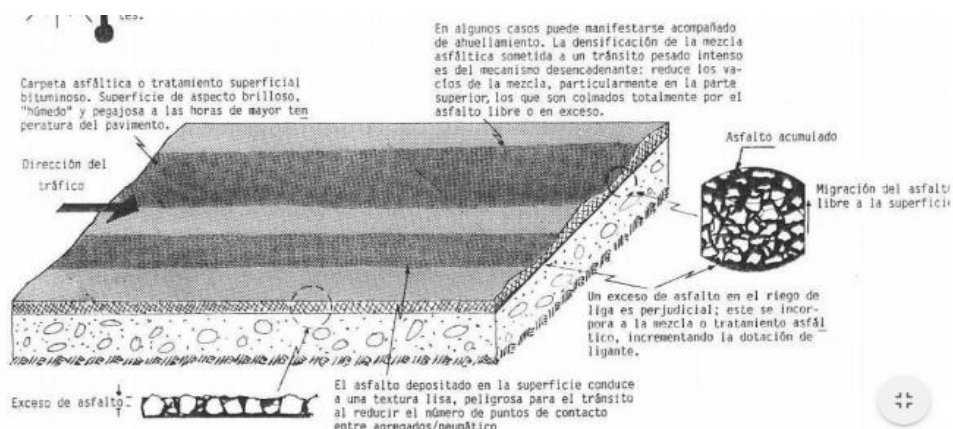
Figura 15. Desintegración por peladura



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 69

Exudación de asfalto: afloramiento de material bituminoso de la mezcla a la superficie del pavimento, formando una película o filme continuo de ligante o *mastic* (ligantes + finos). La superficie adquiere en consecuencia un aspecto brillante, tornándose reflectante, resbaladiza y pegajosa en tiempo caluroso. El proceso de exudación es irreversible: el afloramiento de asfalto en la estación cálida no se absorba durante el clima frío.

Figura 16. Falla por exudación de asfalto



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 90

Falla por exudación de agua: ascenso de agua capilar a la superficie del pavimento a través de los puntos más débiles y fisuras de la capa de rodamiento. Se presenta en forma de una mancha de agua alrededor de tales puntos. Por lo general, después de una lluvia intensa, con frecuencia, suele ir acompañada de otras manifestaciones. El agua forzada a través de grietas y poros por la presión que ejercen las cargas dinámicas del tránsito suele arrastrar material fino en suspensión que se deposita en la superficie; pueden ocurrir también leves depresiones o, por el contrario, levantamientos en áreas circulares de aproximadamente 25cm de diámetro.

Figura 17. Exudación de agua

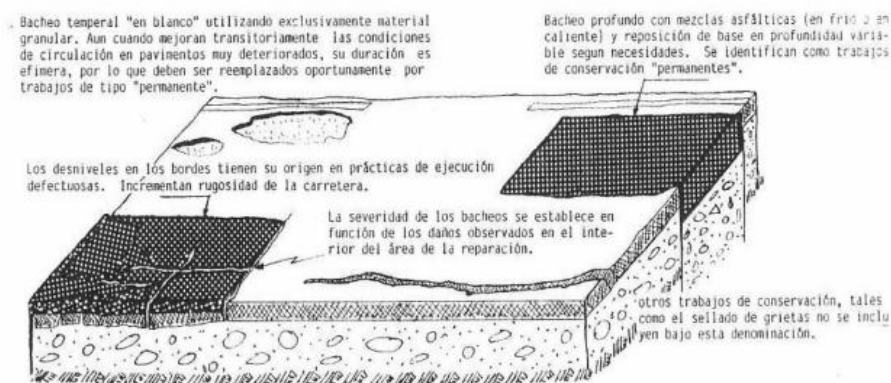


Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 93

Bacheos y reparaciones: área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado parcial o totalmente con materiales similares a los originales o eventualmente diferente, con el propósito de reparar el pavimento existente. Se trata de trabajo de

mantenimiento que implica necesariamente una alteración en la continuidad de la superficie y/o estructura del pavimento. Un caso particular relativamente frecuente en área urbana es el bacheo por reparación de servicios públicos: consiste en la apertura y reposición del pavimento para permitir la instalación o mantenimiento de algún tipo de servicio público subterráneo.

Figura 18. Bacheo y reparaciones



Fuente: Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 1990, pág. 96

2.3 Parámetros y elementos del diseño

Para los diseños de una carretera, se deben tener en cuenta varios puntos importantes que son parte del planteamiento y la justificación. Ambos conceptos se correlacionan para establecer características técnicas que debe tener la calzada como tal. También, se proyecta que los resultados sean óptimos y en beneficio a las comunidades aledañas y los usuarios que transitan en ella.

2.3.1 Análisis de tránsito

La metodología o técnica que se utiliza para realizar el análisis de demanda de tráfico siempre está relacionada con AASTHO. En este método, la información requerida en las ecuaciones de diseño incluye la capa por ejes y así como el número de aplicaciones o pasos sobre la superficie del pavimento, ya que, de paso, ayuda al diseño del pavimento como tal.

Según el "Manual de diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito" (2008):

En los estudios del tránsito, se puede tratar de dos situaciones: el caso de los estudios para carreteras existentes, y el caso para carreteras nuevas, es decir, que no existen actualmente.

En el primer caso, el tránsito existente podrá proyectarse mediante los sistemas convencionales que se indican a continuación. El segundo caso requiere de un estudio de desarrollo económico zonal o regional que lo justifique.

La carretera se diseña para un volumen de tránsito que se determina por la demanda diaria que cubrirá, calculado como el número de vehículos promedio que utilizan la vía por día actualmente y que se incrementa con una tasa de crecimiento anual, por lo normal, determinada por el MTC para las diversas zonas del país.

Las tasas pueden variar sustancialmente si existieran proyectos de desarrollo específicos por implementarse con certeza a corto plazo en la zona de la carretera.

La proyección puede también dividirse en dos partes: una proyección para vehículos de pasajeros que crecerá aproximadamente al ritmo de la tasa de crecimiento de la población y una proyección de vehículos de carga que crecerá aproximadamente con la tasa de crecimiento de la economía. Ambos datos sobre índices de crecimiento normalmente obran en poder de la región (Ministerio de Transportes y Comunicación Perú, 2008, pág. 27).

Por otro lado, el MOPT, para el análisis de tránsito, cuenta con un *Anuario de información de tránsito* (2017), donde se pretende facilitar la información de tráfico vehicular obtenida a partir de las estaciones de conteo que posee el MOPT en diferentes rutas del país. De acuerdo con este anuario, se mencionan las siguientes estaciones:

2.3.1.1 Estaciones permanentes de conteo

El MOPT tiene distribuidas, en todo el país, veinticuatro estaciones de conteo permanente, las cuales operan en rutas primarias y secundarias estratégicas (pavimentadas). De ellas, veintidós operan con tecnología de radar (no intrusivo), y dos con equipos electrónicos que detectan a través de tubo neumáticos colocados en el pavimento.

Asimismo, se cuenta con la información de doce estaciones permanentes ubicadas sobre la Ruta 27, las cuales, aunque no son propiedad del MOPT, de igual manera, complementan la información disponible. Como se puede notar, se cuenta con la información de un total de treinta y seis estaciones permanentes en todo el país, las cuales monitorean 24/7 las rutas nacionales.

En la ubicación de estas estaciones, especialmente las del MOPT, se consideraron diferentes zonas geográficas, tomando en cuenta, a la vez, las actividades socioeconómicas

características de la región, así como condiciones especiales de tránsito pesado que se presentan en sus vías. Además, es de esperar que los patrones mensuales, diarios y horarios de tránsito que se monitoreen en los sitios seleccionados sean los ideales para conseguir factores característicos que serían de utilidad para obtener tránsitos promedios diarios lo más aproximados a la realidad, y de gran importancia para su uso en los datos obtenidos por medio de las estaciones de conteos temporales (Zúñiga, 2017, pág. 1).

Según el Anuario de Información de Tránsito (2017), las estaciones se dividen en:

Estaciones permanentes de radar

A partir de mayo del año 2015, entraron a operar las estaciones permanentes de radar en todo el país, adquiridas e instaladas mediante un financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo a través del cartel de licitación denominado “Adquisición, instalación, capacitación y operación de un Sistema de Conteos Vehiculares con Tecnología de Microondas para el MOPT en las Rutas de la Red Vial Nacional de Costa Rica”.

El sistema está compuesto de veintidós estaciones localizadas tanto en la Gran Área Metropolitana, como en sectores del Pacífico Norte (Guanacaste), Limón, Pacífico Central, Zona Norte y Sur. Las mismas monitorean rutas primarias y secundarias, y generan información obtenida directamente del tránsito circulante. Esta información se transmite a un servidor por medio de señal celular, la cual es recibida en el MOPT, donde después es analizada por el personal de éste.

Cada estación es capaz de recabar como mínimo, información por cada carril de tráfico, ocupación de la vía, velocidad, volumen, velocidad, separación entre vehículos y clasificación para un mínimo de cuatro diferentes tipos de automotores.

En la figura 1 se muestra una de las estaciones, la cual está compuesta por el panel solar (ubicado en lo más alto del poste), el cual alimenta la batería dentro del gabinete de control (color verde grisáceo), y éste da energía al dispositivo de radar (cajita color blanco) (Zúñiga, 2017, pág. 2).

Figura 19. Estación permanente de radar



Fuente: Anuario de Información de Tránsito (2017)

Estaciones permanentes de manguera

Desde el año 2010 hasta el 2015, en todas las estaciones permanentes, la información de tránsito se recolectó por medio de contadores de tránsito electrónicos. Estos dispositivos utilizan una manguera de hule sintético EPDM (Etileno Propileno Dieno tipo M), tipo media luna que se coloca transversalmente encima del carril que interesa medir. Cuando los vehículos pasan encima, envían impulsos de aire a través de él y accionan un dispositivo dentro de un contador electrónico. El equipo permite medir la intensidad del tránsito, así como la clasificación vehicular por ejes y la velocidad. Los datos colectados se llevan a un programa de cómputo que los procesa y permite su lectura. El tipo de contador utilizado por el MOPT es de la marca “Diamond Traffic” (Zúñiga, 2017, pág. 6).

2.3.2 Volúmenes de tránsito

Para cualquier diseño, es importante contar con información real, incluyendo factores relativos al tránsito, además de la calidad de la cimentación, la disponibilidad de materiales, el costo de derecho de vía si es necesario y entre otros factores. Por otro lado, los volúmenes de tránsito vienen a indicar las necesidades de mejoramiento en los diseños geométricos, tales como el indicar cuántos carriles, el ancho, los alineamientos y pendientes, además de ayudar en los diseños del pavimento.

Usualmente, los datos de tránsito como se mencionó anteriormente están para una calzada o sección de camino o también se pueden obtener mediante conteos ya sea manuales o electrónicos. Los datos en el anuario de información de tránsito dado por el MOPT incluyen los volúmenes los anuales, semanales y hora día, así como la distribución de los vehículos por tipo y pesos. Los datos

también incluyen información sobre los estilos, de las cuales el proyectista puede estimar el tránsito a futuro.

Según el SIECA (2011), los volúmenes de tránsito se dividen en:

2.3.2.1 Tránsito Promedio Diario Anual

La unidad general de medida del tránsito sobre una carretera es el volumen del tránsito promedio diario anual (TPDA). El TPDA se define como el volumen total durante un período determinado de tiempo (en general días), mayor que un día y menor o igual que un año, dividido entre el número de días comprendido en ese período de tiempo.

El conocimiento del volumen TPDA es importante para muchos propósitos, por ejemplo, determinación de la utilización anual como justificación para gastos propuestos o para el diseño de los elementos estructurales de una carretera, pero su uso directo en el diseño geométrico de carreteras no es apropiado, excepto para calles y carreteras colectoras con relativamente bajos volúmenes de tránsito, porque no indica la variación en el tránsito que ocurre durante los meses del año, días de la semana y horas del día. La cantidad por la cual el volumen de un día medio es excedido en ciertos días no es precisable y variable. En algunas carreteras, el volumen de algunos días puede ser el doble que el TPDA.

De este modo, una carretera proyectada para el tránsito en un día promedio podría requerir llevar un volumen mayor que el volumen de diseño durante una considerable parte del año, y durante muchos días, el volumen transportado podría ser mayor que el volumen de diseño.

2.3.2.2 Tránsito de hora pico

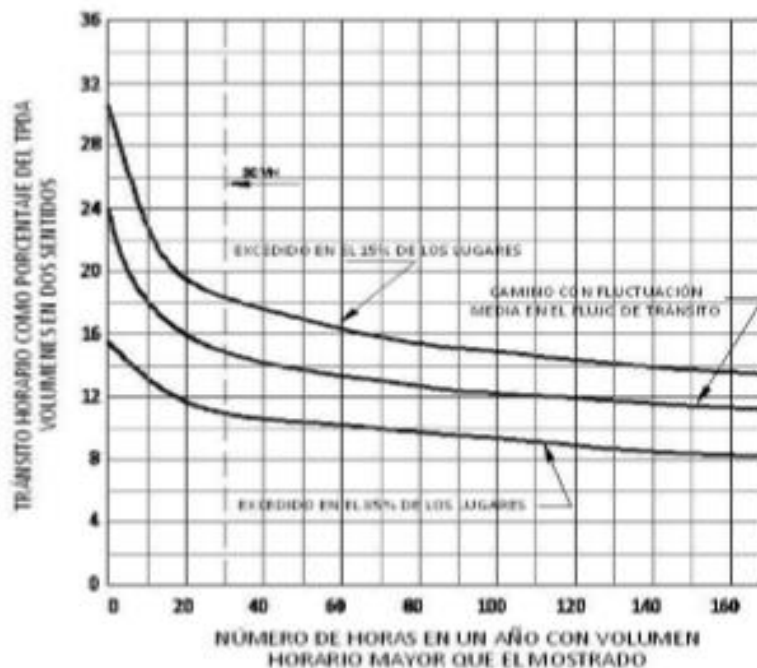
Siendo el TPDA una medida muy genérica de la intensidad del tránsito a lo largo de un día, se vuelve necesario tomar en cuenta las variaciones extremas que registra el movimiento de vehículos a lo largo de las veinticuatro horas del día para seleccionar las horas de máxima demanda como base más apropiada para el diseño geométrico de las carreteras.

El tránsito de la hora pico recoge la necesidad de referir el diseño no a la hora máxima que se registra en un año ni a la hora promedio, sino a una hora intermedia que admita cierto grado de tolerancia a la ocurrencia de demandas horarias extremas que pueden quedar con menores niveles de comodidad para la conducción.

La figura 20 muestra la relación entre los volúmenes horarios más altos y el TPDA en arterias rurales. Esta gráfica fue confeccionada a partir del análisis de datos de conteo de tránsito

que cubren un amplio rango de volúmenes y condiciones geográficas. Las curvas de la gráfica fueron preparadas disponiendo todos los volúmenes horarios de un año, expresados como porcentaje del TPDA, en orden descendiente de magnitud. La curva central es el promedio para todas las localizaciones estudiadas y representa una carretera con fluctuación promedio del flujo (SIECA, 2011, pág. 49).

Figura 20. Relación entre hora pico y volúmenes de TPD rural



Fuente: Manual Centroamericano de Norma para el Diseño Geométrico de Carreteras, 2011

2.3.3 Proyecciones futuras de la demanda del tránsito

Para una carretera nueva o para el mantenimiento de una existente, es importante que se diseñe para adaptarse al tránsito que pueda ocurrir durante un periodo de diseño, sometida a un mantenimiento sensato.

Es imposible definir un periodo de diseño de una carretera, ya que los elementos principales pueden tener diferentes periodos de vidas útil. Cada tramo está sujeto a variaciones en los estimados periodos, debido a influencias no fácilmente sujetas a los análisis, como falta de mantenimiento, cambios en el estado del suelo, cambios de volúmenes de tránsito, cambios por la transmisión de cargas y demandas.

Según las normativas se adopta un periodo de proyecciones de veinte años como base para el diseño como tal. Normalmente, las estimaciones del tránsito que se realizan más allá de este

periodo sobre una vía en específico, no se justifica debido a que no se tiene un dato preciso de los cambios en la economía poblacional. También, se adapta a proyectos de reconstrucción o de rehabilitación de las carreteras en los cuales se reduzca dicho periodo a 10 años.

Para dichas proyecciones de tránsito de una carretera, es importante usar distintos de procedimiento, que van desde los diseños más complejos a bases de modelos económicos que se caracterizan por su simplicidad en los cálculos o dependen de criterios del diseño. Estos procedimientos son aceptados universalmente, aunque es importante señalar que, a mayor incertidumbre en las estimaciones a futuro, mayor será la conveniencia de complementar los análisis de sensibilidad para proveer situaciones de extremas aspectos a largo plazo.

Lo primero es fundamentar que los análisis históricos del comportamiento del tránsito sean distinguidos, mediante varios registros de volúmenes durante un tiempo mínimo de diez años de duración. Para ello, las hipótesis del crecimiento más probable del tránsito durante los años corresponden a componentes de la corriente vehicular.

Como segundo método, es el poder conocer los pronósticos del tránsito vehicular que tiene relación con los indicadores de diferentes variables humanas, cuyo objetivo se relaciona con la movilidad. También se consideran invariables en periodos de diseño de las obras civiles. Con estos criterios, se pretende establecer relaciones razonables de tipo estadístico entre el comportamiento del tránsito (conocidos como las variables dependientes), y los socioeconómicos relacionados con el transporte automotor, con los registros de consumo de combustibles (gasolina, diésel), la tendencia de vehículos, el comportamiento de productos internos, el crecimiento de la población activa (son todas aquellas variables independientes), que permiten obtener las proyecciones aceptables de los futuros volúmenes de tránsito de las carreteras.

2.3.4 Factor de distribución por carril

Para la distribución como tal, AASTHO 1993 tiene una tabla que hace referencia a números de carriles en cada dirección para así lograr determinar el factor de distribución por carril en el cual se conoce como L.

Tabla 2. Factor de distribución carril

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

Fuente: Guía para el diseño de pavimentos AASTHO 1993

2.3.5 Velocidades

Uno de los factores más importantes en los parámetros del diseño es la velocidad, ya que es una de las opciones bajo las cuales se transita en la carretera, entre ellos, se pueden destacar condiciones que pueden afectar. Para el usuario, la velocidad es uno de los elementos por considerar en la selección de la ruta a transitar en un determinado modo de transporta, ya que, como se mencionó anteriormente, se presentan particularidades como el clima, límites en las vías, limitaciones de velocidad, costo del viaje, características físicas de la calzada, como: rugosidad presente en la estructura de rodadura, radios de giro, longitud en curva vertical.

Por otro lado, es relevante considerar las incidencias que tengan otros vehículos en las vías, las cuales pueden generar restricciones de transitabilidad, disminución de confort o molestias que va a generar una afectación en el flujo vehicular.

No se puede dejar de lado que la mayoría del tránsito registra un comportamiento de variaciones de velocidad que se ubican dentro de una distribución estadística normal, lo cual genera que las velocidades tengan un comportamiento similar, provocando que se encuentren en un rango central. El diseño propuesto siempre busca satisfacer las necesidades del usuario, con relación a la velocidad, seguridad, economía de operaciones y costos asociados al viaje, tomando en cuenta siempre no exagerar en los extremos de velocidades las cuales no son prudentes.

Las velocidades se dividen en tres tipos y, a continuación, se explicará cada una:

2.3.5.1 Velocidad de operación

Se puede definir o entender que velocidad de operación es la máxima velocidad que se puede tener para circular por una vía, bajo ciertos parámetros que no restrinjan las condiciones de tránsito. Sin embargo, estas velocidades de operación no deben acceder en ningún momento los límites de velocidad estipulados en la normativa de diseño, de forma tal que prevalezcan la seguridad en el sistema vial en todas las secciones del régimen de la carretera.

2.3.5.2 Velocidades de diseño

Según el Ministerio de Transportes de Comunicación, en relación con la velocidad de diseño, se:

Indica que es la velocidad escogida para el diseño, entendiéndose que será la máxima que se podrá mantener con seguridad y comodidad, sobre una sección determinada de la carretera, cuando las circunstancias sean favorables para que prevalezcan las condiciones de diseño.

En el proceso de asignación de la velocidad de diseño, se debe otorgar la máxima prioridad a la seguridad vial de los usuarios. Por ello, la velocidad de diseño a lo largo del trazo debe ser tal, que los conductores no sean sorprendidos por cambios bruscos y/o muy frecuentes en la velocidad a la que pueden realizar con seguridad el recorrido.

Para identificar los tramos homogéneos y establecer su velocidad de diseño, se debe atender a los siguientes criterios:

Velocidad de diseño del tramo homogéneo: donde se manifiesta que las velocidades de diseño están definidas en función de la clasificación por demanda u orografía de la carretera a diseñarse. A cada tramo homogéneo, se le puede asignar la velocidad de diseño en el rango que se indica en la tabla inferior.

Tabla 3. Velocidades de diseño de tramos homogéneos

CATEGORÍA DE LA CARRETERA	TIPO DE TERRENO	VELOCIDAD DE DISEÑO DE UN TRAMO HOMOGÉNEO V_{TR} (Km/h)									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Primaria de dos calzadas	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Primaria de una calzada	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Secundaria	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Terciaria	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										

Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2008)

Velocidad específica de trazo en planta y perfil: indica que es necesario dimensionar los elementos geométricos de la carretera, en planta, perfil y sección

transversal, de forma tal que pueda ser recorrida con seguridad, a la velocidad máxima asignada a cada uno de dichos elementos geométricos.

La velocidad máxima con que sería abordado cada elemento geométrico es la velocidad específica con la que se debe diseñar. El valor de la velocidad específica de un elemento geométrico depende esencialmente de los siguientes parámetros:

- Del valor de la velocidad de diseño del tramo homogéneo en que se encuentra incluido el elemento. La condición deseable es que, a la mayoría de los elementos geométricos que integran el tramo homogéneo, se les pueda asignar como velocidad específica, el valor de la velocidad de diseño del tramo
- De la geometría del trazo inmediatamente antes del elemento considerado, teniendo en cuenta el sentido en que el vehículo realiza el recorrido.

Velocidad de marcha: denominada también velocidad de cruce es el resultado de dividir la distancia recorrida entre el tiempo durante el cual el vehículo estuvo en movimiento, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito, la vía y los dispositivos de control. Es una medida de la calidad del servicio que una vía proporciona a los conductores y varía durante el día, principalmente, por la modificación de los volúmenes de tránsito (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018, pág. 96).

2.3.5.3 Velocidades de ruedo

La velocidad en la que el vehículo se traslada de un tramo a otro es conocida como velocidad de ruedo. Asimismo, se puede relacionar con la distancia recorrida por el vehículo en un tiempo determinado, el cual es el flujo se mantiene constante y sin obstáculos a lo largo de la trayectoria.

Estas velocidades se calculan mediante métodos conocidos como procedimientos de la ingeniería de tránsito, que se hacen para el cálculo de velocidades instantáneas y se obtienen promedios en puntos específicos de un tramo de la calzada. En relación con los tramos cortos, las velocidades no varían tanto, por lo cual pueden considerarse como una aproximación de las velocidades de ruedo promedio.

Según el Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras: Dependiendo del volumen de tráfico, la velocidad de ruedo promedio en una carretera varía. Por lo tanto, cuando se hace referencia a la velocidad de ruedo, debe indicarse claramente cuando represente las horas pico, horas que estén fuera de las horas pico, o si

es un promedio durante el día. Las velocidades de ruedo, durante horas pico o fuera de ellas, son utilizadas en el diseño y en la operación; el promedio de las velocidades de ruedo para un día completo se utiliza en análisis económicos (SIECA, 2011, pág. 54).

Teniendo en claro estos conceptos y la normativa, se puede comparar y ver que valores están cercanos a la velocidad de diseño, viendo si las velocidades son muy bajas y, por consiguiente, se logran velocidades de ruedo muy estables.

El Manual HCM indica que:

Para autopistas y carreteras de carriles múltiples, existe un amplio margen de volúmenes en los cuales la velocidad no es sensible a éstos; este margen se extiende hasta tasas bastante altas. Entonces, como la tasa de volumen por carril indica la capacidad, la velocidad se reduce sustancialmente con el incremento de la tasa de volumen. Para carreteras de dos carriles, la velocidad se reduce linealmente con el incremento de la tasa de volumen sobre el rango completo de tasas entre cero y la capacidad (SIECA. 2011, pág. 55).

2.4 Diseño geométrico

Para realizar un diseño geométrico de una carretera, es importante tener en cuenta una serie de criterios y consideraciones, esto con el fin de realizar un adecuado diseño el cual tiene como prioridad proveer y dar seguridad y movilización al conductor que transite en una terminada vía.

Según las investigaciones realizadas por el estudiante en los diferentes manuales de diseño, se logra encontrar una serie de propuestas que son necesarias y que son de gran utilidad para lograr efectuar un diseño eficaz y preciso según el tipo de carretera en la que se esté desarrollando el proyecto. De las consideraciones, propuestas y elementos importantes que deben ser tomados en cuenta esta: velocidades de diseño, distancia de visibilidad entre el vehículo, tipos de vehículos que transitan sobre la carretera y entre otros. Estos elementos tienen un único objetivo y es el asegurar y promover el desarrollo funcional, seguridad y comodidad para los usuarios que transitan.

2.4.1 Distancia de visibilidad

Se puede definir como aquella visibilidad longitudinal continua hacia delante en una carretera, es decir, es visible para el conductor del vehículo para poder realizar con seguridad diversas maniobras que se vea obligado a efectuar. Según el Manual para el Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito (2008), cada una de las visibilidades existentes:

2.4.1.1 Visibilidad de parada

Distancia de visibilidad de parada es la longitud mínima requerida para que se detenga un vehículo que viaja a la velocidad directriz, antes de que alcance un objeto que se encuentra en su trayectoria.

Para efectos de la determinación de la visibilidad de parada, se considera que el objetivo inmóvil tenga una altura de 0.60 m y que los ojos del conductor se ubiquen a 1.10 m por encima de la rasante de la carretera.

Tabla 4. Distancia de visibilidad de parada (metros)

Velocidad directriz (Km./h)	Pendiente nula o en bajada				Pendiente en subida		
	0%	3%	6%	9%	3%	6%	9%
20	20	20	20	20	19	18	18
30	35	35	35	35	31	30	29
40	50	50	50	53	45	44	43
50	65	66	70	74	61	59	58
60	85	87	92	97	80	77	75
70	105	110	116	124	100	97	93
80	130	136	144	154	123	118	114
90	160	164	174	187	148	141	136

Fuente: Manual para el Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito

La pendiente ejerce influencia sobre la distancia de parada. Esta influencia tiene importancia práctica para valores de la pendiente de subida o bajada iguales o mayores a 6% y para velocidades directrices mayores de 70 km /hora.

En todos los puntos de una carretera, la distancia de visibilidad será igual o superior a la distancia de visibilidad de parada. En la tabla 2, se muestran las distancias de visibilidad de parada en función de la velocidad directriz y de la pendiente. Para el caso de la distancia de visibilidad de cruce, se aplicarán los mismos criterios que los de visibilidad de parada (MTC, 2008, pág. 19).

2.4.1.2 Visibilidad de adelantamiento

Distancia de visibilidad de adelantamiento (paso) es la mínima distancia que debe ser visible con el fin de facultar al conductor del vehículo a sobrepasar a otro vehículo que viaja a velocidad 15 km./h menor, con comodidad y seguridad, sin causar alteración en la velocidad de un tercer vehículo que viaja en sentido contrario a la velocidad directriz, y que se hace visible cuando se ha iniciado la maniobra de sobrepaso.

Para efectos de la determinación de la distancia de visibilidad de adelantamiento, se considera que la altura del vehículo que viaja en sentido contrario es de 1.10 m y que la del ojo del conductor del vehículo que realiza la maniobra de adelantamiento es 1.10 m.

La visibilidad de adelantamiento debe asegurarse para la mayor longitud posible de la carretera cuando no existen impedimentos impuestos por el terreno y que se reflejan, por lo tanto, en el costo de construcción (MTC, 2008, pág. 20).

La distancia de visibilidad de adelantamiento debe adaptarse a varias velocidades, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 5. Distancia de visibilidad de adelantamiento.

Velocidad directriz Km./h	Distancia de visibilidad de adelantamiento (m)
30	200
40	270
50	345
60	410
70	485
80	540
90	615

Fuente: Manual para el Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito

2.4.2 Alineamiento horizontal

Según el Manual para el Diseño de Carreteras de Pavimento de Bajo Volumen de Tránsito (2008):

El alineamiento horizontal deberá permitir la circulación ininterrumpida de los vehículos, tratando de conservar la misma velocidad directriz en la mayor longitud de carretera que sea posible. El alineamiento carretero se hará tan directo como sea conveniente adecuándose a las condiciones del relieve y minimizando dentro de lo razonable el número de cambios de dirección. El trazado en planta de un tramo carretero está compuesto de la adecuada sucesión de rectas (tangentes), curvas circulares y curvas de transición.

En general, el relieve del terreno es el elemento de control del radio de las curvas horizontales y el de la velocidad directriz. La velocidad directriz, a su vez, controla la distancia de visibilidad. Los radios mínimos, calculados bajo el criterio de seguridad ante el deslizamiento transversal del vehículo están, dados en función a la velocidad directriz, a la fricción transversal, al peralte máximo aceptable y al vehículo de diseño.

En el alineamiento horizontal desarrollado para una velocidad directriz determinada, debe evitarse el empleo de curvas con radio mínimo. En general, se deberá tratar de usar curvas de radio amplio, reservándose el empleo de radios mínimos para las condiciones más críticas. Deberá buscarse un alineamiento horizontal homogéneo, en el cual tangentes y curvas se suceden armónicamente. Se restringirá en lo posible el empleo de tangentes excesivamente larga con el fin de evitar el encandilamiento nocturno prolongado y la fatiga de los conductores durante el día. Al término de tangentes largas donde es muy probable que las velocidades de aproximación de los vehículos sean mayores que la velocidad directriz, las curvas horizontales tendrán radios de curvatura razonablemente amplios. Deberá evitarse pasar bruscamente de una zona de curvas de grandes radios a otra de radios marcadamente menores.

Los cambios repentinos en la velocidad de diseño a lo largo de una carretera deberán ser evitados. En lo posible, estos cambios se efectuarán en decrementos o incrementos de 15 km. /h (MTC, 2008, pág. 21)

El alineamiento horizontal se caracteriza por el trazado de un eje donde se puede definir el punto en cada sección transversal de la carretera, sin embargo, está constituido por tramos rectos los cuales son llamados tangentes y son enlazados entre sí por curvas circulares simples, de las cuales se explican a continuación.

2.4.2.1 Curvas circulares simples

Las curvas simples, según el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2013) “son arcos de circunferencia de un solo radio que unen dos tangentes consecutivas, conformando la proyección horizontal de las curvas reales o espaciales” (Cárdenas, 2013, pág. 74).

A continuación, se describen los elementos geométricos que determinan y forman parte de la curva circular simple:

PI = punto de intersección de las tangentes o vértice de la curva.

PC = principio de curva: punto donde termina la tangente de entrada y empieza la curva.

PT = principio de tangente: punto donde termina la curva y empieza la tangente de salida.

O = centro de la curva circular.

Δ = ángulo de deflexión de las tangentes: ángulo de deflexión principal. Es igual al ángulo central subtendido por el arco PC·PT.

R = radio de la curva circular simple.

T = tangente o subtangente: distancia desde el PI al PC o desde el PI al PT.

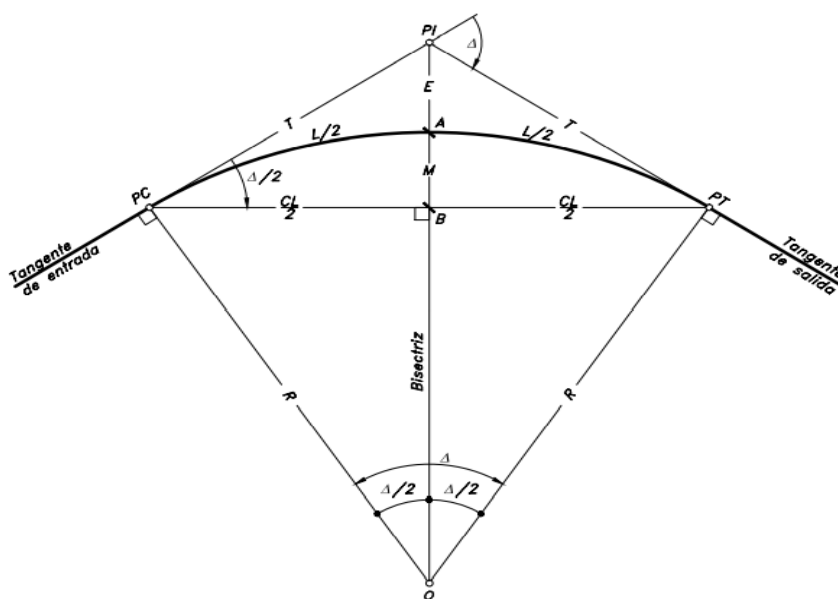
L = longitud de curva circular: distancia desde el PC al PT a lo largo del arco circular, o de un polígono de cuerdas.

CL = cuerda larga: distancia en línea recta desde el PC al PT.

E = externa: distancia desde el PI al punto medio de la curva A.

M = ordenada media: distancia desde el punto medio de la curva A al punto medio de la cuerda larga B.

Figura 21. Elementos geométricos de una curva circular simple



Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2013)

2.4.2.2 Curvas circulares compuestas

Las curvas compuestas, según el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2013), “son aquellas que están formadas por dos o más curvas circulares simples. A pesar de que no son muy comunes, se pueden emplear en terrenos montañosos, cuando se quiere que la carretera quede lo más ajustada posible a la forma del terreno o topografía natural, lo cual reduce el movimiento de tierras. También, se pueden utilizar cuando existen limitaciones de libertad en el diseño, como, por ejemplo, en los accesos a puentes, en los pasos a desnivel y en las intersecciones” (Cárdenas, 2013, pág.181).

A continuación, se describen los elementos geométricos que determinan y forman parte de la curva circular compuesta de dos radios:

PI = punto de intersección de las tangentes.

PC = principio de la curva compuesta.

PT = fin de la curva compuesta o principio de tangente.

PCC = punto común de curvas o punto de curvatura compuesta. Punto donde termina la primera curva circular simple y empieza la segunda.

R1 = radio de la curva de menor curvatura o mayor radio.

R2 = radio de la curva de mayor curvatura o menor radio.

O1 = centro de la curva de mayor radio.

O2 = centro de la curva de menor radio.

Δ = ángulo de deflexión principal.

Δ_1 = ángulo de deflexión principal de la curva de mayor radio.

Δ_2 = ángulo de deflexión principal de la curva de menor radio.

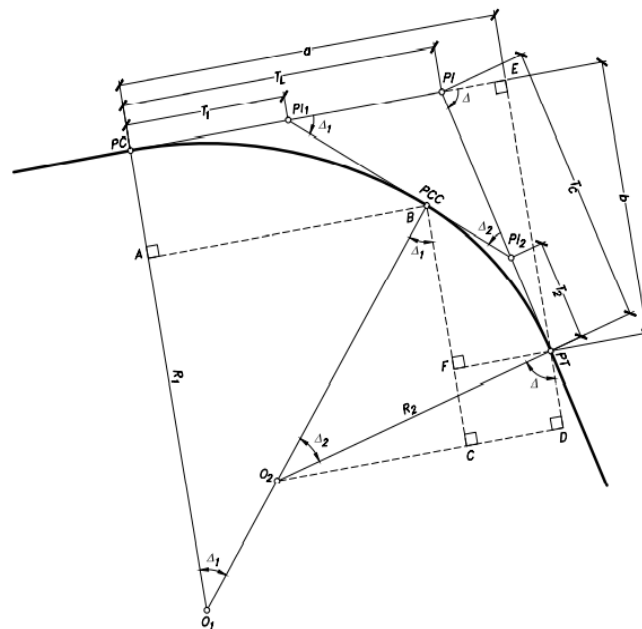
T1 = tangente de la curva de mayor radio.

T2 = tangente de la curva de menor radio.

TL = tangente larga de la curva circular compuesta.

TC = tangente corta de la curva circular compuesta.

Figura 22. Curva circular compuesta por dos radios



Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2013)

2.4.2.3 Radio mínimo

Es definido como el valor que limita el diseño de una curva horizontal, en el cual se establece las distintas velocidades.

Los radios mínimos, según el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico (2018), “son los menores radios que pueden recorrerse con la velocidad de diseño y la tasa máxima de peralte, en condiciones aceptables de seguridad y comodidad” (MTC, 2018, pág. 129).

$$R_{min} = \frac{V^2}{127 (P_{max} + f_{max})} \quad (1)$$

Donde:

Rmín: radio mínimo

V: velocidad de diseño

Pmax: peralte máximo asociado a V (en tanto por uno).

fmax: coeficiente de fricción transversal máximo asociado a V.

Dependiendo del peralte, se calcula el radio mínimo en función a la velocidad de diseño, como lo muestran las tablas a continuación:

Tabla 6. Radios mínimos de curvas horizontales para distintas velocidades de diseño

VELOCIDAD DE DISEÑO (KPH)	FACTOR DE FRICCIÓN MÁXIMA	Peralte Máximo = 4%		GRADO DE CURVATURA (Degree)	Peralte Máximo = 6%		GRADO DE CURVATURA (Degree)
		RADIO (m)			RADIO (m)		
		CALCULADO	RECOMENDADO		CALCULADO	RECOMENDADO	
20	0.35	8.1	8	143°14'	7.7	8	143°14'
30	0.28	22.1	22	52°05'	20.8	21	54°34'
40	0.23	46.7	47	24°23'	43.4	43	26°39'
50	0.19	85.6	86	13°19'	78.7	79	14°30'
60	0.17	135.0	135	08°29'	123.2	123	09°19'
70	0.15	203.1	203	05°39'	183.7	184	06°14'
80	0.14	280.0	280	04°06'	252.0	252	04°33'
90	0.13	375.2	375	03°03'	335.7	336	03°25'
100	0.12	492.1	492	02°20'	437.4	437	02°37'
110	0.11				560.4	560	02°03'
120	0.09				755.9	756	01°31'
VELOCIDAD DE DISEÑO (KPH)	FACTOR DE FRICCIÓN MÁXIMA	Peralte Máximo = 8%		GRADO DE CURVATURA (Degree)	Peralte Máximo = 10%		GRADO DE CURVATURA (Degree)
		RADIO (m)			RADIO (m)		
		CALCULADO	RECOMENDADO		CALCULADO	RECOMENDADO	
20	0.35	7.3	7	163°42'	7.0	7	163°42'
30	0.28	19.7	20	57°18'	18.6	19	60°19'
40	0.23	40.6	41	27°57'	38.2	38	30°09'
50	0.19	72.9	73	15°42'	67.9	68	16°51'
60	0.17	113.4	113	10°08'	105.0	105	10°55'
70	0.15	167.8	168	06°49'	154.3	154	07°26'
80	0.14	229.1	229	05°00'	210.0	210	05°27'
90	0.13	303.7	304	03°46'	277.3	277	04°08'
100	0.12	393.7	394	02°55'	357.9	358	03°12'
110	0.11	501.5	501	02°17'	453.7	454	02°31'
120	0.09	667.0	667	01°43'	596.8	597	01°55'

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (2011)

2.4.3 Alineamiento vertical

En el diseño vertical, el perfil longitudinal conforma la rasante que está constituida por una serie de rectas enlazadas por arcos verticales parabólicos a los cuales dichas rectas son tangentes. Para fines de proyecto, el sentido de las pendientes se define según el avance del kilometraje, siendo positivas aquellas que implican un aumento de cota y negativas las que producen una pérdida de cota. Las curvas verticales entre dos pendientes sucesivas permiten conformar una transición entre pendientes de distinta magnitud, eliminando el quiebre brusco de la rasante.

El diseño de estas curvas asegurará distancias de visibilidad adecuadas. El sistema de cotas del proyecto se referirá en lo posible al nivel medio del mar, para lo cual se enlazarán los puntos de referencia del estudio con los B.M. de nivelación del Instituto

Geográfico Nacional. A efectos de definir el perfil longitudinal, se considerarán como muy importantes las características funcionales de seguridad y comodidad que se deriven de la visibilidad disponible, de la deseable ausencia de pérdidas de trazado y de una transición gradual continua entre tramos con pendientes diferentes.

Para la definición del perfil longitudinal, se adoptarán, salvo casos suficientemente justificados, los siguientes criterios:

- El eje que define el perfil coincidirá con el eje central de la calzada.
- Salvo casos especiales en terreno llano, la rasante estará por encima del terreno a fin de favorecer el drenaje.
- En terrenos ondulados, por razones de economía, la rasante se acomodará a las inflexiones del terreno, de acuerdo con los criterios de seguridad, visibilidad y estética.
- En terrenos montañosos y en terreno escarpados, también se acomodará la rasante al relieve del terreno, evitando los tramos en contra pendiente, cuando debe vencerse un desnivel considerable, ya que ello conduciría a un alargamiento innecesario del recorrido de la carretera.
- Es deseable lograr una rasante compuesta por pendientes moderadas que presente variaciones graduales entre los alineamientos, de modo compatible con la categoría de la carretera y la topografía del terreno.
- Los valores especificados para pendiente máxima y longitud crítica, podrán emplearse en el trazado cuando resulte indispensable. El modo y oportunidad de la aplicación de las pendientes determinarán la calidad y apariencia de la carretera.
- Rasantes de lomo quebrado (dos curvas verticales de mismo sentido, unidas por una alineación corta), deberán ser evitados siempre que sea posible. En casos de curvas convexas, se generan largos sectores con visibilidad restringida y cuando son cóncavas, la visibilidad del conjunto resulta antiestética y se generan confusiones en la apreciación de las distancias y curvaturas (MTC, 2008, pág. 36).

La clasificación del terreno en las distintas zonas se caracteriza por su pendiente, la cual define en que posición se encuentra la carretera. A continuación, se muestra una tabla con la clasificación de los terrenos en función de las pendientes naturales.

Tabla 7. Clasificación de los terrenos en función a la pendiente

Tipo de Terreno	Rango de Pendientes P(%)
Llano o Plano	$P \leq 5$
Ondulado	$5 > P \leq 15$
Montañoso	$15 > P \geq 30$

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (2011)

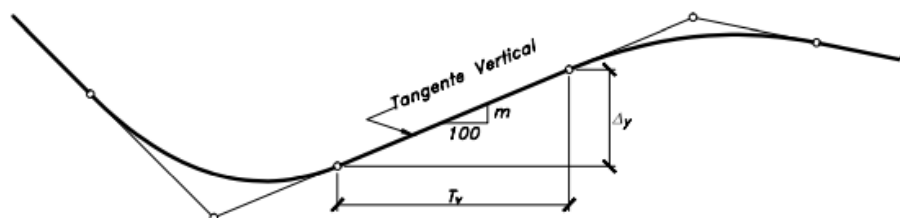
Para la realización de los diseños verticales, se deben tener presentes las pendientes, tal como se mencionó anteriormente, y las distintas curvas, las cuales se explican a continuación:

2.4.3.1 Tangentes verticales

El Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2013) caracteriza que las tangentes verticales:

Se determinan por su longitud y su pendiente, y están limitadas por dos curvas sucesivas. De acuerdo con la figura, la longitud T_v de una tangente vertical es la distancia medida horizontalmente entre el fin de la curva anterior y el principio de la siguiente (Cárdenas, 2013, pág. 346).

Figura 23. La tangente vertical



Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2013)

2.4.3.2 Curvas verticales

En opinión de Cárdenas Grisales (2013), en su manual, define que:

Una curva vertical es aquel elemento del diseño en perfil que permite el enlace de dos tangentes verticales consecutivas, tal que a lo largo de su longitud se efectúa el cambio gradual de la pendiente de la tangente de entrada a la pendiente de la tangente de salida, de tal forma que facilite una operación vehicular segura y confortable, que sea de apariencia agradable y que permita un drenaje adecuado. Se ha comprobado que la curva que mejor se ajusta a estas condiciones es la parábola de eje vertical (Cárdenas, 2013, pág. 351).

A continuación, se describen los elementos geométricos que determinan y forman parte de las curvas verticales simétricas:

$A = PIV =$ Punto de intersección vertical. Es el punto donde se interceptan las dos tangentes verticales.

$B = PCV =$ principio de curva vertical. Donde empieza la curva.

$C = PTV =$ principio de tangente vertical. Donde termina la curva.

$BC = L_v =$ longitud de la curva vertical, medida en proyección horizontal.

$VA = E_v =$ externa vertical. Es la distancia vertical del PIV a la curva.

$VD = f =$ flecha vertical.

$P(x_1, y_1) =$ punto sobre la curva de coordenadas (x_1, y_1) .

$Q(x_1, y_2) =$ punto sobre la tangente de coordenadas (x_1, y_2) , situado sobre el mismo vertical de P.

$QP = y =$ corrección de pendiente. Desviación vertical respecto a la tangente de un punto de la curva P. Valor a calcular.

$BE = x =$ distancia horizontal entre el PCV y el punto P de la curva.

$\alpha =$ ángulo de pendiente de la tangente de entrada.

$\beta =$ ángulo de pendiente de la tangente de salida.

$\gamma =$ ángulo entre las dos tangentes. Ángulo de deflexión vertical.

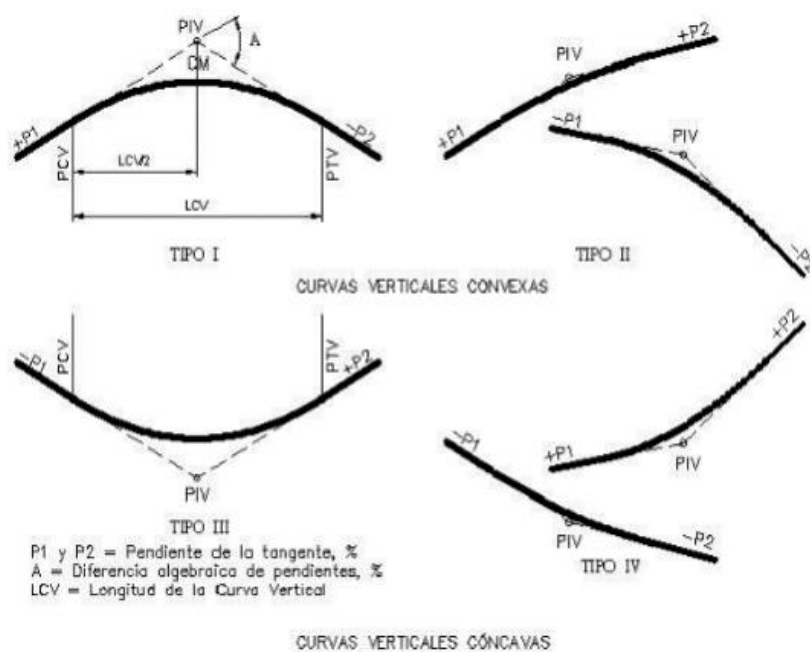
$m = \tan \alpha =$ pendiente de la tangente de entrada.

$n = \tan \beta =$ pendiente de la tangente de salida.

$i = \tan \gamma =$ diferencia algebraica entre las pendientes de la tangente de entrada y de salida.

visibilidad para la velocidad y las otras conforme a la distancia que ilumina los faros de los vehículos. En la siguiente figura, se muestran los diferentes tipos de curvas utilizados en el diseño del alineamiento vertical.

Figura 26. Curvas verticales convexas y curvas cóncavas



Fuente: SIECA, (2011).

En las siguientes tablas, se observa el control de diseño para las curvas verticales y la obtención de la tasa de curvatura vertical K.

Tabla 8. Control de diseño para curvas vertical en cresta

Velocidad de Diseño KPH	Distancia de Visibilidad de Parada (m)	Tasa de Curvatura Vertical K	
		Calculada	Para Diseño
20	20	0.6	1
30	35	1.9	2
40	50	3.8	4
50	65	6.4	7
60	85	11.0	11
70	105	16.8	17
80	130	25.7	26
90	160	38.9	39
100	185	52.0	52
110	220	73.6	74
120	250	95.0	95

K = Longitud (m) por porcentaje de A

Fuente: SIECA (2011)

Tabla 9. Control de diseño para curvas verticales cóncavas

Velocidad de Diseño KPH	Distancia de Visibilidad de Parada (m)	Tasa de Curvatura Vertical K	
		Calculada	Para Diseño
20	20	2.1	3
30	35	5.1	6
40	50	8.5	9
50	65	12.2	13
60	85	17.3	18
70	105	22.6	23
80	130	29.4	30
90	160	37.6	38
100	185	44.6	45
110	220	54.4	55
120	250	62.8	63

K = Longitud (m) por porcentaje de A

Fuente: SIECA (2011)

2.4.4 Diseño geométrico transversal

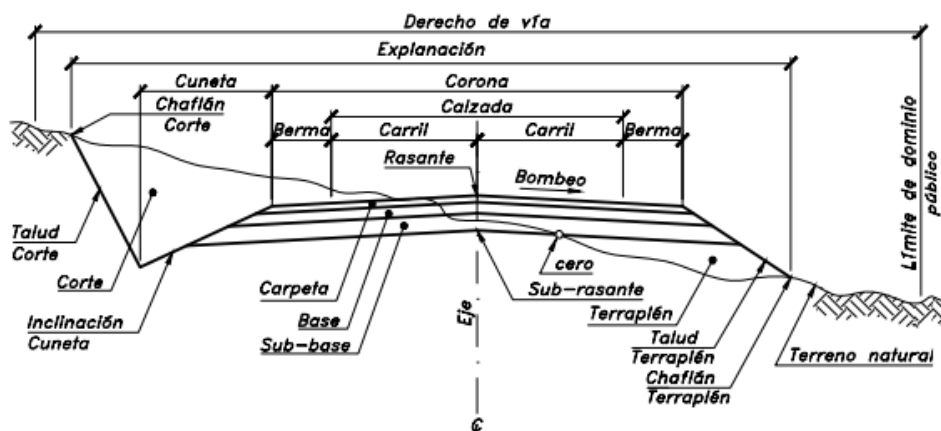
Según el Manual Diseño Geométrico de Carreteras (2013):

El diseño geométrico transversal de una carretera consiste en la definición de la ubicación y dimensiones de los elementos que forman la carretera, y su relación con el terreno natural, en cada punto de ella sobre una sección normal al alineamiento horizontal. De esta manera, se podrá fijar la rasante y el ancho de la faja que ocupará la futura carretera, y así estimar las áreas y volúmenes de tierra a mover.

La sección transversal de una carretera está compuesta por el ancho de zona o derecho de vía, el ancho de explanación, el ancho de banca o plataforma, la corona, la calzada, los carriles, las bermas, las cunetas, los taludes laterales y otros elementos complementarios. (Cárdenas, 2013, pág. 446).

En la figura, se detallan estos elementos para el caso de una vía pavimentada de sección.

Figura 27. Sección típica pavimentada en recta



Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2013).

2.4.4.1 Calzada

Se define como calzada a la superficie de la vía sobre la que transitan los vehículos, puede estar compuesta por uno o varios carriles de circulación. No incluye la berma (hombro).

Tabla 10. Ancho mínimo deseable de la calzada en la tangente

Tráfico IMDA	16 a 50		51 a 100		101 a 200		201 a 350	
Velocidad Km/h		*		*		*		*
25	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	6.00	5.50	6.00
30	5.50	5.50	5.50	6.00	5.50	6.00	5.50	6.00
40	5.50	5.50	5.50	6.00	5.50	6.00	5.50	6.00
50	5.50	5.50	5.50	6.00	5.50	6.60	6.00	6.60
60	6.00	6.00	6.00	6.60	6.00	6.60	6.00	6.60
70	6.00	6.00	6.00	6.60	6.00	6.60	6.00	6.60
80	6.00	6.60	6.00	6.60	6.00	6.60	6.00	6.60
90	6.60	7.00	6.60	7.00	6.60	7.00	7.00	7.00

Fuente: Manual para el Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito

En los tramos en recta, la sección transversal de la calzada presentará inclinaciones transversales (bombeo) desde el centro hacia cada uno de los bordes para facilitar el drenaje superficial y evitar el empozamiento del agua. Las carreteras pavimentadas estarán provistas de bombeo con valores entre 1.5% y 3%. En los tramos en curva, el bombeo será sustituido por el peralte.

Para determinar el ancho de la calzada en un tramo en curva, deberán considerarse las secciones indicadas en la tabla 4 y estarán provistas de sobrecanchos en los tramos en curva, de acuerdo con lo indicado en la tabla 4 (MTC, 2008, pág. 42).

Tabla 11. Bombeo normal de calzada.

Tipo de Superficie	Rango de Pendiente Transversal
Alto	1.5-2.0
Bajo	2.0-6.0

Fuente: AASTHO (2004)

El carril es la unidad de medida transversal para la circulación de una sola fila de vehículos, siendo el ancho de calzada la sumatoria del ancho de los carriles.

Ninguna otra característica de la carretera tiene mayor influencia sobre la seguridad y el confort de la conducción que el ancho del carril y la condición de la superficie. Es obvia la necesidad de que la calzada esté construida con una superficie uniforme, resistente al patinaje, para toda condición ambiental sobre la carretera. En cuanto al ancho de carril, se usan generalmente valores entre 2.75 m a 3.60 m, con un ancho de carril predominante de 3.60 m en la mayoría de las carreteras principales. El ancho de 3.60 m provee la separación deseable entre vehículos comerciales viajando en direcciones opuestas en carreteras bidireccionales cuando se espera que circulen altos volúmenes de tráfico y, especialmente, altos porcentajes de vehículos comerciales (SIECA, 2011, pág. 141).

2.4.4.2 Bermas

Se define como berma a la franja longitudinal paralela y adyacente a la calzada de la carretera que se utiliza como zona de seguridad para paradas de vehículos en emergencia y de confinamiento del pavimento. Las bermas pueden ser construidas por mezclas asfálticas, tratamientos superficiales o simplemente una prolongación de la superficie de rodadura en las carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito.

A cada lado de la calzada, se proveerán bermas con un ancho mínimo de 0.50 m. Este ancho deberá permanecer libre de todo obstáculo incluyendo señales y guardavías. De existir limitaciones de plataforma, la berma del lado interior (hacia el corte) puede reducir su ancho a criterio del proyectista y en función a la seguridad vial, evitando el efecto pared.

Para la colocación de hitos kilométricos, señales, guardavías y otros dispositivos de tránsito, deberá proveerse un sobreecho igual a 0.50m en los lugares en que sea necesario.

En los tramos en tangentes, las bermas tendrán una pendiente de 4% hacia el exterior de la plataforma. La berma situada en el lado inferior del peralte seguirá la inclinación de éste cuando su valor sea superior a 4%. En caso contrario, la inclinación de la berma será igual al 4%. La berma situada en la parte superior del peralte tendrá en lo posible, una inclinación en sentido contrario al peralte igual a 4%, de modo que escurra hacia la cuneta.

La diferencia algebraica entre las pendientes transversales de la berma superior y la calzada será siempre igual o menor a 7%. Esto significa que, cuando la inclinación del peralte es igual a 7%, la sección transversal de la berma será horizontal y cuando el peralte sea mayor a 7% la berma superior quedará indeseablemente inclinada hacia la calzada con una inclinación igual a la inclinación del peralte menos 7% (MTC, 2008, pág. 42).

Tabla 12. Ancho de berma

Clasificación	Autopista				Carretera				Carretera				Carretera							
	> 6.000				6.000 - 4001				4.000-2.001				2.000-400				< 400			
Características	Primera clase				Segunda clase				Primera clase				Segunda clase				Tercera Clase			
Tipo de orografía	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Velocidad de diseño: 30 km/h																			0.50	0.50
40 km/h															1.20	1.20	1.20	0.90	0.50	
50 km/h										2.60	2.60			1.20	1.20	1.20	1.20	0.90	0.90	
60 km/h					3.00	3.00	2.60	2.60	3.00	3.00	2.60	2.60	2.00	2.00	1.20	1.20	1.20	1.20		
70 km/h			3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.00	2.00	1.20		1.20	1.20		
80 km/h	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		2.00	2.00			1.20	1.20		
90 km/h	3.00	3.00	3.00		3.00	3.00	3.00		3.00	3.00			2.00				1.20	1.20		
100 km/h	3.00	3.00	3.00		3.00	3.00	3.00		3.00				2.00							
110 km/h	3.00	3.00			3.00															
120 km/h	3.00	3.00			3.00															
130 km/h	3.00																			

Fuente: Manual de Carreteras: Diseño Geométrico (2018)

2.5 Diseño de pavimento

2.5.1 Análisis de tránsito

Los pavimentos se diseñan con respecto a la cantidad de vehículos que transcurren por la vía, permitiendo la resistencia del pavimento en un determinado número de cargas aplicadas durante la vida útil. Sin embargo, toda carpeta de pavimento debe estar preparada para un tránsito

mixto, es decir, vehículos de diferente peso y número de ejes y que, para efectos de cálculo, se les transforma en un número de ejes equivalentes.

Para estas estructuras de pavimento, es necesario conocer la cantidad de vehículos que pasan por un punto dado. Por lo tanto, se realizan estudios de volúmenes de tránsito.

En relación con los estudios de volumen de tránsito, el MOPT cuenta con un formulario del flujo y la composición del tránsito, donde debe escribir ciertos datos, como nombre de la calle, código del camino, inicio y fin de la vía, y cómo es conocida la calle.

Es importante que, previo a realizar el conteo, se entreviste a los vecinos de la zona con la finalidad de obtener información que permita determinar el periodo del día en que se dé el mayor tránsito de vehículos.

El Manual de Especificaciones Técnicas para Realizar el Inventario y Evaluación de la Red Vial Cantonal (2014) explica sobre el flujo vehicular lo siguiente:

Con el fin de obtener mejor información fidedigna y confiable, se observarán las siguientes regulaciones:

a) El conteo de tránsito se realizará simultáneamente para ambos sentidos de la vía, y las horas de conteo dependerán del movimiento existente en el camino involucrado y deberá ser tal, que asegure que la muestra sea representativa del flujo vehicular diario (se recomienda mínimo cuatro horas en diferentes períodos del día).

b) Deberá anotarse la hora en la cual inicia el conteo y de forma inmediata, se procederá a hacer las anotaciones para cada vehículo que circule por la vía. Una raya vertical en la celda correspondiente al tipo de vehículo observado equivale a una unidad de vehículo, que, posteriormente, podrá ser considerada para la evaluación y cálculo del Tránsito Promedio Diario (TPD), de la calle o camino.

c) Si el flujo de vehículos sobrepasare el espacio de las celdas en el formulario, se recomienda reducir los rangos de tiempo a media hora, veinte minutos o diez minutos, según sea necesario.

d) Se sugiere hacer las anotaciones como se muestra en el ejemplo siguiente, anotando cuatro rayas (pequeñas) verticales y una horizontal para completar grupos de cinco vehículos (en el caso de que no disponga de contador manual o electrónico de tránsito).

e) La boleta se totaliza con la sumatoria por tipo de vehículo, para el total de las horas inventariadas. El TPD se calcula luego como la sumatoria de cada uno de los tipos de vehículo, sin incluir motos y especiales (tractores), dividido entre el número de horas inventariadas y multiplicado por el factor de expansión correspondiente para la zona.

El factor de expansión constituye un porcentaje calculado tomando información de una serie histórica significativa de flujos de tránsito representativa en un punto dado. La estimación de tránsito promedio diario de un camino cantonal se realizaría multiplicando dicho factor por el valor de tránsito obtenido en un conteo de una hora. En teoría, la estimación de tránsito antes mencionada reproduce las mismas características y condiciones del camino para el cual fue calculado el factor de expansión.

Dado que, para la red vial cantonal es necesario que transcurra un tiempo prudencial para contar con información histórica adecuada, que permita hacer proyecciones de tránsito, se recomienda se multiplique el tránsito horario tomado en un punto específico del camino por un factor de 10, cifra recomendada en artículos relacionados con el tema, tomado de experiencias en otros países. No obstante, una vez que, en los caminos cantonales de nuestro país se disponga de una serie histórica adecuada, existirá la base para realizar las proyecciones de tránsito promedio diario utilizando las técnicas estadísticas vigentes (MOPT, 2014, pág. 28).

2.5.2 Cálculo de ejes equivalentes

El SIECA (2002) menciona las consideraciones que se deben tener a la hora del cálculo de los 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, en igual forma, de diferentes maneras a igual carga. Como estas cargas producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, las fallas tendrán que ser distintas.

Para tomar en cuenta esta diferencia, el volumen de tránsito se transforma en un número equivalente de eje de una determinada carga, que, a su vez, producirá el mismo daño que toda la composición de tránsito mixto de los vehículos. Estas cargas uniformadas, según AASTHO, es el 80 kN o el 18 kips y la conversión se hace a través de los factores equivalentes de carga LEF (Load Equivalente Factor).

2.5.2.1 Factor de distribución de carril

En la siguiente tabla, se hace referencia al número de carriles en cada dirección para así lograr determinar el factor de distribución por carril, el cual es más conocido como L.

Tabla 13. Factor de distribución de carril

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

Fuente: Guía para el diseño de pavimento AASTHO 1993

2.5.2.2 Factor de crecimiento

El factor de crecimiento está en función a la tasa de crecimiento de cada tipo de vehículo y el periodo de diseño considerado, ya que no todos los tipos de vehículos tienen que crecer a la misma tasa, según como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 14. Factores de crecimiento de tránsito

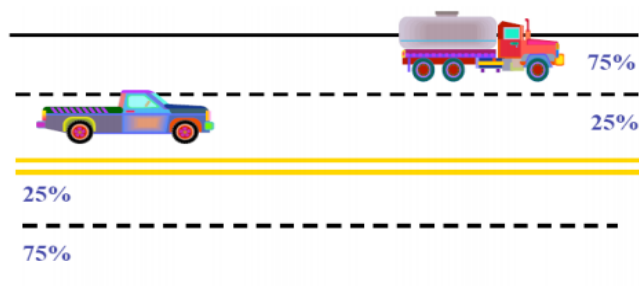
Período de análisis (años)	Factor sin Crecimiento	Tasa de crecimiento anual (g) (en %)						
		2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	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	79.06	94.46	113.28	164.49
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

Fuente: SIECA, 2002

2.5.2.3 Factor de distribución por direccional

Para el factor direccional, es importante el flujo vehicular, ya que, en la mayoría de los casos, este valor es de 0.5, la mitad de los vehículos que van en una dirección y la otra mitad en la otra dirección, tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 28. Distribución direccional



Fuente: Material del curso Diseño de Pavimentos, 2020

2.5.3 Variables de diseño

Estas variables son de suma importancia para el diseño de las capas, por lo cual se determina el espesor de cada segmento que conforman el pavimento.

2.5.3.1 Índice de serviciabilidad

El SIECA (2002) menciona lo siguiente:

El índice de serviciabilidad de un pavimento es el valor que indica el grado de confort que tiene la superficie para el desplazamiento natural y normal de un vehículo; en otras palabras, un pavimento en perfecto estado se le asigna un valor de serviciabilidad inicial que depende del diseño del pavimento y de la calidad de la construcción, de 5 (perfecto), y un pavimento en franco deterioro o con un índice de serviciabilidad final que depende de la categoría del camino y se adopta con base en esto y en el criterio del proyectista con un valor de 0 (pésimas condiciones).

A la diferencia entre estos dos valores, se le conoce como la pérdida de serviciabilidad (Δ PSI), es decir, el índice de serviciabilidad presente (Present Serviciability Index) (SIECA, 2002, pág. 44).

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

Índice serviciabilidad inicial:

-Po: 4.5 para pavimento rígido.

-Po: 4.2 pavimento flexible.

Índice serviciabilidad final:

-Pt: 2.5 o más para caminos importantes.

-Pt: 2.0 para caminos de poco tránsito.

2.2.3.2 Nivel de confianza

El nivel de confianza es aquel que asegura que el diseño de pavimento se desarrollara de una manera precisa y satisfactoria, debido a las cargas de tránsito y a las condiciones climáticas durante la ejecución, según lo estipulado en AASHTO 1993.

Los niveles de confianza están compuestos por dos variables:

-Desviación estándar normal (Z_r): esta variable que, para un conjunto de variables (espesor de las capas, características de los materiales, condiciones de drenaje, etc.) que intervienen en un pavimento, el tránsito que puede soportar el mismo a lo largo de un periodo de diseño sigue una ley de distribución normal con una medida M_t y una desviación típica S_o y, por medio de la siguiente tabla, con dicha distribución, se obtiene el valor de Z_r en función de un nivel de confiabilidad R , de forma que exista una posibilidad de $1-R/100$ de tránsito realmente soportado sea inferior a $Z_r \times S_o$ (SIECA, 2002, pág. 4).

Tabla 15. Valores Z_r para diversos grados de confiabilidad

Confiabilidad R, %	Desviación normal estándar Z_r
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Fuente: Guía de diseño AASHTO, 1993

Tabla 16. Niveles recomendados de confiabilidad (R)

Clasificación de la vía	Urbana	Rural
Autopistas	85-97	80-95
Troncales	80-95	75-90
Locales	75-85	70-90
Ramales y Vías Agrícolas	50-75	50-75

Fuente: Guía de diseño AASHTO, 1993

-Desviación estándar (S_o): representa la desviación estándar de la ley de predicción del tránsito en el periodo de diseño, es decir, el número de ejes que puede soportar un pavimento hasta que su índice de serviciabilidad descienda por debajo de un determinado Pt.

Según el SIECA (2002), se recomienda utilizar los valores comprendidos dentro de los siguientes intervalos:

Para pavimentos flexibles: 0.40 – 0.50

En construcción: 0.35 – 0.40

En sobre capas: 0.50

En la siguiente tabla, se observan los valores recomendados para la desviación estándar, según las condiciones locales.

Tabla 17. Valores recomendados para la desviación estándar (S_o)

Condición de Diseño	Desviación Estándar
Variación de la predicción en el comportamiento del pavimento (sin error de tráfico)	0,25
Variación total en la predicción del comportamiento del pavimento y en la estimación del tráfico	0,35 — 0.50 (0.45 valor recomendado)

Fuente: Guía de diseño de AASHTO, 1993

2.5.3.3 Módulo de resiliencia

En el método AASHTO 93, el módulo de resiliencia reemplaza a CBR como variable para caracterizar la subrasante, subbase, base y la mezcla asfáltica. El Mr. es una medida propia de la propiedad elástica de los suelos que se reconoce, a su vez, las características no lineales 84 de su comportamiento (Secretaría de Integración Económica Centroamericana, 2002, pág. 9).

Por otro lado, uno de los mayores objetivos del AASHO Road Test fue la de proveer información que pueda ser usada para desarrollar criterios y procedimientos de diseño para pavimentos. En 1961 el comité de diseño de AASHO desarrolló y puso en circulación la “Guía de diseño AASHO para pavimentos flexibles y rígidos”. Dicha guía se basó en los resultados del AASHO Road Test complementado con procedimientos de diseño y teorías ya existentes. Después de muchos años de uso de la guía, el comité de diseño de AASHO publicó la “Guía AASHO para el diseño de estructuras de pavimentos”. Las revisiones fueron hechas en 1981, y en 1983, el comité de diseño concluyó que había que agregar capítulos como el de rehabilitación a la guía y debía ser revisado por otras entidades gubernamentales.

Por otro lado, la Guía de diseño AASHO (1993) menciona lo siguiente:

El método exige que el valor de módulo elástico del material de fundación que se introduzca en la ecuación de diseño represente el efecto combinado de los diferentes módulos de ese material a lo largo del año, el cual se modifica en función de las condiciones ambientales a los cuales está sometido durante ese tiempo. Este valor, por otra parte, cuantifica el daño relativo al cual está sometido un pavimento durante cada época del año, y pondera este daño en una forma global para cualquier momento del año.

A este efecto, la determinación del valor de MR puede lograrse por alguno de los procedimientos siguientes:

a. Efectuando ensayos de módulo resiliente en laboratorio (Método AASHO T-274) sobre muestras representativas, bajo condiciones. Estos resultados permitirán establecer relaciones entre diferentes módulos resilientes y contenidos de humedad, que puedan ser utilizadas juntamente con estimaciones de "humedades en sitio" bajo el pavimento, para establecer valores de módulo resiliente para las diversas estaciones climatológicas.

b. Estimando los valores de módulo resiliente a partir de correlaciones entre mediciones de deflexiones de pavimentos en servicio -en diversos momentos del año.

c. Estimando los valores "normales" de módulo resiliente de los materiales, a partir de propiedades conocidas, tales como CBR, plasticidad, contenido de arcilla, etc. Luego, mediante la aplicación de relaciones empíricas, se estima el módulo resiliente para diferentes épocas del año. Estas relaciones pueden ser del tipo: Módulo Resiliente en invierno = 20 a 30% del módulo en verano.

Las ecuaciones de correlación recomendadas son las siguientes:

1. Para materiales de subrasante con CBR, igual o menor a 7,2%.

$$Mr = 1500 * CBR \quad (2)$$

2. Para materiales de subrasante con CBR, mayor de 7,2% pero menor o igual a 20,0%.

$$Mr = 2555 * CBR^{0.64} \quad (3)$$

3. Para materiales de subrasante con valores de CBR mayores a 20,0%, se deberán emplear otras formas de correlación, tal como la recomendada por la propia Guía de Diseño AASHTO-93:

$$Mr = 4.326 * \ln(CBR) + 241 \quad (4)$$

Una vez conocidos los valores de MR del material para cada estado de humedad, se determina el correspondiente "Valor de Daño Relativo (f)", a partir de la siguiente ecuación:

$$Uf: 1.18 \times 10^8 * Mr^{-2.32} \quad (5)$$

Los valores de f se multiplican por el número de meses en que el material de fundación estará en cada condición de humedad.

Los valores obtenidos se suman y se divide este total entre el número de lapsos para determinar el "Valor de Daño Relativo Ponderado (f)". Una vez conocido el valor de f ponderado, se calcula el MR ponderado a partir de la misma ecuación indicada (Corredor, s.f., pag.83).

2.5.3.4 Ecuación de diseño AASHTO 93

La ecuación de diseño corresponde a método de diseño de AASHTO (1993), tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\log_{10}Wt18 = Zr * So + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10} \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10}Mr - 8.07 \quad (6)$$

Donde:

Wt18: número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 kN) calculadas conforme al tránsito vehicular.

Zr: es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.

So: desviación estándar de todas las variables.

Δ PSI: pérdida de serviciabilidad.

Mr: módulo de resiliencia de la subrasante.

SN: número estructural.

2.5.3.5 Número estructural

Según la Guía para diseño AASHTO (1993), en relación con la determinación del número estructural, se menciona lo siguiente:

Una vez que las variables de diseño mencionadas han sido introducidas en la ecuación AASHTO '93, se resuelve la ecuación para obtener el valor de SN. El proceso se simplifica mediante un proceso iterativo, en vez de despejar el valor de SN. Para esto se sustituyen todas las variables de diseño, excepto Wt18, y se van dando valores al término SN, hasta lograr que con un determinado valor de SN se logre obtener un valor para Wt18 igual al que se conoce como variable de diseño.

Es muy importante señalar que esta ecuación resuelve la potencia estructural sobre la capa cuyo módulo resiliente ha sido sustituido en la ecuación (SN/i), y no puede resolverse para materiales con módulos mayores a 45.000 psi, lo que es lo mismo que decir que solo se resuelve para materiales a los cuales se les pueda realizar un ensayo del tipo CBR (Corredores, s.f., pág.84).

2.5.3.6 Espesores de cada capa

La fórmula general que relaciona el número estructural (SN) con los espesores de capa es la siguiente:

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * m_2 * D_2 + a_3 * m_3 * D_3 \quad (7)$$

Donde:

-a1, a2, a3: son los coeficientes estructurales o de capa, de la superficie de rodadura, base y subbase respectivamente.

-m2, m3: son los coeficientes de drenaje para base y subbase.

-D1, D2, D3: son los espesores de capa en pulgadas para la superficie de rodadura, base y subbase.

Tabla 18. Espesores mínimos sugeridos

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: Guía para diseño de estructuras de pavimento, AASHTO 1993

2.5.4 Criterios de falla

Para determinar los criterios de falla del pavimento, se utiliza en Costa Rica el *software* PITRA PAVE. Dicho programa establece un modelo de capas donde indica las deformaciones críticas que se presentan en el asfalto en un determinado tiempo. Estas deformaciones corresponden a las deformaciones en tensión de las deformaciones por compresión.

Una vez obtenidas las deformaciones, se procede a realizar los siguientes criterios según el Despacho del Viceministro Obras Públicas del MOPT:

2.5.4.1 Capacidad de carga por fatiga de la capa asfáltica

El criterio de falla por fatiga determina el sí diseño de asfalto es el adecuado. Para que este criterio cumpla por agrietamiento, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$N_f = 1.0226 \times 10^{25} * \left(\frac{1}{\epsilon t}\right)^{6.308} * \left(\frac{1}{MR}\right)^{0.810} \quad (8)$$

Donde:

Nf= repeticiones de carga para la falla por fatiga, NF > ESALS.

Et= deformación unitaria máxima a la tensión en la capa asfáltica.

MR= módulo de resiliencia de asfalto en MPa.

2.5.4.2 Capacidad de carga para la falla por deformación de subrasante

Para determinar si el diseño es el adecuado para la estructura de pavimento, éste debe cumplir con el criterio de falla por deformación, aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Nr: } 1.365 \times 10^{-9} * \left(\frac{1}{\epsilon_{VS}} \right)^{4.477} \quad (9)$$

Donde:

Nr= capacidad de carga por deformación plástica de la subrasante, NR > ESALS.

Ev= es la deformación unitaria máxima a la compresión en la subrasante.

2.6 Señalización vial

Según el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito (2000), en relación con su función con respecto a la señalización vial:

Los dispositivos de control también tienen por objeto guiar y advertir a los usuarios de la vía conforme sea necesario, para garantizar la operación segura y uniforme de los elementos individuales de la corriente de tránsito.

El señalamiento y los dispositivos de control de tránsito deben ser utilizados para dirigir y asistir a los conductores en las tareas de prevención, guía, orientación y navegación propias de la conducción de un vehículo automotor para garantizar el viaje seguro en cualquier calle, camino o carretera abierta al público. El señalamiento de guía e información debe estar restringido al control del tránsito, usarse cuando sea estrictamente necesario y no se debe utilizar como un anuncio o medio de publicidad de ninguna índole.

Para que sea efectivo, cualquier dispositivo para el control del tránsito deberá cumplir a cabalidad los cinco requisitos fundamentales que se enumeran a continuación:

- Satisfacer una necesidad para el adecuado desenvolvimiento del tránsito.
- Atraer la atención del usuario.
- Transmitir un mensaje claro y sencillo.
- Infundir respeto a los usuarios de la vía.
- Permitir suficiente tiempo y espacio para una respuesta adecuada.

Para conseguir los propósitos antes mencionados, deben tenerse en cuenta los siguientes factores básicos: diseño, localización, operación, uniformidad y mantenimiento (SIECA, 2000, pág. 32).

2.6.1 Señalización vertical

Para la señalización vertical, el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito describe su función:

Las señales verticales son dispositivos de control de tránsito instalados a nivel del camino o sobre él, destinados a transmitir un mensaje a los conductores y peatones, mediante palabras o símbolos, sobre la reglamentación de tránsito vigente, o para advertir sobre la existencia de algún peligro en la vía y su entorno, o para guiar e informar sobre rutas, nombres y ubicación de poblaciones, lugares de interés y servicios (SIECA, 2014, pág. 37). El manual también menciona que todo dispositivo se colocará únicamente en lugares donde se amerite.

Las señales verticales se clasifican en tres tipos, las cuales se presentan a continuación:

- Señales de reglamentación: son las que indican al conductor sobre la prioridad de paso, la existencia de ciertas limitaciones, prohibiciones y restricciones en el uso de la vía, según las leyes y reglamentos en materia de tránsito de cada país. La violación de la regulación establecida en el mensaje de estas señales constituye una contravención, que es sancionada conforme con lo establecido la ley o reglamento de tránsito. Este tipo de infracciones se sanciona con multas, el retiro de la circulación del vehículo, o bien, la suspensión de la licencia.

Figura 29. Señales de reglamentación



Fuente: Manual de Educación Vial de Costa Rica, 2016

- Señales de prevención: son las que indican al conductor de las condiciones prevalcientes en una calle o carretera y su entorno para advertir al conductor la existencia de un potencial peligro y su naturaleza.

Figura 30. Señales de prevención



Fuente: Manual de Educación Vial de Costa Rica, 2016

- Señales de información: son las que guían o informan al conductor sobre nombres y ubicación de poblaciones, rutas, destinos, direcciones, kilometrajes, distancias, servicios, puntos de interés, y cualquier otra información geográfica, recreacional y cultural pertinente para facilitar las tareas de navegación y orientación de los usuarios (SIECA, 2014, pág. 39).

Figura 31. Señales de información



Fuente: Manual Centroamericano de Dispositivos para el Control de Tránsito, 2000

2.6.2 Señales horizontales

El Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito (2000), en relación con las señales horizontales, menciona que:

La demarcación está constituida por las líneas, símbolos y letras que se pintan sobre el pavimento, bordes y estructuras de las vías de circulación o adyacentes a ellas, así como los objetos que se colocan sobre la superficie de rodamiento con el fin de regular o canalizar el tránsito o indicar la presencia de obstáculos.

Como sucede con otros dispositivos de control de tránsito, la demarcación en el pavimento debe ser uniforme en diseño, localización y aplicación, de manera que se simplifique la labor del usuario para reconocerla y entenderla instantáneamente.

Cada marca en el pavimento debe ser usada solo para transmitir el mensaje prescrito en este Manual. Las marcas que no tengan aplicabilidad y puedan causar confusión a los usuarios deben ser removidas. A continuación, se menciona la clasificación de la demarcación del pavimento:

Demarcación de pavimentos:

- Líneas de centro
- Líneas de carril
- Líneas de barrera
- Líneas de borde de pavimento
- Transiciones en el ancho del pavimento
- Líneas de canalización
- Aproximaciones a obstáculos
- Marcas de giros
- Líneas de parada
- Pasos para peatones
- Aproximaciones a pasos a nivel con vías férreas
- Zonas de estacionamiento
- Palabras y símbolos sobre el pavimento
- Marcas para regular el uso de la vía

Demarcación para indicar restricción de estacionamiento:

- Línea de borde amarilla

- Línea de borde roja
- Línea de borde azul

La señalización horizontal se divide en grupos, los cuales se muestran a continuación:

AMARILLO: el color amarillo define la separación de corrientes de tránsito de sentido opuesto en caminos de doble sentido con calzadas de varios carriles, líneas de barrera y franjas amarillas de estacionamiento prohibido. Este color se utiliza también en las islas divisorias y en las marcas para prevenir el bloqueo de una intersección.

BLANCO: el color blanco define la separación de corrientes de tránsito en el mismo sentido y la demarcación de bordes de calzada, pasos peatonales y espacios de estacionamiento. Además, se utiliza para los símbolos en el pavimento que indican los sitios de estacionamiento reservado para los vehículos que transportan personas discapacitadas, mujeres embarazadas o personas de la tercera edad. El color blanco se utiliza también en las palabras y en las flechas direccionales, así como en los distanciadores, las marcas de carril exclusivo y reversible y en algunas islas canalizadoras.

ROJO: el color rojo se utilizará exclusivamente para prohibir el estacionamiento (prohibición absoluta), en sitios críticos (por ejemplo, frente a un hidrante).

AZUL: el color azul se utilizará para demarcar zonas de estacionamiento exclusivas para personas con alguna restricción física, tales como en espacios reservados para personas con una discapacidad permanente, mujeres embarazadas.

VERDE: el color verde se utilizará para demarcar zonas de estacionamiento permitido, sujeto a un límite de tiempo (SIECA, 2000, pág.208).

Capítulo III: Marco metodológico

Para el presente proyecto de graduación, se usa la metodología de investigación como el conjunto de procedimientos y técnicas que se aplican, en forma ordenada, para el desarrollo de métodos y normas que permiten obtener un resultado preciso en la propuesta de diseño, además de evaluar cuál CBR es el más acertado para determinar cuál método es el más adecuado.

3.1 Enfoque metodológico de la investigación

Es importante recordar que Hernández, Fernández y Baptista (2008) señalan que el método mixto:

Es el conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta (pág. 546).

El enfoque del presente trabajo es de carácter mixto, tal como se explicó anteriormente, ya que permite lograr una perspectiva más amplia y profunda obteniendo resultados del estudio actual de la calzada. También, busca una solución eficaz y precisa con el planteamiento del problema para estudiar y teorizar los inconvenientes, como es el caso del mal estado en el que se encuentran las calles y siendo así una vía de mejora en el prediseño.

Por otro lado, se dice que la investigación es de enfoque mixto, pues se debe realizar una serie de observaciones, considerar técnicas cualitativas ya establecidas, además de realizar pruebas de campo y recopilación de datos para aplicar las normas de diseño de SIECA (procesos cuantitativos). El objetivo de esta recopilación de datos es analizar y buscar la solución que mejor se acomode a las condiciones de las calles de San Rafael de Heredia. De igual modo, se pretende buscar el mejor diseño de pavimento flexible que se ajuste a las condiciones siguiendo la normativa de ASSTHO 1993.

3.2 Variables

Tabla 19. Variables

Objetivos específicos	Variables independientes	Variables dependientes	Herramientas
Desarrollar un diseño geométrico vertical y horizontal en las calles La Saca, Naranjo y La Escuela con base en lo estipulado en el Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA 2011).	La utilización del Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA 2011).	Diseño geométrico horizontal y vertical, cumplimiento de los parámetros de diseño (anchos y velocidades máximas y mínimas).	Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA 2011).
Realizar una propuesta de señalización vertical y horizontal de las calles La Saca, Naranjo y La Escuela con base en lo estipulado en el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito (SIECA 2014).	Se utiliza el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito (SIECA).	Para la colocación de dispositivos horizontales y verticales, se deben tener presente la zona y las necesidades que tenga dicha carretera.	Manual Centroamericano de dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito (SIECA 2014)
Efectuar una nueva propuesta de diseño de pavimentos para las calles La Saca, Naranjo y La Escuela en el cantón de San Rafael de Heredia, con base en lo estipulado en AASHTO 1993.	Se usa el Manual Centroamericano de Normas para el Diseño de Pavimentos, según lo normado en ASSTHO 1993	Diseño de pavimento flexible, ejes equivalentes y tipos de estructuras de pavimento.	AASHTO 1993
Generar el volumen de tránsito promedio que se presenta en las calles La Saca, Naranjo y La Escuela por medio del TPD por tres días.	Se utiliza el Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA 2011).	Análisis de tránsito, estaciones de conteo, volúmenes de tránsito y velocidades.	Manual de Especificaciones Técnicas para realizar el Inventario y Evaluación de la Red Cantonal del MOPT.
Aplicar el Manual de Recomendaciones Técnicas para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles con la Incorporación de Criterios Mecánicos- Empíricos (2014) para la comprobación de las fallas a la estructura de pavimento.	Se utiliza el Manual de Recomendaciones Técnicas para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles con la Incorporación de Criterios Mecánicos- Empíricos (2014).	Obtener las deformaciones por fatiga y deformaciones permanentes de la estructura de pavimento.	Manual de Recomendaciones Técnicas para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles con la Incorporación De Criterios Mecánicos- Empíricos (2014)

3.3 Población y muestra

La población está comprendida por los tramos que suman 1.9 km en los cuales se encuentran las calles La Saca, Naranjo y La Escuela en el cantón de San Rafael de Heredia, que se utilizarán para el prediseño de pavimento y diseño geométrico de la carretera.

Para la muestra, el proyecto de graduación no cuenta, ya que el CBR es brindado por la municipalidad.

3.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Las técnicas de investigación para el desarrollo del presente proyecto de graduación se enmarcarán en la búsqueda exhaustiva de estudios referentes al diseño geométrico y de pavimento flexible, mediante la recopilación de información del SIECA y normativas como ASSTHO 1993. Por otro lado, están las bibliografías de tesis, artículos técnicos y libros de diseño geométrico y diseños de carpetas de pavimento.

3.4.1 Levantamiento topográfico

La topografía o el levantamiento topográfico es brindado por la Municipalidad de San Rafael, realizado por el topógrafo Álvaro Chaves. Así mismo, cabe mencionar que la investigadora de este trabajo colaborará para realizar el levantamiento correspondiente para así obtener los puntos.

En relación con el levantamiento topográfico, es importante mencionar que se debe realizar una visita a cada calle donde se va a hacer el prediseño, con el objetivo de elaborar la medición de dichas calles. Seguidamente, se utiliza una estación total, dos bastones y prismas para la recolección de los datos.

Se establece un punto inicial donde se coloca la estación y se inicia la medición, colocando la cantidad de estacionamientos necesarios para la obtención de todas las referencias. Generalmente, la cantidad estacionamientos dependen de las características del terreno y las curvas que presente las zonas

De manera posterior, se utilizará el *software* Civil 3D 2019 para elaborar los puntos de la superficie del diseño geométrico vertical y horizontal. Es decir, una vez que se brindan los datos, éstos son exportados a Civil 3D y se genera una superficie de curvas de nivel.

En la figura presentada a continuación, se observa la participación de la sustentante en el levantamiento topográfico.

Figura 32. Fotografía #1



Figura 33. Fotografía #2.



3.4.2 Conteo vehicular

Se realizarán estudios de tráfico por medio de la aplicación de un TPD, donde se toma el volumen del tránsito promedio diario durante periodo determinado. Luego, se divide por la cantidad de días comprendido por el cual se realizó el conteo, para el diseño de los elementos estructurales en una carretera.

Durante esta etapa del proyecto, el conteo de tránsito se realizará simultáneamente para ambos sentidos de la vía, y las horas de conteo dependerán del análisis previo, que se hizo con los vecinos de la zona.

Para este proyecto, se realizará el conteo por tres días, lo cual está estipulado en el Manual de Especificaciones Técnicas para Realizar el Inventario y Evaluación de la Red Vial Cantonal. En ese sentido, se indica la sumatoria por cada vehículo, sin incluir motos y vehículos especiales, dividido entre el número de horas y multiplicándolo por un factor de expansión correspondiente.

Según este manual, el factor de expansión compone un porcentaje calculado, donde toma información de una serie de cifras significativas de flujo de tránsito en un punto dado. Esta cifra es la estimación de tránsito promedio diario de un camino cantonal.

$$TPD = Fe * \frac{\sum \text{volumen de conteo}}{\sum \text{tiempo}} \quad (10)$$

3.4.3 Criterios de diseño geométrico

El criterio de diseño de este proyecto de graduación en el cantón de San Rafael de Heredia está basado con el reglamento y criterios del Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA 2011).

Tabla 20. Sistema de clasificación funcional

CLASIFICACIÓN FUNCIONAL	SERVICIOS QUE PROVEE
• Arterial	Provee el mayor nivel de servicio con las mayores velocidades permitidas en distancias de viaje ininterrumpido, con algún grado de control en los accesos.
• Colector	Provee un menor nivel de servicio que la arterial. Se permiten velocidades menores en distancias cortas por servir de colector de tráfico de caminos locales y los conecta con las arteriales.
• Local	Consiste en todas las carreteras no definidas como arteriales o colectoras; su servicio principal es proveer acceso a la mayoría de lugares y sirve a los viajes sobre distancias relativamente cortas.

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras, 2011

Tabla 21. Clasificación de las carreteras

FUNCIÓN	CLASE DE CARRETERA(1)	NOMECLATURA	TPD(2) (AÑO FINAL DE DISEÑO)	Número de Carriles
ARTERIAL PRINCIPAL	AUTOPISTA	AA	>20,000	6-8
	ARTERIAL RURAL	AR	10,000-20,000	4-6
	ARTERIAL URBANA	AU	10,000-20,000	4-6
ARTERIAL MENOR	ARTERIAL MENOR RURAL	AMR	3,000-10,000	2
	ARTERIAL MENOR URBANA	AMU	3,000-10,000	2
COLECTOR MAYOR	COLECTOR MAYOR RURAL	CMR	10,000-20,000	4-6
	COLECTOR MAYOR URBANA	CMU	10,000-20,000	4-6
COLECTOR MENOR	COLECTOR MENOR RURAL	CR	500-3,000	2
	COLECTOR MENOR URBANA	CU	500-3,000	2
LOCAL	LOCAL RURAL	LR	100-500	2
	LOCAL URBANO	LU	100-500	2
	RURAL	R	<100	1-2

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras, 2011

Toda calzada debe contar con seguridad, por lo tanto, las distancias de visibilidad y los cambios de velocidad graduales son de suma importancia para el diseño, ya que debe evitar cualquier accidente cuya causa sea atribuible a las vías, por lo cual se utilizan las siguientes tablas:

Tabla 22. Pendientes máximas para carreteras locales

TIPO DE TERRENO	Máxima Pendiente (%) para la Velocidad de Diseño Especificada, KPH								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Plano	9	8	7	7	7	7	6	6	5
Lomerío	12	11	11	10	10	9	8	7	6
Montañoso	17	16	15	14	13	12	10	10	---

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras, 2011

Tabla 23. Control de diseño para curvas verticales en cresta

Velocidad de Diseño KPH	Distancia de Visibilidad de Parada (m)	Tasa de Curvatura Vertical K	
		Calculada	Para Diseño
20	20	0.6	1
30	35	1.9	2
40	50	3.8	4
50	65	6.4	7
60	85	11.0	11
70	105	16.8	17
80	130	25.7	26
90	160	38.9	39
100	185	52.0	52
110	220	73.6	74
120	250	95.0	95

K = Longitud (m) por porcentaje de A

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras, 2011

Tabla 24. Control de diseño para curvas verticales cóncava o en columpio

Velocidad de Diseño KPH	Distancia de Visibilidad de Parada (m)	Tasa de Curvatura Vertical K	
		Calculada	Para Diseño
20	20	2.1	3
30	35	5.1	6
40	50	8.5	9
50	65	12.2	13
60	85	17.3	18
70	105	22.6	23
80	130	29.4	30
90	160	37.6	38
100	185	44.6	45
110	220	54.4	55
120	250	62.8	63

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras, 2011

San Rafael de Heredia se caracteriza por tener una topografía variada, lo cual se debe tener en cuenta para el diseño. No obstante, las velocidades son otro parámetro básico para el diseño de elementos geométricos.

Por otro lado, se toman en cuenta los niveles de servicio para las diferentes vías, ya que no van a ser iguales las velocidades para las distintas áreas o tipos de carreteras.

Tabla 25. Guía para seleccionar el nivel de servicio para diseñar

Tipo de carretera	Tipo de Área y Nivel de Servicio Apropriado			
	Rural Plano	Rural Ondulado	Rural Montañoso	Urbano y Suburbano
Autopista	B	B	C	C
Arterial	B	B	C	C
Colectora	C	C	D	D
Locales	D	D	D	D

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras, 2011

Tabla 26. Ancho mínimo de los hombros y aceras

Tipo de Carretera		Acceso	Tipo de Superficie	Ancho de Hombros (m)		Ancho de Aceras (m)
				Internos	Externos	
AA	Autopista	Controlado	Alto	1.0 – 1.5	2.5 - 3.0	
AR	Arterial Rural	Controlado	Alto	1.0 - 1.5	2.5 – 3.0	2.0
AU	Arterial Urbana	Controlado	Alto	1.0 - 1.5	2.5 – 3.0	2.0
AMR	Arterial Menor Rural	-	Alto	-	1.2 - 1.6	1.0 – 1.2
AMU	Arterial Menor Urbana	-	Alto	-	1.2 - 1.6	1.0 – 1.2
CMR	Colector Mayor Rural	Controlado	Alto	1.0 -1.5	2.5 – 3.0	1.2 – 2.0
CMU	Colector Mayor Urbana	-	Alto	0.5 – 1.0*	1.2 - 1.8	1.2 – 1.5
CR	Colectoras Menor Rural	-	Intermedio	-	1.2 - 1.6	1.0 – 1.2
CS	Colectoras Menor Urbana	-	Intermedio	-	1.2 – 1.6	1.0 – 1.2
LR	Local Rural	-	Intermedio	-	0.75-1.6	1.0 – 1.2
LU	Local Urbano	-	Intermedio	-	0.75-1.6	1.0 – 1.2
R	Rural	-	Bajo	-	-	-

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras, 2011

3.4.4 Criterios de diseño de pavimento, ASSHTO 1993

La normativa de ASSTHO 93 de origen estadounidense se utiliza para el diseño de estructura de pavimentos flexibles del presente proyecto de graduación, donde se presenta un modelo o ecuación a través de la cual se obtiene el parámetro llamado número estructural (SN), cuyo valor, además de ser un indicativo del espesor total del pavimento, lo conforman la capa asfáltica, la capa base y la capa subbase.

Para el diseño, se deben tener en cuenta los valores recomendados por los coeficientes de drenaje, ya que van a influir. Sin embargo, se debe hacer proyecciones vehiculares de no menos 20 años dato adquirido para diseños nacionales, debido a que las rutas cantonales, como la de San Rafael de Heredia, la cual presenta un bajo volumen vehicular, por lo tanto, se puede decir que se clasifica como una carretera local.

Tabla 27. Periodo de diseño

Tipo de Carretera	Período de Diseño
Autopista Regional	20 – 40 años
Troncales suburbanas	15 – 30 años
Troncales Rurales	
Colectoras Suburbanas	10 – 20 años
Colectoras Rurales	

Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002

3.4.4.1 Ejes equivalentes

Para el cálculo de ejes equivalentes de carga (ESAL'S), se basa en la metodología de American Association of State Highways and Officials (AASHTO) 1993, la cual establece la siguiente.

$$ESAL'S = TPD * T * Tf * Gt * D * L * 365 * Y \quad (11)$$

$$GY = \frac{(1 + r)^y - 1}{r} \quad (12)$$

Donde:

TPD = tránsito promedio diario.

T = composición vehicular.

Tf = factor camión.

D = factor de distribución por dirección.

L = factor de distribución por carril.

GY = tasa de crecimiento total para la cantidad de años de diseño.

365 = corresponde a un año.

r = tasa de crecimiento anual.

y = vida útil del periodo de diseño.

Tabla 28. Factor de distribución por dirección

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

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1993

Tabla 29. Factor de distribución por carril

Número de carriles en una sola dirección	LC ¹¹
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4	0.50 – 0.75

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1993

Para los factores camión, se utilizan los recomendados por el CONAVI, de conformidad a los lineamientos y directrices emitidas por el Despacho del Viceministro de Obras Públicas, mediante el oficio DVOP-5170-07, del 10 de setiembre del 2007.

Tabla 30. Factores camión MOPT

Tipo de vehículo	Factor Camión
Livianos	0.004
Bus	2.290
Carga liviana	0.020
Camión C2	0.630
Camión C3	1.280
Camión T3-S2	2.380

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes MOPT, 2007

3.4.4.2 Módulo de resiliente de la subrasante

Para la determinación del módulo resiliente, se aplica la metodología de AASHTO1993, que, a pesar de tener sus limitaciones, así también tiene un buen conocimiento de las propiedades de los materiales presentes. Para este proyecto, se utilizará la ecuación 3.

3.4.4.3 Diseño pavimento

El nivel de confiabilidad está en función del tipo de carretera y el TPD, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 31. Niveles de confianza e índices terminales de servicio

Zona	TPD	Nivel de confianza	Índice de servicio terminal PSI
Rutas primarias	Menor a 500	75	2.0
	Entre 500 y 2000	85	2.5
	Mayor a 2000	90	2.5
Rutas secundarias	Menor a 500	70	2.0
	Entre 500 y 2000	80	2.0
	Mayor a 2000	85	2.5
Rutas terciarias	Menor a 500	70	2.0
	Entre 500 y 2000	75	2.0
	Mayor a 2000	80	2.0

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes MOPT, 2007

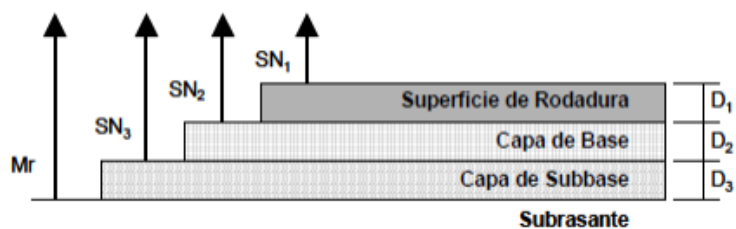
Tabla 32 Coeficiente de drenaje para pavimentos flexibles

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: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993

Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002

Figura 34. Espesores en función del número estructural



Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002

Quando se tiene el número estructural, seguidamente, se hace el diseño propuesto de los espesores de cada capa.

$$D1 \geq \frac{SN1}{a1} \quad (13)$$

$$SN'1 = D1 * a1 \quad (14)$$

$$D2 \geq \frac{SN - SN'1}{a2 * m2} \quad (15)$$

$$SN'2 = D2 * a2 * m2 \quad (16)$$

$$D3 \geq \frac{SN3 - SN'2 - SN'1}{a3 * m3} \quad (17)$$

$$SN'3 = D3 * a3 * m3 \quad (18)$$

Donde:

a1, a2, a3: son los coeficientes estructurales o de capa, de la superficie de rodadura, base y subbase respectivamente.

m2, m3: son los coeficientes de drenaje para base y subbase.

D1, D2, D3: son los espesores de cada capa en pulgadas para la superficie de rodadura, base y subbase respectivamente. Se establecen las siguientes condiciones.

Cuando se obtienen los espesores propuestos, se pueden comparar con los espesores teóricos que presenta la siguiente tabla:

Tabla 33. Espesores mínimos de pavimento flexible

Número de ESALs	Concreto asfáltico	Base granular
Menos de 50,000	2.5 cm	10 cm
50,000 - 15,000	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: Guía para el diseño de pavimento AASHTO 1993

Una vez que se tiene la estructura de pavimento, se compara con los valores mínimos de espesores, como lo indica la Guía de diseño AASHTO 93.

Por otro lado, para determinar si la estructura de pavimento es la adecuada para cada calle, se usarán las recomendaciones técnicas para el diseño estructural de pavimento flexible con la incorporación de criterios mecánicos-empíricos (2014) de la Lanamme.

3.4.5 Falla por agrietamiento

Se utiliza como referencia el modelo matemático de la Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), permitiendo estimar la cantidad de repeticiones de carga (80 KN) necesarias para la falla a fatiga de una mezcla asfáltica.

A continuación, se presentan las ecuaciones que permite estimar la cantidad de repeticiones necesarias para alcanzar un 100% del daño del pavimento, además de considerar el factor de ajuste de laboratorio a campo y para la determinación de falla por agrietamiento:

$$Nf: 0.00432 * C * k'1 * \left(\frac{1}{\epsilon t}\right)^{3.9492} * \left(\frac{1}{E}\right)^{1.281} \quad (19)$$

$$C: 10^M \quad (20)$$

$$M: 4.84 * \left(\frac{Vb}{Va + Vb} - 0.69\right) \quad (21)$$

$$K'1: \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 * hac)}}} \quad (22)$$

Donde:

E: módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi).

ϵt : deformación por tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica (in/in).

Vb: contenido de asfalto efectivo (%).

Va: porcentaje de vacíos (%).

k'1: parámetro de corrección según tipo de grieta.

hac: espesor de carpeta asfáltica (in).

Una vez obtenida la cantidad de repeticiones totales que puede soportar la estructura, se procede a estimar el daño por fatiga con la siguiente ecuación:

$$D: \sum_{i=1}^T \frac{ni}{Ni} \quad (23)$$

Donde:

D: daño.

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

ni: tráfico actual del periodo i.

Ni: tráfico permitido bajo las condiciones que prevalecen del periodo i.

Conociendo el nivel de deterioro para los años que se estimó el proyecto, se hace una relación con la siguiente ecuación, obteniendo el porcentaje de área agrietada y comprobando si el pavimento cumple o no por fatiga con la tabla 30.

$$FC: \left(\frac{6000}{1 + e^{(C1 \cdot C'1 + C'2 \cdot C''2 \cdot \log(D))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad (24)$$

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.

C1: 1,0

C'1: -2*C'2

C'2: 1,0

C''2: -2,40874-39,748*(1+hac) (-2,856)

hac=espesor en pulgadas.

Tabla 34. 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: LANAMME, 2014

3.4.6 Deformación permanente

Para las deformaciones permanentes, el modelo de MEPDG permite obtener las deformaciones permanentes en cada capa de la estructura de pavimento, obteniendo una deformación total, la cual se procede a revisar con la tabla 31 y verificando que no sobrepase el ahuellamiento permisible máximo.

Tabla 35. Falla para deformaciones permanentes

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

Fuente: LANAMME, 2014

3.4.6.1 Deformaciones permanentes de la mezcla asfáltica

Este modelo matemático en la deformación permanente permite determinar la deformación plástica acumulada y un parámetro en función del espesor de cada capa. En la siguiente ecuación, se determina la deformación permanente de la mezcla asfáltica.

$$PD: \sum_{i=1}^{n \text{ capas}} \varepsilon_p^i * k_i \quad (25)$$

Donde:

PD: deformación permanente del pavimento.

ε_p : esfuerzo plástico total de la capa i.

k1: parámetro de profundidad.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} : 10^{-3.4488} * T^{1.5606} * N^{0.479244} \quad (26)$$

Donde:

ε_p = deformación plástica acumulada a N repeticiones de carga (in/in).

ε_r = deformación vertical resiliente (in/in).

T = temperatura de la mezcla (°F).

N = número de repeticiones de carga.

$$k1: (C1 + C2 * d) * 0.328196^d \quad (27)$$

$$C1: - 0.1039 * hac^2 + 2.4868 * hac - 17.342 \quad (28)$$

$$C2: 0.0172 * hac^2 - 1.7331 * hac + 27.428 \quad (29)$$

Donde:

hac: espesor total de la capa asfáltica (in).

d: profundidad media de la capa (in).

3.4.6.2 Deformación permanente de la base y subbase granular

$$\delta a: \beta 1 * \left(\frac{\epsilon 0}{\epsilon r}\right) e^{-\left[\frac{p}{N}\right]^\beta} * \epsilon v * h \quad (30)$$

Donde:

δa : deformación permanente para la capa/subcapa (in).

N: número de repeticiones de carga.

ϵv : deformación vertical elástica en la capa (in/in).

h: espesor (in).

$$\text{Log}\beta: - 0.61119 - 0.017638 * Wc \quad (31)$$

$$\left(\frac{\epsilon 0}{\epsilon r}\right): \frac{\left(e^{(p)^\beta} * 0.15\right) + \left(e^{(p/10^9)^\beta} * 20\right)}{2} \quad (32)$$

$$p: 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{0.15}{20} \right]}{1 - (10^9)^\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (33)$$

$$W_c: 51.712 \left[\left(\frac{Er}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}} \right]^{-0.3586 * GTW^{0.1192}} \quad (34)$$

Donde:

W_c : contenido de agua (%).

Er : módulo resiliente de la capa/subcapa, (psi).

GTW : profundidad del nivel freático, (pies).

ϵ_0 , β , ρ : propiedades del material.

ϵ_r : deformación elástica utilizada en la prueba de laboratorio para obtener las propiedades del material (ϵ_0 , β , ρ).

ϵ_v : deformación elástica promedio vertical en la capa/subcapa.

h : espesor de la capa/subcapa (in).

β_1 : factor de calibración, 1,673 para bases/ subbases granulares y 1,35 para la subrasante.

3.4.6.3 Deformación permanente de la subrasante

Para la deformación plástica de la subrasante, se calcula en dos puntos en específico que son: en su fibra superior y a 6 in de profundidad en la subrasante.

$$\epsilon_p(z): (\epsilon_{p,z=0}) e^{-kz} \quad (35)$$

Donde

$\epsilon_p(z)$: deformación vertical plástica a la profundidad z (medida desde la superficie de la subrasante).

$\epsilon(p, z=0)$: 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.

Para llegar a tener a la deformación permanente de la subrasante, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Usando las ecuaciones para materiales granulares, se calcula (ϵ_0/ϵ_r), β y ρ para $z=0$ y $z= 6$ in.
2. Utilizando los valores obtenidos en el paso anterior, se calcula la deformación plástica para cada profundidad:

$$\varepsilon_p: \beta_1 * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{p}{N}\right]^\beta} \varepsilon_v \quad (36)$$

3. Se calcula el K:

$$k: \frac{1}{6} \ln \left(\frac{\varepsilon_p, z=0}{\varepsilon_p, z=6} \right) \quad (37)$$

4. Finalmente, la deformación permanente total se calcula de la siguiente manera:

$$d\delta: \varepsilon_p(z) dz \quad (38)$$

$$\delta: \int_0^{hroca} \varepsilon_p(z) dz \quad (39)$$

$$\delta: \varepsilon_{p,z=0} \int_0^{hroca} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-khroca}}{k} \right) * \varepsilon_{p,z=0} \quad (40)$$

Donde:

δ : deformación plástica total de la subrasante, in.

hroca: profundidad de la capa rocosa, pies (z=0 representa la superficie de la subrasante).

3.5 Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos

Una vez recopilada la información teórica, se procede con la utilización del *software* Civil 3D, AASHTO 93, Excel y PITRA PAVE con el fin de determinar un diseño acorde con la normativa nacional.

En el presente proyecto, Civil 3D es una de las herramientas más útiles, ya que permite realizar el diseño geométrico horizontal y vertical a través de una superficie creada por puntos topográficos, los cuales fueron dados por la Municipalidad de San Rafael de Heredia. En el diseño geométrico, se pretenden ver, de manera específica, las elevaciones del terreno con respecto a la calzada, los perfiles, los cortes de la carretera, la curva masa, las pendientes, entre otros elementos.

Por otro lado, se implementa el uso de Excel para la memoria de cálculo y elaboración de tablas. Posteriormente, para la ubicación digital, se manejará con los programas Google Maps y Google Earth.

Para el análisis del diseño pavimento, se utilizará el *software* PITRA PAVE, ya que éste permite obtener los esfuerzos, las deformaciones y las deflexiones ante determinadas cargas.

Por otra parte, para el CBR, se realizarán pruebas por parte del estudiante, donde toman muestras que son llevadas al laboratorio y se establece la relación entre la carga determinada, lo cual es establecido por la normativa ASSTHO 1993. De este modo, los resultados del CBR obtenidos se utilizarán para evaluar la capacidad de resistencia de las capas granulares de la carretera.

Capítulo IV: Análisis de los resultados

4.1 Análisis de diseño geométrico vertical y horizontal

Para el diseño geométrico, es importante la clasificación en que se encuentra la carretera. Para ello, se establecen características o sistemas que introducen un concepto básico requerido para comprender su funcionabilidad de la obra. De esta forma, la calzada va a depender de algunos factores según su clasificación, como se establece en el apartado 2.1.1 del presente documento.

Tomando en cuenta los parámetros de diseño, el tipo de terreno y las normas establecidas en el presente documento, fueron fundamentales para poder realizar dicha propuesta de diseño geométrico mediante el *software* AutoCAD CIVIL 3D.

4.1.1 Alineamiento horizontal

En los alineamientos horizontales de cada calle, se estableció empezar desde la estación 0+000 y finalizar donde lo indicó la municipalidad. Mediante la topografía respectiva de cada zona, se logra apreciar un terreno ondulado y con una gran necesidad de mejoramiento en el diseño geométrico.

Como se mencionó anteriormente, cada calle inicia en la estación 0+000 y finaliza en: calle La Saca 0+801.05, calle La Escuela 0+647.88 y calle Naranja en 0+496.12, cumpliendo así con una distancia de 1.9 km.

4.1.1.1 Velocidad de diseño

Las calles son clasificadas como carreteras cantonales o terciarias, las cuales se encuentran con un tipo de terreno lomerío por su ubicación geográfica. Tomando en cuenta las características de la zona y la tabla 3, se establece una velocidad máxima de diseño de 40km/h.

4.1.1.2 Radio mínimo

Para establecer el radio mínimo, se determinó mediante la tabla 6, en la cual se indica un valor de radio mínimo de 41 m para una velocidad de 40 km/h, con un peralte máximo de 8% según se indica en AASHTO 2004.

4.1.1.3 Curvas horizontales

El presente estudio del diseño de las curvas horizontales se debió generar para cada calle. Sin embargo, el radio de diseño se mantuvo para cada carretera y no se vio afectado solo en una de las calles. Se debió colocar el valor mínimo, ya que la topografía existente no permitió un ajuste diferente en dicha curva.

A continuación, en las siguientes tablas, se presentan los elementos horizontales que fueron de gran importancia en el diseño geométrico de cada calle. No obstante, se pueden ver los resultados obtenidos en AutoCAD CIVIL 3D, siempre manteniendo en cuenta la normativa de diseño.

Tabla 36. Elementos de curvas horizontales, calle Naranja

Elementos de curvas horizontales -calle Naranja						
Número	Largo	Radio	Línea/ Dirección de cuerda	Estación inicial	Estación final	Angulo delta
L1	179.923 m		N2° 56' 27"W	0+000.00 m	0+179.92 m	
C2	56.562m	1279.822 m	N4° 12' 25"W	0+179.92 m	0+236.48 m	2.5322 (d)
L2	54.242m		N5° 28' 23"W	0+236.48 m	0+290.73 m	
C2	40.080m	147.208m	N13° 16' 22"W	0+290.73 m	0+330.81 m	15.5998 (d)
L3	21.365m		N21° 04' 22"W	0+330.81 m	0+352.17 m	
C3	35.751m	105.093m	N30° 49' 06"W	0+352.17 m	0+387.92 m	19.4911 (d)
C4	48.895m	59.635m	N17° 04' 31"W	0+387.97 m	0+436.86 m	46.9774 (d)
L5	59.253m		N6° 24' 49"E	0+436.86 m	0+496.12 m	

Tabla 37. Elementos de curvas horizontales, calle La Saca

Elementos de Curvas Horizontales -calle La Saca						
Número	Largo	Radio	Línea/ Dirección de cuerda	Estación Inicial	Estación Final	Angulo Delta
L1	34.893m		N41° 16' 00"E	0+000.00 m	0+034.89 m	
C1	28.419m	198.422 m	N37° 09' 49"E	0+034.89 m	0+063.31 m	8.2062 (d)
L2	11.252m		N33° 03' 38"E	0+063.31 m	0+074.56 m	
C2	48.714m	107.401 m	N46° 03' 17"E	0+074.56 m	0+123.28 m	25.9881 (d)
L10	19.455m		N59° 02' 55"E	0+123.28 m	0+142.73 m	

Numero	Largo	Radio	Línea / Cuerda	Estación inicial	Estación Final	Angulo delta
C10	39.092m	112.037 m	N69° 02' 41"E	0+142.73 m	0+181.83 m	19.9918 (d)
L11	27.348m		N79° 02' 26"E	0+181.83 m	0+209.17 m	
C3	21.893m	211.495 m	N76° 04' 30"E	0+209.17 m	0+231.07 m	5.9310 (d)
L3	40.215m		N73° 06' 34"E	0+231.07 m	0+271.28 m	
C4	18.219m	196.789 m	N70° 27' 26"E	0+271.28 m	0+289.50 m	5.3046 (d)
L4	32.269m		N67° 48' 17"E	0+289.50 m	0+321.77 m	
C5	24.339m	115.790 m	N61° 47' 00"E	0+321.77 m	0+346.11 m	12.0433 (d)
L5	55.983m		N55° 45' 42"E	0+346.11 m	0+402.09 m	
C6	29.126m	152.537 m	N61° 13' 54"E	0+402.09 m	0+431.22 m	10.9404 (d)
C7	24.327m	135.305 m	N61° 33' 05"E	0+465.49 m	0+489.81 m	10.3015 (d)
L7	117.157 m		N56° 24' 02"E	0+489.81 m	0+606.97 m	
C8	17.297m	349.875 m	N57° 49' 01"E	0+606.97 m	0+624.27 m	2.8326 (d)
L8	109.317 m		N59° 13' 59"E	0+624.27 m	0+733.58 m	
C9	21.447m	413.753 m	N57° 44' 53"E	0+733.58 m	0+755.03 m	2.9700 (d)

Tabla 38. Elementos de curva horizontales, calle La Escuela.

Elementos de curvas horizontales -calle La Escuela

Número	Largo	Radio	Línea/ Dirección de cuerda	Estación inicial	Estación final	Angulo delta
L2	48.940m		N11° 08' 28"W	0+000.00m	0+048.94m	
C1	12.413m	82.809m	N6° 50' 49"W	0+048.94m	0+061.35m	8.5885 (d)
L3	4.854m		N2° 33' 10"W	0+061.35m	0+066.21m	
C2	30.398m	41.000m	N23° 47' 33"W	0+066.21m	0+096.60m	42.4794 (d)
L4	10.641m		N45° 01' 55"W	0+096.60m	0+107.25m	
C3	25.858m	42.798m	N27° 43' 25"W	0+107.25m	0+133.10m	34.6169 (d)
L5	0.579m		N10° 24' 54"W	0+133.10m	0+133.68m	

Número	Largo	Radio	Línea/ Dirección de cuerda	Estación inicial	Estación final	Angulo delta
C4	47.051m	156.575m	N1° 48' 23"W	0+133.68m	0+180.73m	17.2175 (d)
L6	48.863m		N6° 48' 08"E	0+180.73m	0+229.60m	
C5	41.543m	41.733m	N21° 42' 54"W	0+229.60m	0+271.14m	57.0348 (d)
L7	82.551m		N50° 13' 57"W	0+271.14m	0+353.69m	
C6	30.875m	61.342m	N35° 48' 48"W	0+353.69m	0+384.56m	28.8382 (d)
L8	73.986m		N21° 23' 39"W	0+384.56m	0+458.55m	
C7	20.879m	68.380m	N30° 08' 29"W	0+458.55m	0+479.43m	17.4941 (d)
L9	89.575m		N38° 53' 18"W	0+479.43m	0+569.00m	
C8	7.804m	41.000m	N44° 20' 30"W	0+569.00m	0+576.81m	10.9064 (d)
L10	46.230m		N49° 47' 41"W	0+576.81m	0+623.04m	
C9	12.291m	41.000m	N58° 22' 59"W	0+623.04m	0+635.33m	17.1765 (d)
L11	12.551m		N66° 58' 16"W	0+635.33m	0+647.88m	

4.1.2 Alineamiento vertical

El alineamiento vertical proyecta sobre el plano las distintas elevaciones del eje de la calzada, en el cual se representa el perfil del terreno natural junto con el eje de la calle.

Al igual que el alineamiento horizontal, éste va de la mano, por lo tanto, inician en la misma estación y finalizan igual.

Posteriormente, el alineamiento vertical se caracteriza por estar compuesto por tangentes y curvas, donde las curvas tienen como función suavizar los cambios de las pendientes en el alineamiento.

4.1.2.1 Pendiente máxima y mínima en curvas verticales

Las pendientes en las carreteras son de gran impacto en la operación de los vehículos que operan en ella. De esta manera, obliga a que los vehículos pesados y livianos transiten a las velocidades establecidas para estas calles, tal como lo indica el SIECA, 2011.

De esta forma, se establece una pendiente mínima de 5%, la cual permite un drenaje adecuado sobre la superficie de ruedo y cunetas. Para la pendiente máxima, se establece, según la tabla 22, con un valor de 11%, usando ese valor en los criterios de diseño geométrico en el programa AutoCAD CIVIL 3D.

4.1.2.2 Curvas verticales

Para las curvas verticales, es importante definir las en dos tipos: cóncavas y convexas. Definiendo qué tipo de curva son, en estas calles, se procedió a verificar que cumplan con los factores mínimos de K, según lo indica la norma AASHTO 93.

Para efectos de estas calles, es importante indicar que no llevan propuesta de criterios de adelantamiento, pues las tres calles contarán con línea del centro continua de color amarillo, lo cual indica que se prohíbe el adelantamiento.

Teniendo en cuenta la velocidad de diseño de 40km/h, el valor mínimo de K en cresta es de 4 según lo indica la tabla 23. Para el valor mínimo k de columpio, es de 9 como se puede ver en la tabla 24.

A continuación, se muestran las tablas de cada calle y la curva vertical, con sus respectivos radios, estación, pendientes, pendiente, largo, tipos de curvas y valores de K.

Tabla 39. Elementos de curva verticales, calle Naranja

No.	Estación PVI	Elevación PVI	Pendiente	Curva	Largo	Diseño K	Radio
1	0+000.00m	100.013m	3.91%				
2	0+042.69m	101.683m	3.91%	Columpio	8.580m	9.000	900.000m
3	0+106.01m	104.764m	4.87%	Cresta	33.706m	4169.796	416979.590m
4	0+258.97m	112.194m	4.86%	Columpio	23.098m	26.783	2678.336m
5	0+331.53m	115.092m	3.99%	Cresta	67.323m	9.018	901.809m
6	0+417.61m	112.104m	-3.47%	Columpio	64.091m	10.296	1029.621m
7	0+496.12m	114.266m	2.75%				

Tabla 40. Elementos de curvas verticales, calle La Saca

No.	Estación PVI	Elevación PVI	Pendiente	Curva	Largo	Diseño K	Radio
1	0+000.00m	100.270m	7.81%				
2	0+020.00m	101.832m	7.81%	Columpio	19.419m	10.077	1007.740m
3	0+050.00m	104.753m	9.74%	Cresta	27.574m	4.885	488.471m
4	0+122.15m	107.706m	4.09%	Columpio	38.960m	16.650	1664.968m
5	0+220.00m	114.000m	6.43%	Columpio	150.000m	47.745	4774.470m
6	0+370.00m	128.361m	9.57%	Columpio	85.396m	88.596	8859.625m
7	0+506.39m	142.735m	10.54%	Columpio	150.000m	1732.842	173284.192m
8	0+682.13m	161.406m	10.62%	Columpio	108.177m	393.007	39300.709m
9	0+769.02m	170.877m	10.90%	Cresta	21.975m	16.052	1605.203m
10	0+801.05m	173.930m	9.53%				

Tabla 41. Elementos de curvas verticales, calle La Escuela

No.	Estación PVI	Elevación PVI	Pendiente	Curva	Largo	Diseño K	Radio
1	0+000.00m	100.226m	3.71%				
2	0+043.36m	101.834m	3.71%	Columpio	49.981m	9.946	994.593m
3	0+175.00m	113.328m	8.73%	Cresta	127.905m	36.092	3609.171m
4	0+317.99m	120.746m	5.19%	Cresta	74.241m	40.897	4089.698m
5	0+433.79m	124.652m	3.37%	Columpio	109.828m	18.747	1874.738m
6	0+523.16m	132.902m	9.23%	Cresta	30.731m	5.446	544.572m
7	0+597.63m	135.573m	3.59%	Cresta	59.497m	7.054	705.412m
8	0+636.12m	133.708m	-4.85%	Columpio	13.165m	9.136	913.586m
9	0+647.88m	133.308m	-3.41%				

Fuente: Elaboración propia de la investigadora para efectos del presente trabajo investigativo

4.1.3 Dimensiones del carril

Debido que se cuenta con tres tipos de calles diferentes, se hicieron diseños similares, ya que las características de la zona variaban un poco, como es el caso de calle Naranja. Esta calle cuenta con el espacio para diseñar la calzada con las dimensiones requeridas y se propone un ancho de carril de 3 m. Además, se mejora incorporando en el diseño aceras y cordón de caño en sectores donde no se cuenta con ninguno de estos elementos.

Por otro lado, están calle La Saca y calle La Escuela, en las cuales, debido a las particularidades de la zona donde se encuentran y el terreno, se propone un ancho de carril de 2.75 metros, ya que también el espacio no permite extender más ancho del carril. Además, se debe tener en cuenta las canalizaciones de agua, como es el caso de cunetas o cordón de caño y de las aceras de ser necesario.

Según el manual del SIECA, (2011) el ancho del carril generalmente anda entre los valores es de 2.75 m a 3.6 m, donde siempre es recomendable usar 3.6 m en carreteras de dos carriles, debido a las condiciones óptimas de circulación. Sin embargo, menciona que se puede utilizar anchos menores, siempre y cuando ese ancho no sea menor a 2.75 m, ya que se ve comprometido hacer un análisis de la vía y considerar cambiar los dos carriles a un carril.

4.2 Análisis del diseño de pavimentos

El diseño de pavimento se resolvió con la metodología AASHTO 93, la cual es la que se utiliza en Costa Rica. Esta norma tiene los requerimientos mínimos y máximos, por tanto, se debe tener todo diseño de estructura de pavimentos flexible.

4.2.1 Tránsito Promedio Diario (TPD)

Se realizó una serie de conteos vehiculares en cada calle, con el fin de obtener los datos reales de la distribución y composición vehicular. Colocándose en puntos estratégicos, durante esta etapa, los conteos se realizan desde las 6:30 a.m. a 9:00 a.m. y desde 4:00 p.m. a 6:30 p.m., por tres días durante las semanas de febrero de 2021.

Esta recolección de datos busca hacer un registro de la cantidad de vehículos que transitan según su cantidad de ejes.

En las siguientes tablas, se encuentra la sumatoria del conteo vehicular de cada calle, la cual se procede a introducir en la ecuación 10 para obtener el TPD (para más detalle del conteo vehicular, ver anexo C).

Tabla 42. Conteo vehicular, calle Naranjo

Dia / Vehículo	Livianos	Pick UP	C2+ Eje simple	C2 Eje doble	C3 Eje Tandem	C2 Bus	Moto	T3 S2	TOTAL
LUNES	501	61	23	35	5	26	44	3	698
MARTES	452	54	23	15	3	25	69	3	644
JUEVES	378	48	15	30	1	25	31	2	530
TOTAL	1331	163	61	80	9	76	144	8	1728

Tabla 43. Conteo vehicular, calle La Saca

Dia / Vehículo	Livianos	Pick UP	C2+ Eje simple	C2 Eje doble	C3 Eje Tandem	C2 Bus	Moto	T3 S2	TOTAL
LUNES	279	17	4	2	0	7	50	0	359
MARTES	281	13	1	1	0	7	48	0	351
JUEVES	253	24	3	2	0	7	54	0	343
TOTAL	813	54	8	5	0	21	152	0	901

Tabla 44. Conteo vehicular, calle La Escuela

Día / Vehículo	Livianos	Pick UP	C2+ Eje Simple	C2 Eje Doble	C3 Eje Tandem	C2 Bus	Moto	T3 S2	TOTAL
LUNES	511	56	16	3	0	0	76	0	662
MARTES	456	19	5	9	0	0	29	0	518
JUEVES	540	58	6	9	0	0	55	0	668
TOTAL	1507	133	27	21	0	0	160	0	1688

En calle Naranjo y en calle La Saca, se puede ver un mayor aforo vehicular los lunes, según lo indica la tabla 42 y la tabla 43. No obstante, en la tabla 44, que es calle La Escuela, se presenta un mayor aforo vehicular el jueves, por lo tanto, se toma la decisión de elegir el mayor dato de esos tres días en cada calle.

Una vez obtenida la cantidad de vehículos que transitan durante las horas y los días de estudio, se debe extender a 24 horas por medio de un factor de expansión que menciona el MOPT en el manual de especificaciones para una red cantonal. No obstante, se utiliza un valor recomendado por el profesional Ing. Carlos Solís Molina de 15, obteniendo como resultado de la tabla 45:

Tabla 45. Resultados de TPD de cada calle, con un factor horario de 15

CALLE	TPD
C. Naranjo	1962
C. La Saca	927
C. La Escuela	1839

Tabla 46. Resultados de TPD de casa calle, con factor de 30,76.

CALLE	TPD
C. Naranjo	4023
C. La Saca	1901
C. La Escuela	3771

Por otro lado, se hizo el cálculo del TPD como se muestra en la tabla 46, con los factores horarios del Anuario de Información de Tránsito. Una vez hechos ambos cálculos, se procedió a hacer una comparación y se decide usar los TPD con el factor horario de 15, ya que los del anuario utilizan los factores para rutas nacionales en los cuales el conteo vehicular es mucho mayor. Cabe

mencionar también que estos factores horarios son tomados de la estación más cercana: San Pablo de Heredia.

4.2.2 Ejes Equivalentes (ESAL'S)

Para la estimación de los ejes equivalentes, se establece un periodo de 20 años, considerando la tabla 27, donde se recomiendan periodos de diseño para los distintos tipos de carreteras. Posteriormente, la tasa de crecimiento es de un 4%, el cual es un dato brindado por la Municipalidad de San Rafael de Heredia.

Por otro lado, el factor de distribución por carril es de 0.5, ya que el TPD se realizó en ambos sentidos. También, para el factor de distribución por carril, se basó con la tabla 29, según la cantidad de carriles. De mismo modo, para el factor camión, se utilizan los datos establecidos por el MOPT, según la tabla 30.

Una vez obtenidos todos los datos mencionados anteriormente, se procede a aplicar la ecuación 12 para calcular la tasa de crecimiento total para la cantidad de años de diseño. Seguidamente, se calculan los ESAL'S mediante la ecuación 11, teniendo como resultado la tabla 47 (ver detalle en anexo D).

Tabla 47. Resultados de ESAL'S de cada calle

CALLE	ESAL'S
C. Naranjo	1660984,8
C. La Saca	318397,82
C. La Escuela	149881,06

4.2.3 Estudio del suelo

Los estudios brindados por la Municipalidad de San Rafael de Heredia determinan la subrasante de cada calle por medio de una serie de valores de CBR, los cuales se presentan en la siguiente tabla. No obstante, en el anexo G, se puede ver el informe de CACISA.

Tabla 48. CBR de las subrasantes

CALLE	CBR
C. Naranjo	8,8
C. La Saca	8
C. La Escuela	5,7

Cabe mencionar que estos valores de la tabla 48 son únicamente de la subrasante, por lo tanto, se hace un diseño de pavimento flexible completamente nuevo.

4.2.4 Módulo de resiliencia de la subrasante

De los resultados del CBR dados por la municipalidad correspondientes a cada calle, se establece un módulo de resiliencia de la subrasante, en la cual se utiliza la fórmula de correlaciones establecida por AASHTO 93, donde indica dicho Módulo y queda a criterio del diseñador utilizar un CBR promedio en caso de tener más de un CBR. Seguidamente, en la tabla 49, se presenta el módulo resiliente de la subrasante que dio para cada calle.

Tabla 49. Módulo resiliente de la subrasante de cada calle

CALLE	Mr (Psi)
C. Naranjo	10277
C. La Saca	9669
C. La Escuela	7783

El dato del módulo de resiliencia de las capas de mezcla de asfalto, la base granular y de la subbase granular serán tomados de los valores estándares dados por el Ing. Carlos Solís Molina, profesor de la Universidad Latina de Costa Rica. En la siguiente tabla, se observan los valores de cada capa.

Tabla 50. Módulo resiliente de las distintas capas

Propiedades de los materiales	Datos
1- Módulo resiliencia de capa asfáltica (Psi)	450000
2- Módulo de resiliencia de base granular (Psi)	28500
3- Módulo de resiliencia de subbase (Psi)	15000

4.2.5 Números estructurales

Para obtener los números estructurales, se debe tener una serie de datos generales, los cuales caracterizan a los materiales y son de gran importancia para el diseño de la estructura de pavimento flexible. En la siguiente tabla, se muestran esos datos, los cuales se elaboraron para cada calle.

Tabla 51. Variables de diseño, calle Naranjo

Características de la subrasante	Datos
1- Número total de ejes equivalentes (W18)	1660985
2- Factor de confiabilidad (R)	80
3- Desviación normal estándar (Zr)	-0,841
4-Desviación estándar (So)	0,45
5- Serviciabilidad inicial (Pi)	4,2

Características de la subrasante	Datos
6- Serviciabilidad final (Pt)	2,0
7- Periodo de diseño (años)	20
8- Índice de servicio (Δ PSI)	2,2
Coefficientes estructurales de las capas	
1- MAC (a1)	0,44
2- Base granular (a2)	0,133
3- Subbase (a3)	0,103
Coeficiente de drenaje	
1- Base granular (m2)	0,8
2- Subbase (m3)	0,8

Tabla 52. Variables de diseño, calle La Saca

Características de la Subrasante	Datos
1- Número total de ejes equivalentes (W18)	318398
2- Factor de confiabilidad (R)	80
3- Desviación normal estándar (Zr)	-0,841
4-Desviación estándar (So)	0,45
5- Serviciabilidad inicial (Pi)	4,2
6- Serviciabilidad final (Pt)	2,0
7- Periodo de diseño (años)	20
8- Índice de servicio (Δ PSI)	2,2
Coefficientes estructurales de las capas	
1- MAC (a1)	0,44
2- Base granular (a2)	0,133
3- Subbase (a3)	0,103
Coeficiente de drenaje	
1- Base granular (m2)	0,8
2- Subbase (m3)	0,8

Tabla 53. Variables de diseño, calle La Escuela

Características de la subrasante	Datos
1- Número total de ejes equivalentes (W18)	149881
2- Factor de confiabilidad (R)	80
3- Desviación normal estándar (Zr)	-0,841
4-Desviacion estándar (So)	0,45
5- Serviciabilidad inicial (Pi)	4,2
6- Serviciabilidad final (Pt)	2,0
7- Periodo de diseño (años)	20
8- Índice de servicio (Δ PSI)	2,2

Coefficientes estructurales de las capas	Datos
1- MAC (a1)	0,44
2- Base granular (a2)	0,133
3- Subbase (a3)	0,103
Coefficiente de drenaje	
1- Base granular (m2)	0,8
2- Subbase (m3)	0,8

Posteriormente, al tener estas variables de diseño, son incorporados al programa AASHTO 93, donde se obtienen los números estructurales, como se puede ver en tabla 54 (ver más detalle en el anexo E).

Tabla 54. Resultado de SN de cada calle

Número Estructural	Calle Naranjo	Calle La Saca	Calle La Escuela
Número Estructural Total (SNt)	3,00	2,38	2,29
Número Estructural MAC (SN1)	0,54	0,30	0,20
Número Estructural Base Granular (SN2)	2,07	1,57	1,37
Número Estructural Sub-Base (SN3)	2,63	2,02	1,78

4.2.6 Diseño de espesores

Con base en los cálculos anteriores, se determinó el número estructural por medio del programa AASHTO y se procedió al diseño de los espesores, aplicando las ecuaciones 13,14,15,16,17 y 18, las cuales se encuentran en el marco metodológico. Una vez empleadas las ecuaciones, cuando se obtiene el espesor (D fórmula), se procede a comparar con los espesores de teóricos, que se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 55. Espesores de la estructura de pavimento, calle Naranjo

Material	D teórico (in)	D propuesto(in)	D (cm)	SN*	D fórmula
Mezcla asfáltica caliente	3	6	15	2.64	1.23
Base granular	6	8	20	0,85	5.36
Subbase	6	8	20	0,66	5.45

Tabla 56. Espesores de la estructura de pavimento, calle La Saca

Material	D teórico (in)	D propuesto(in)	D (cm)	SN*	D fórmula
Mezcla asfáltica caliente	3	3	8	1,32	0,68
Base granular	6	6	15	0,64	2,35
Subbase	6	6	15	0,49	0,75

Tabla 57. Espesor de la estructura de pavimento, calle La Escuela

Material	D teórico (in)	D propuesto(in)	D (cm)	SN*	D fórmula
Mezcla asfáltica caliente	3	3	8	1,32	0,45
Base granular	6	6	15	0,64	0,47
subbase	6	6	15	0,49	2.17

No obstante, para la determinación de los espesores de cada capa, se consideraron los valores mínimos recomendados por AASHTO 93, tal como lo indica la tabla 33.

4.2.7 Fallas del pavimento

Para determinar la falla en el pavimento, es necesario del uso de la herramienta Pitra Pave, en la cual se establece un modelo de cada capa donde se determinan las deformaciones críticas en el asfalto. De tal forma, corresponde a la deformación por tensión y por compresión.

Del mismo modo, en la siguiente figura, se observan dichas deformaciones, donde se toman ciertos valores y se procede a la ejecución del diseño del pavimento.

Figura 35. Deformación del pavimento

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	3,0298e-04	2,1401e-04	-6,8350e-05	-3,2690e-20	1,3182e-35	7,1759e-20
2	2,6618e-04	5,5647e-07	-1,1982e-04	-6,5060e-20	2,4179e-35	0,0000e+00
3	-2,8526e-04	-2,0450e-04	2,4394e-04	2,9668e-20	-2,3870e-21	-1,2994e-05
4	-2,3660e-04	3,8474e-05	1,0636e-04	6,7374e-20	-3,3778e-21	0,0000e+00
5	-9,3171e-05	-7,6708e-05	2,3183e-04	6,0484e-21	-1,7657e-20	-9,6121e-05
6	-9,7553e-05	-8,6955e-05	2,4904e-04	2,5959e-21	-7,5977e-21	0,0000e+00

Fuente: PITRA PAVE, 2021

Para las tres calles del proyecto, fue necesario el uso del programa PITRA PAVE, ya que se obtuvieron las deformaciones (ver más detalle anexo F).

4.2.7.1 Deformaciones por fatiga

De los datos adquiridos del programa Pitra Pave, se usaron para las fallas, en este caso, se usó la deformación por tensión. En la tabla 58, se pueden observar los resultados obtenidos en el número de repeticiones de carga para la falla por fatiga (Nf) en cada calle:

Tabla 58. Resultados de falla por fatiga

Capacidad de carga por fatiga de la carpeta asfáltica	Calle Naranjo	Calle La Saca	Calle La Escuela
N° de carga para la falla por fatiga (Nf)	5128520	944711	914820

Una vez obtenidos los Nf por medio de la ecuación 19, se procede a utilizar la Ley de Miner, que representa la ecuación 23, la cual permite estimar el daño en función de las cargas estimadas en el periodo de diseño del proyecto, el cual es de 20 años. No obstante, en la siguiente tabla, se encuentran los resultados de los daños de cada calle y en el anexo I se pueden ver las gráficas:

Tabla 59. Resultado de daños acumulados de cada calle

CALLE	Daño %
C. Naranjo	31,9%
C. La Saca	33,3%
C. La Escuela	17,7%

Después de conocer el nivel de deterioro para el periodo diseñado, se procedió a aplicar la ecuación 24 para obtener la estimación del porcentaje de área agrietada y determinar, con la tabla 34, si el pavimento cumple o no por fatiga. Tomando en cuenta lo indicado por el manual, no puede pasar el porcentaje especificado en la tabla 34, ya que, si este porcentaje sobrepasa, significa que el espesor de la capa asfáltica no es el adecuado para esa estructura de pavimento y el proyecto presentará agrietamiento por fatiga en un tiempo menor a lo que se diseñó.

Tabla 60. Resultado de agrietamiento por fatiga

CALLE	FC %
C. Naranjo	67,48
C. La Saca	61,97
C. La Escuela	40,63

En la tabla 60, se puede observar el resultado de agrietamiento por fatiga de cada calle. No obstante, si lo comparamos con el porcentaje que corresponde para determinar el área de agrietamiento ante la falla, se puede certificar que las tres calles están cumpliendo, ya que están por debajo del 75% de los ejes equivalentes, que concierne menor a los 3 millones (se puede ampliar más en el anexo I).

4.2.7.2 Falla por deformaciones permanentes

Para esta otra falla, es importante que la deformación anterior cumpla con el criterio, ya que ayuda verificando si el diseño de la capa de asfalto es el correcto. De no ser el adecuado, se procede a realizar una nueva propuesta de espesores.

En esta falla por deformación permanente, según el manual, se recomienda realizar una revisión por cada capa (mezcla asfáltica, materiales granulares y subrasante), con el objetivo de minimizar el ahuellamiento en los pavimentos. Para ello, corresponde la aplicación de las ecuaciones de la 25 a la 40 que se encuentran en el marco metodológico (ver más en anexo J).

En la siguiente tabla, se obtienen los resultados de ahuellamiento de cada capa de las respectivas calles, en las cuales se desarrollaron las ecuaciones de la 25 a la 40, llegando a estos resultados. Además, cabe mencionar que, en la siguiente tabla, se presenta la deformación de cada capa. Los resultados de dichas deformaciones se suman y se obtiene la deformación total:

Tabla 61. Resultados de falla por deformación permanente

Ahuellamiento	Calle Naranjo	Calle La Saca	Calle La Escuela
RD AC (in)=	0,09	0,10	0,06
RD GB (in) =	0,06	0,12	0,09
RD GSUB-B(in) =	0,06	0,10	0,07
RD SG (in) =	0,15	0,24	0,26
RD TOTAL =	0,36	0,55	0,48
RD TOTAL (mm) =	9,13	14,03	12,25

Una vez obtenidos los resultados de la deformación permanente, como se observa en la tabla 61, se procede a verificar los resultados con la tabla 35 que recomienda el manual. De igual forma que en el proceso de fallas por fatiga, se utiliza el dato que es menor a los 3 millones de ejes equivalentes y se obtiene un ahuellamiento permisible máximo de 25mm.

Verificando la tabla 61 con los datos del manual como se menciona anteriormente, se determina que cada calle cumple con el objetivo de ahuellamiento máxima, por lo tanto, se procede a establecer la estructura de pavimento.

4.3 Señalización vial

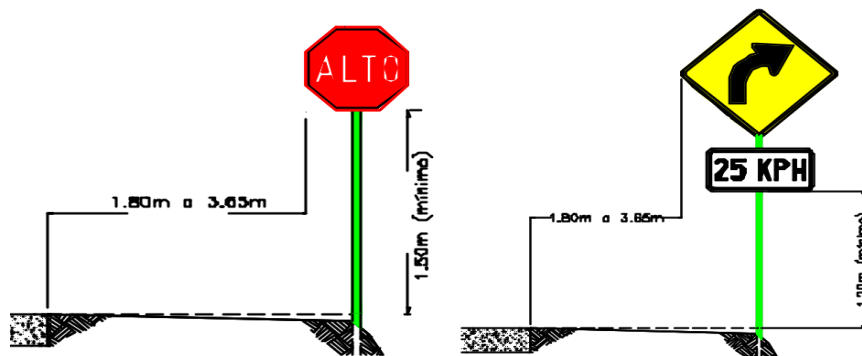
Para el diseño de los dispositivos de tránsito en las calles La Saca, Naranjo y La Escuela, se utiliza como referencia el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito (2014), dado que dichas carreteras no cuentan con la señalización adecuada o en puntos no cuentan con ningún dispositivo.

4.3.1 Señalización vertical

El manual mencionado anteriormente señala parámetros importantes como la colocación y las dimensiones de los dispositivos de tránsito. Así mismo, menciona las alturas mínimas en zonas rurales, las cuales se aplicaron en este diseño. En el caso de este proyecto, se debe tener una altura libre de 2 metros desde el borde de la superficie del pavimento hasta la parte inferior de la señal.

Por otro lado, cuando exista más de una señal en un poste, como es el caso de las señales de información, la placa debe quedar a no menos de 1.80 metros de altura sobre el borde del pavimento. En la siguiente figura, se pueden observar las dimensiones mínimas y máximas, las cuales aplican para este proyecto.

Figura 36. Dimensiones de los dispositivos verticales



Fuente: Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito, 2000

En las siguientes tablas, se presenta el tipo de dispositivo utilizado en el proyecto con su respectivo código. Además, se presenta el estacionamiento donde se encuentra y el sentido en que está.

Tabla 62. Señalamiento vertical calle Naranjo

Código de señal	Nombre de la señal	Estacionamiento	Sentido	
R-1-1	ALTO	0+002 - 0+473	San Rafael- La Suiza	La Suiza -San Rafael
R2-1	Velocidad máxima	0+450 - 0+020 0+295 - 0+160 0+135 - 0+330	San Rafael- La Suiza	La Suiza -San Rafael
P-1-2	Proximidad de una curva	- 0+290		La Suiza -San Rafael

Tabla 63. Señalamiento vertical, calle La Saca

Código de señal	Nombre de la señal	Estacionamiento	Sentido	
R-1-1	ALTO	0+002 - 0+799	calle Hernández - San Rafael	San Rafael- calle Hernández
R2-1	Velocidad máxima	0+770 - 0+625 0+510 - 0+333 0+245 - 0+010	calle Hernández - San Rafael	San Rafael- calle Hernández

Tabla 64. Señalamiento vertical, calle La Escuela

Código de señal	Nombre de la señal	Estacionamiento	Sentido	
R-1-1	ALTO	0+003 - 0+638	Calle Lobo - calle Hernández	Calle Hernández - calle Lobo
R-2-1	Velocidad máxima	0+670 - 0+380	Calle Lobo - calle Hernández	Calle Hernández - calle Lobo
E-1-2	Zona escolar a 100m	0+218 - 0+023	Calle Lobo - calle Hernández	Calle Hernández - calle Lobo
E-3-2	25 kph escolares presente	0+210 - 0+045	Calle Lobo - calle Hernández	Calle Hernández - calle Lobo

E-1-3	Cruce de escolares	0+130 - 0+110	Calle Lobo - calle Hernández	Calle Hernández - calle Lobo
-------	--------------------	---------------	------------------------------------	------------------------------------

4.3.2 Señalización horizontal

Para este proyecto y siguiendo las indicaciones del manual, se colocan líneas de borde del pavimento, las cuales deben ser blancas y continuas, en un rango de 0.10m a 0.15m de ancho. Además, las del centro serán de igual forma continuas y de color amarillo, ya que el proyecto es diseñado para no permitir adelantamiento, por lo tanto, se consideran líneas continuas. Dicho lo anterior, el manual indica que las líneas amarillas muestran que la vía es de doble sentido, y además prohíben el adelantamiento.

Seguidamente, en las tablas 68, 69 y 70, se muestra cada calle indicando la señalización horizontal, con su respectivo estacionamiento y el sentido como se encuentran los dispositivos horizontales que se hicieron en el proyecto. Esto resumiendo un poco lo que se presenta en los planos, los cuales serán entregados a la Municipalidad de San Rafael de Heredia y los ingenieros tomarán los análisis de diseño que se hicieron y las aplicarán en los presentes proyectos de mejoramiento de calles del cantón.

Tabla 65. Señales horizontales, calle Naranjo

Señal horizontal	Estacionamiento	Sentido	
Velocidad máxima	0+450 - 0+020 0+295 - 0+160 0+135 - 0+330	San Rafael- La Suiza	La Suiza -San Rafael
Línea blanca continua	0+000 - 0+475 0+475 - 0+000	San Rafael- La Suiza	La Suiza -San Rafael
Línea doble amarilla	0+000 - 0+475 0+475 - 0+001	San Rafael- La Suiza	La Suiza -San Rafael

Tabla 66. Señales horizontales, calle La Saca.

Señal horizontal	Estacionamiento	Sentido	
Velocidad máxima	0+770 - 0+625 0+510 - 0+333 0+245 - 0+010	calle Hernández - San Rafael	San Rafael- calle Hernández
Línea Blanca continua	0+000 - 0+801 0+801 - 0+000	calle Hernández - San Rafael	San Rafael- calle Hernández
Línea Doble amarilla	0+000 - 0+801 0+801 - 0+001	calle Hernández - San Rafael	San Rafael- calle Hernández

Tabla 67. Señales horizontales, calle La Escuela

Señal horizontal	Estacionamiento	Sentido	
Velocidad máxima	0+670 - 0+380	calle Lobo - calle Hernández	calle Hernández - calle Lobo
Línea Blanca continua	0+000 - 0+637 0+637 - 0+000	calle Lobo - calle Hernández	calle Hernández - calle Lobo
Línea Doble amarilla	0+000 - 0+637 0+637 - 0+001	calle Lobo - calle Hernández	calle Hernández - calle Lobo
Letrero de Escuela	0+218 - 0+023 0+121 - 0+015	calle Lobo - calle Hernández	calle Hernández - calle Lobo
Paso Peatonal	0+118 - 0+118	calle Lobo - calle Hernández	calle Hernández - calle Lobo

Fuente: Elaboración propia de la investigadora para efectos del presente trabajo investigativo

Cabe destacar que, para este proyecto, calle La Escuela es la única que cuenta con presencia de la Escuela de calle Hernández, por lo tanto, corresponde colocar dispositivos de zona escolar como se puede observar en la tabla 70. Calle Naranjo y calle La Saca no cuentan con presencia de escuelas en la zona, por lo cual solo se colocan los dispositivos necesarios como lo indica el manual.

Capítulo V: Propuesta

5.1 Estructura propuesta de pavimento

Analizando cada una de las características de los materiales que componen la estructura de pavimento propuesta mediante la implementación del Método AASHTO 93, a continuación, se presenta, en las tablas 62, 63 y 64, el resultado definitivo de los espesores correspondientes de cada capa con su respectiva calle para el diseño de la estructura. Estos espesores fueron los que resistieron las cargas establecidas en el transcurso de todo el proyecto. Cabe mencionar que se tuvieron que realizar varias propuestas, ya que, en ciertos casos, no cumplían con las deformaciones.

Tabla 68. Resultado de espesores, calle Naranja

Material	Espesor (cm)
Mezcla asfáltica caliente	15
Base granular	20
Subbase	20

Tabla 69. Resultado de espesores, calle La Saca

Material	Espesor (cm)
Mezcla asfáltica caliente	8
Base granular	15
Subbase	15

Tabla 70. Resultado de espesores, calle La Escuela

Material	Espesor (cm)
Mezcla asfáltica caliente	8
Base granular	15
Subbase	15

Conclusiones

1- En este proyecto de graduación, se desarrolló el diseño geométrico vertical y horizontal en las calles La Saca, Naranjo y La Escuela con base en lo estipulado en el Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA 2011). Lo más importante en el desarrollo de este diseño fue la implementación de la topografía en programa CIVIL 3D, ya que se contaba con una amplia gama de puntos topográficos que permitían ajustarse al espacio de las vías existentes y generar los alineamientos horizontales y verticales. No obstante, al mejorar el diseño geométrico, se vio obligado a ajustar el dimensionamiento de los carriles, pues no contaban con el ancho mínimo, tal como sucedió en calle La Saca y La Escuela. Por otro lado, fue de gran ayuda el manual SIECA 2011, porque permite seleccionar el tipo de carretera según sus condiciones y funciones. Además, una vez definido el tipo de vía, se establecieron las pendientes, los peraltes, las velocidades y el radio por medio de tablas. Sin embargo, en los casos de radio, peralte y el valor de K, el manual da un valor máximo o mínimo, el cual se procedió a verificar que cumpliera con el rango.

2- Se realizó el diseño de la señalización vertical y horizontal de las calles La Saca, Naranjo y La Escuela con base en lo estipulado en el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el control de tránsito (SIECA 2014). Lo más importante que se realizó en esta propuesta es la colocación de dispositivos de tránsito, tanto horizontales, como verticales, porque, en el caso de las calles La Saca y La Escuela, no cuentan con dichos dispositivos viales. Por lo tanto, se considera importante implementarlos en el diseño, no obstante, al mejorar estas carreteras, se debe hacer la señalización horizontal.

3- Se efectuó una nueva propuesta de diseño de pavimentos para las calles La Saca, Naranjo y La Escuela en el cantón de San Rafael de Heredia, con base en lo estipulado al AASHTO 1993. Para llegar a dicha propuesta, como se observa en el capítulo 4 del presente documento, se contó con las características de la subrasante, como es el caso de tener el CBR y el TPD, permitiendo calcular los espesores, los cuales fueron comparados con los indicados por el manual. No obstante, se puede concluir que estos espesores son únicamente para un diseño de pavimento nuevo, ya que se carece de información de las otras capas, por lo tanto, se tuvieron que usar módulos resilientes estándares.

4- Por otro lado, se generó el volumen de tránsito promedio en las calles La Saca, Naranjo y La Escuela por medio del TPD por tres días. Se llegaron a obtener los resultados mostrados en

el capítulo 4, ya que, para este proyecto, se utilizó la metodología del MOPT para calles con un volumen de tránsito muy bajo, es decir, calles cantonales. Por medio de los conteos vehiculares, se obtuvo la distribución de cada ruta, permitiendo mejorar la calzada en función del diseño geométrico y del diseño de la estructura del pavimento. Cabe mencionar que el conteo se realizó en puntos estratégicos. No obstante, en el mismo capítulo, se puede observar el TPD con los factores horario del anuario, los cuales no se utilizaron porque los valores son muy elevados, ya que son carreteras nacionales.

5- Finalmente, por medio del Manual de Recomendaciones Técnicas para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles con la Incorporación de Criterios Mecánicos- Empíricos (2014), se realizó comprobación de fallas en la estructura de pavimento. Fue fundamental aplicar esta metodología, pues, a través de ella, se pudo determinar que cada una de las capas era adecuada para las deformaciones por fatiga y para las deformaciones permanentes. Lo que más ayudó para la obtención de estos resultados fue la propuesta hecha, ya que, por medio de esta metodología, se comprobó que cumplen por ahuellamiento y por porcentaje de área agrietada ante la falla.

Recomendaciones

- 1- Se recomienda a la Municipalidad de San Rafael realizar un estudio de viabilidad de expropiación de propiedades en calle La Escuela para establecer un ancho de carril más amplio de 3 m, brindando más comodidad a los usuarios que transitan en ella. En caso de no ser posible esta ampliación, se debe hacer un análisis exhaustivo de qué tan viable es dejar un carril.
- 2- Se recomienda a la Municipalidad de San Rafael estar más anuente al estado actual de las calles del cantón con el objetivo de alargar la vida útil de éstas, estableciendo mantenimientos preventivos.
- 3- Se le recomienda a la Municipalidad de San Rafael realizar estudios que determinen el estado como se encuentran los materiales de la estructura del pavimento para determinar cuáles se pueden reutilizar en dicho proyecto constructivo.
- 4- Se recomienda en caso, de continuar este proyecto de graduación, generar un nuevo conteo vehicular donde la pandemia COVID-19 se considere más controlada o sea nula, ya que, para este diseño, el conteo se realizó con restricciones vehiculares.

- 5- En caso de continuar con este proyecto, se recomienda realizar más ensayos de DPC suelo para la obtención de CBR en distintos puntos, ya que, para este proyecto, se utilizó un único valor para cada calle.
- 6- En caso de continuar con el proyecto en la parte hidráulica, se recomienda realizar estudios de suelo.

Referencias bibliográficas

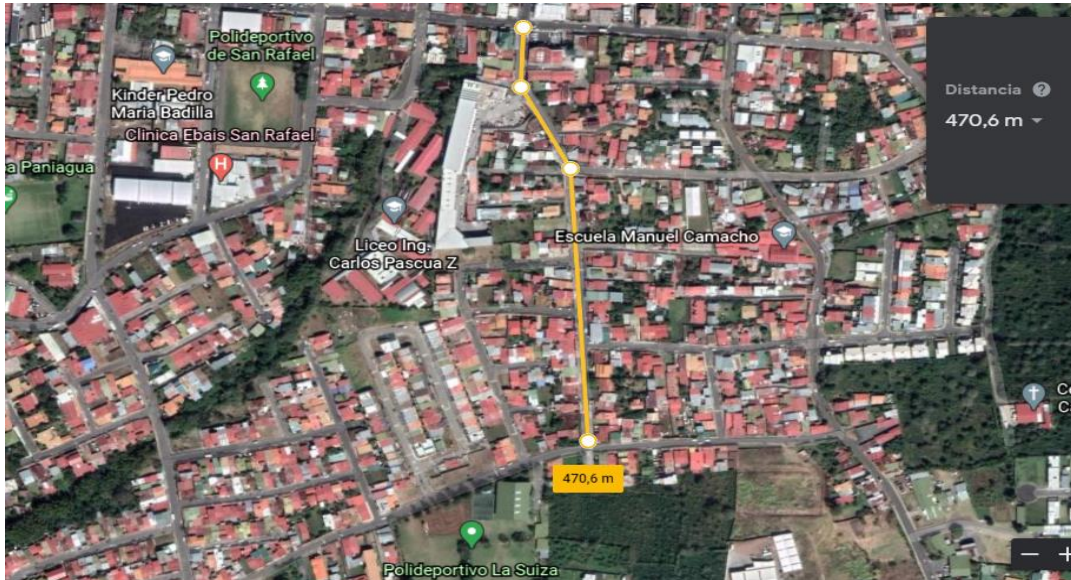
- AASHTO (1993). *Diseño de Pavimentos*. San Juan.
- Álvarez, P. y Londoño, N. (2019). *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajo, medio y altos volúmenes de tránsito*. Medellín: República de Colombia
- Arrivillaga, O. (2003). *DISEÑO DEL EMPEDRADO PARA LA CALLE PERIMETRAL Y PLAZA DEL CASCO URBANO, SAN MARTÍN JILOTEPEQUE, CHIMALTENANGO*. (Tesis no publicada). Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Bustillos, A. (2010). *Estudio exploratorio del efecto de la saturación en el ensayo de California Bearing Ratio (CBR) de campo y laboratorio en el diseño de estructura de pavimento*. (Proyecto final de graduación de licenciatura no publicado). Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Cárdenas Grisales, J. (2013). *Diseño Geométrico de Carreteras*. Bogotá: Andrea Sierra Gómez.
- Cal, R., Reyes Spindola, M., & Cárdenas Grisales, J. (2007). *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones*. México D.F: Alfaomega.
- Cazorla, A. (2010). *Metodología para la evaluación del pavimento flexible y propuesta*. (Tesis de Maestría no publicada). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría CUJEA.
- Cedeño, C. (2014). *PROPUESTA DE METODOLOGÍA COMPLEMENTARIA A LOS DISEÑOS DE PAVIMENTOS SEGÚN AASHTO 93*. (Tesis no publicada). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil).
- Corredor, M. (2008). *Diseño de Pavimento*. Guía de diseño AASTHO. Módulo III. Disponible en: <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/aashto-931.pdf>
- Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos. (1990). *Identificación de las fallas en pavimentos y técnicas de reparación (catálogo de falla)*. República Dominicana.
- Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: Miembro de la Cámara Nacional de la Industria.
- INVIAS (2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. Bogotá, Colombia.
- Lanamme UCR. (2016). “Desarrollo de curvas de deterioro para pavimento flexible y factor de incertidumbre”. *Revista Infraestructura Vial*, 31.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2015). *Manual de Especificaciones Generales para la Conservación de Caminos, Carreteras y Puentes*. San José: República de Costa Rica.

- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2016). *Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica*. San José: República de Costa Rica.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008). *Manual para el Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito*. Perú: MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotécnica y Pavimento*. Lima, Perú
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014). *Manual de Carreteras y Diseño Geométrico (DG-2014)*. Lima, Perú
- Rondón, Q. y Reyes, L. (2015). *Pavimentos: Materiales, Construcción y Diseño*. Bogotá, Colombia. Ecoe Ediciones.
- Sánchez, E. (2018). *DISEÑO DEFINITIVO DE LA CARRETERA LA PRIMAVERA - SIMÓN BOLÍVAR, DISTRITO DE NUEVA CAJAMARCA, PROVINCIA DE RIOJA, REGIÓN SAN MARTÍN*. (Tesis no aprobada). Universidad Señor de Sipán.
- Saravia, A. y Vejarano, F. (2019). *INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE POLICLORURO DE VINILO RECICLADO SOBRE LA COMPACTACIÓN, CAPACIDAD DE SOPORTE Y RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE UN MATERIAL GRANULAR PARA CAPA BASE DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA CARRETERA HUANCHACO – SANTIAGO DE CAO*. (Tesis de bachillerato no publicada). Universidad Nacional de Trujillo
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana (2002). *Manual Centroamericano para el Diseño de Pavimentos*. SIECA.
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2014). *Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito*. Guatemala: Proyecto Regional de Apoyo a la Integración Económica Centroamericana.
- SIECA (2011). *Manual Centroamericano de Nomas para el Diseño Geométrico de Carreteras*. México: Grupo Editorial Patria.
- Ureña, O. (2010). *Mejoramiento Geométrico de la Ruta Cantonal 041 comprendida entre Dulce Nombre y Paraíso de Cartago*. (Tesis de licenciatura no publicada). Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Anexos

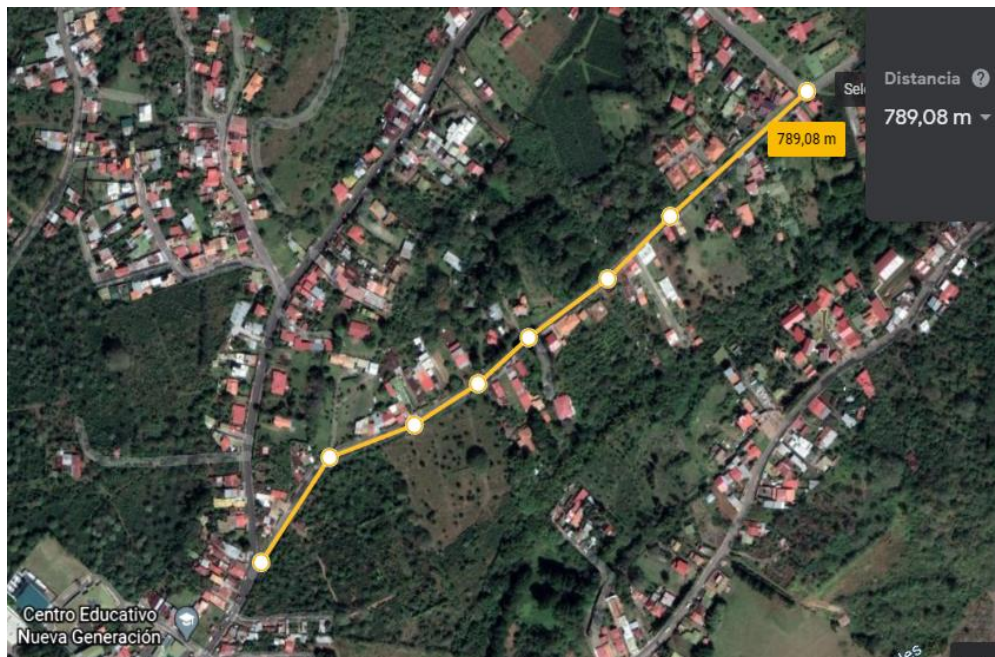
Anexo A. Ubicación del prediseño de las calles

Figura 37. Ubicación del prediseño calle Naranja.



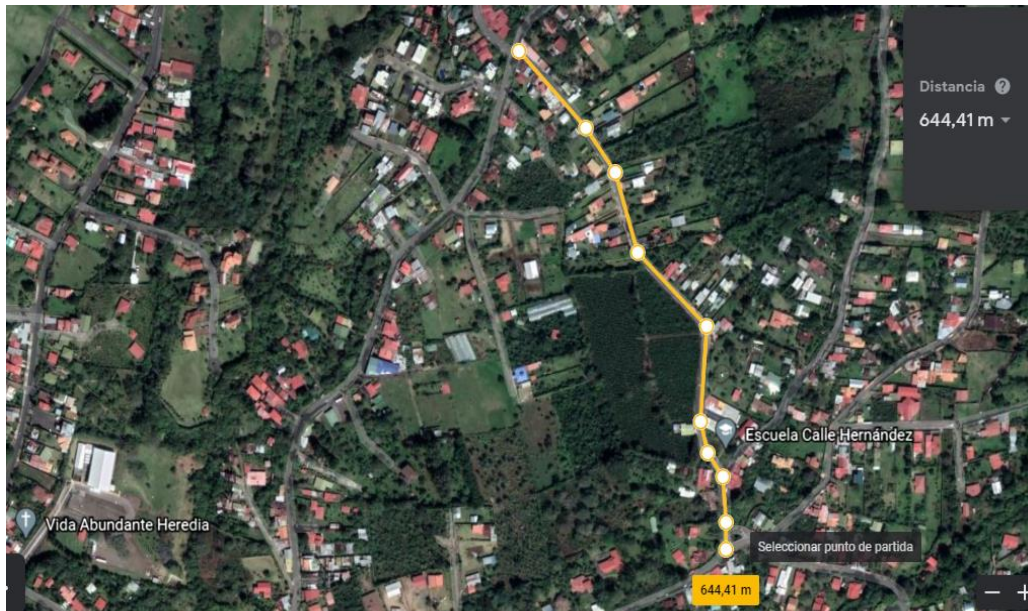
Fuentes: Google Earth

Figura 38. Ubicación del prediseño calle La Saca



Fuente: Google Earth

Figura 39. Ubicación del prediseño calle La Escuela



Fuente: Google Earth

Anexo B. Planos del diseño geométrico

Figura 40. Planta calle Naranjo

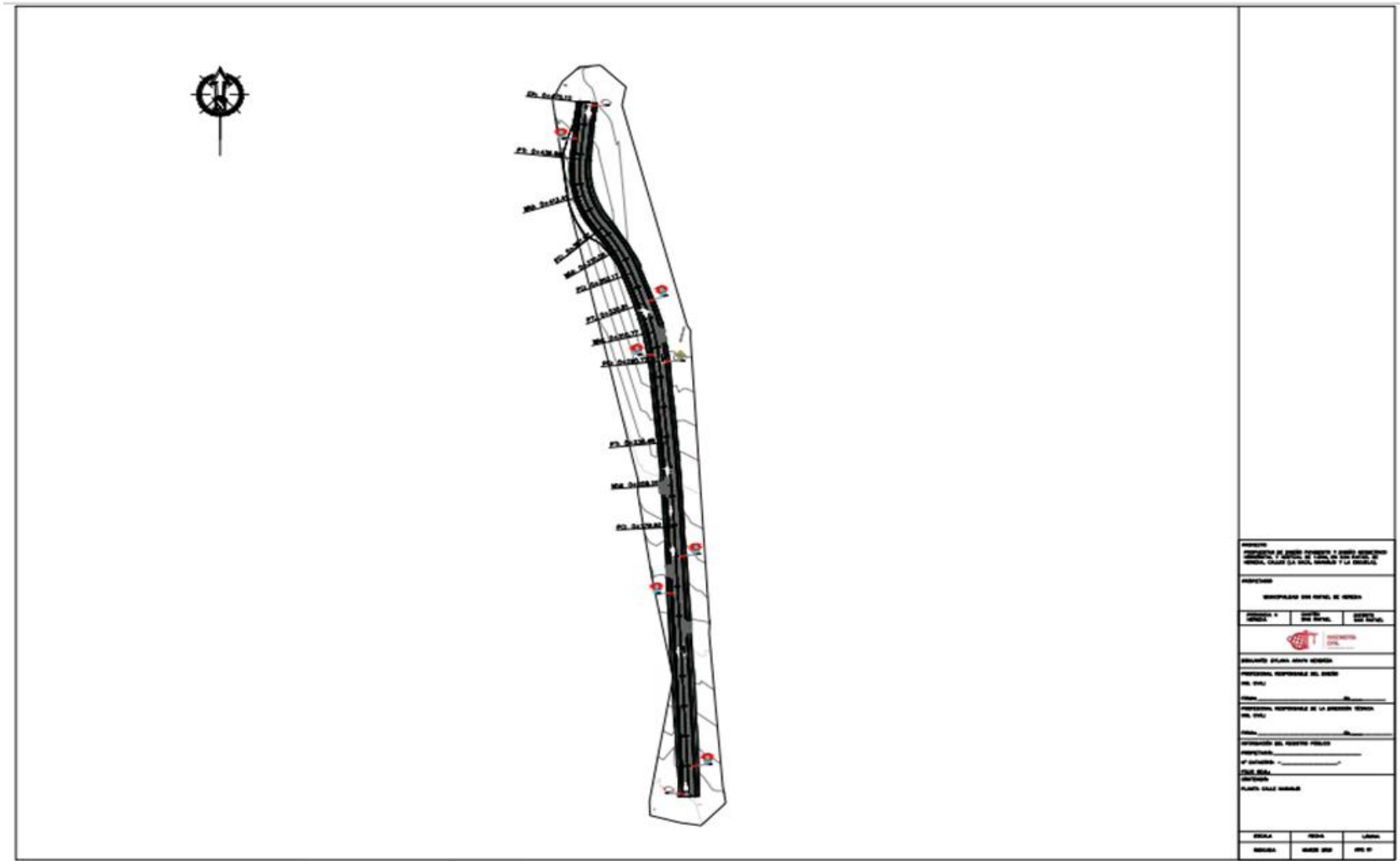


Figura 42. Planta calle La Escuela

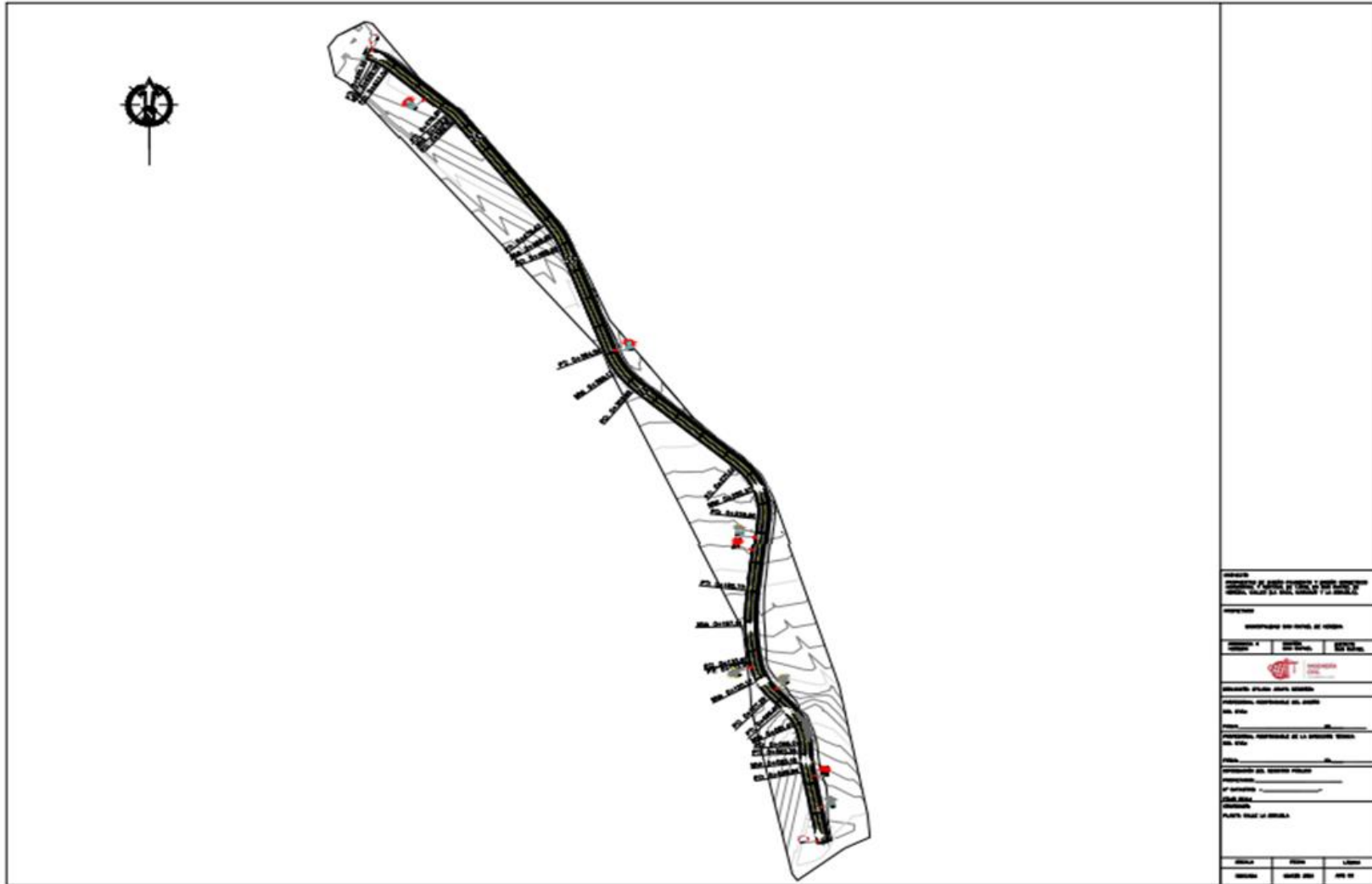


Figura 43. Tablas calle Naranja

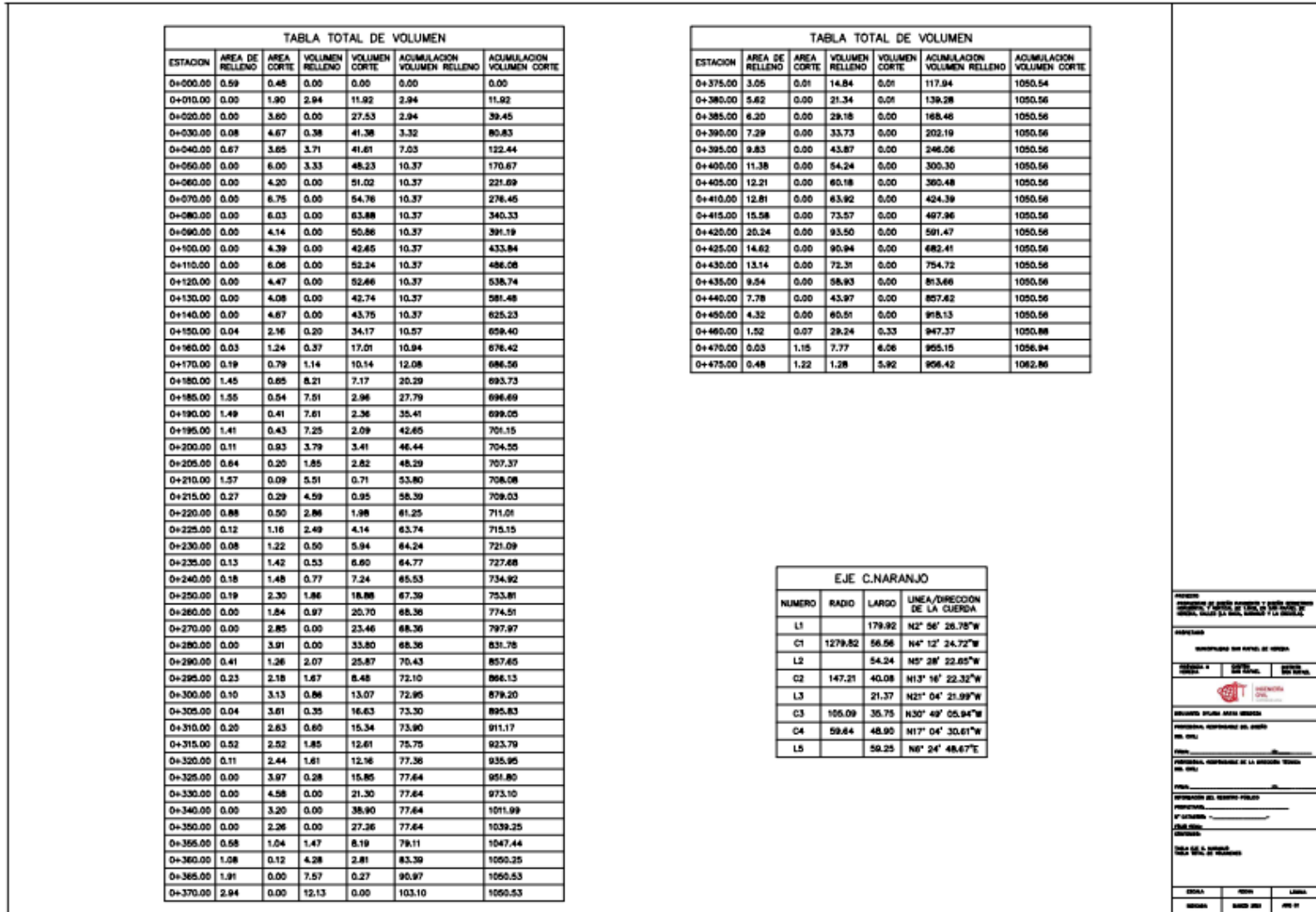


Figura 46. Perfil calle Naranjo

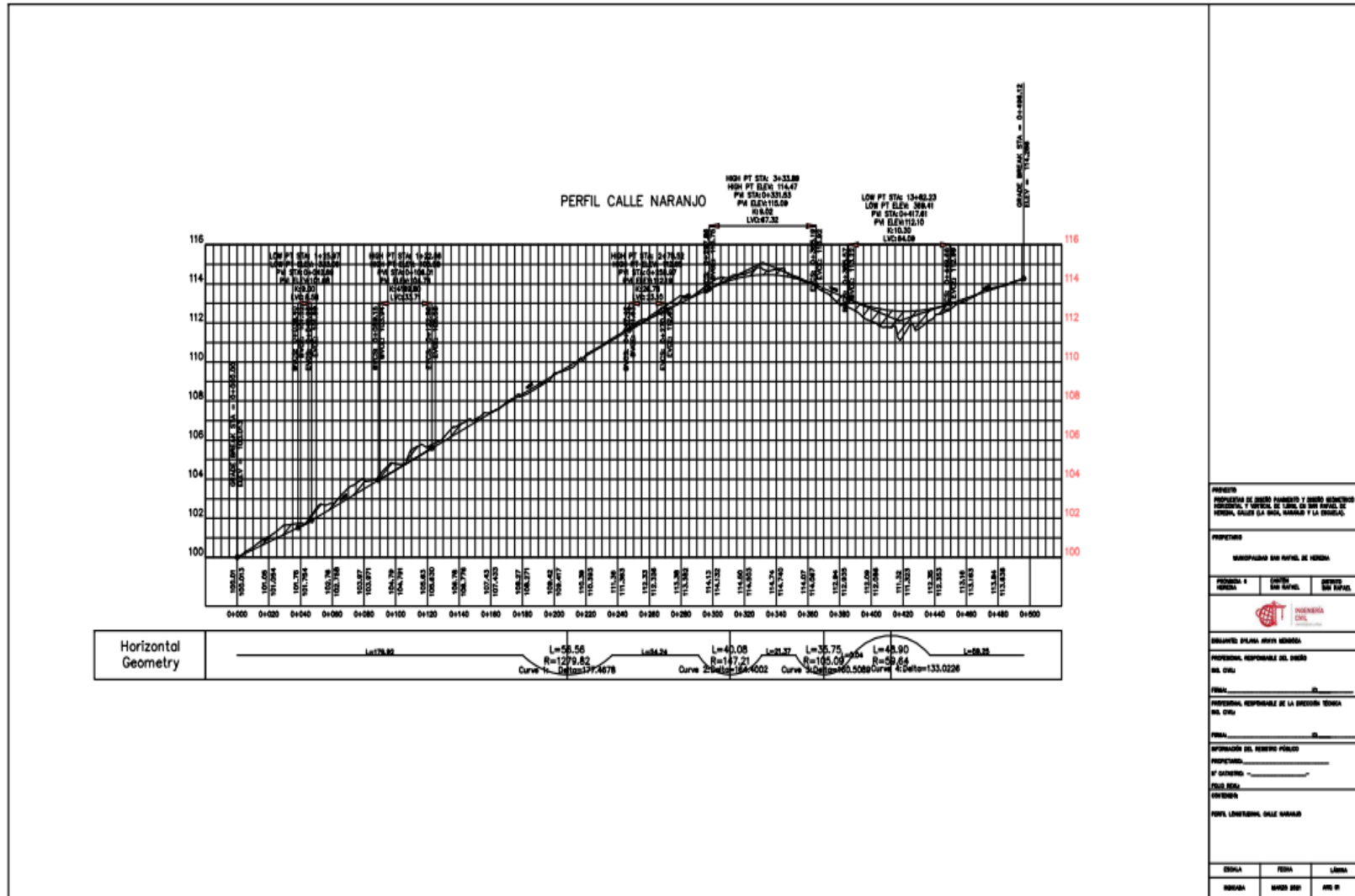
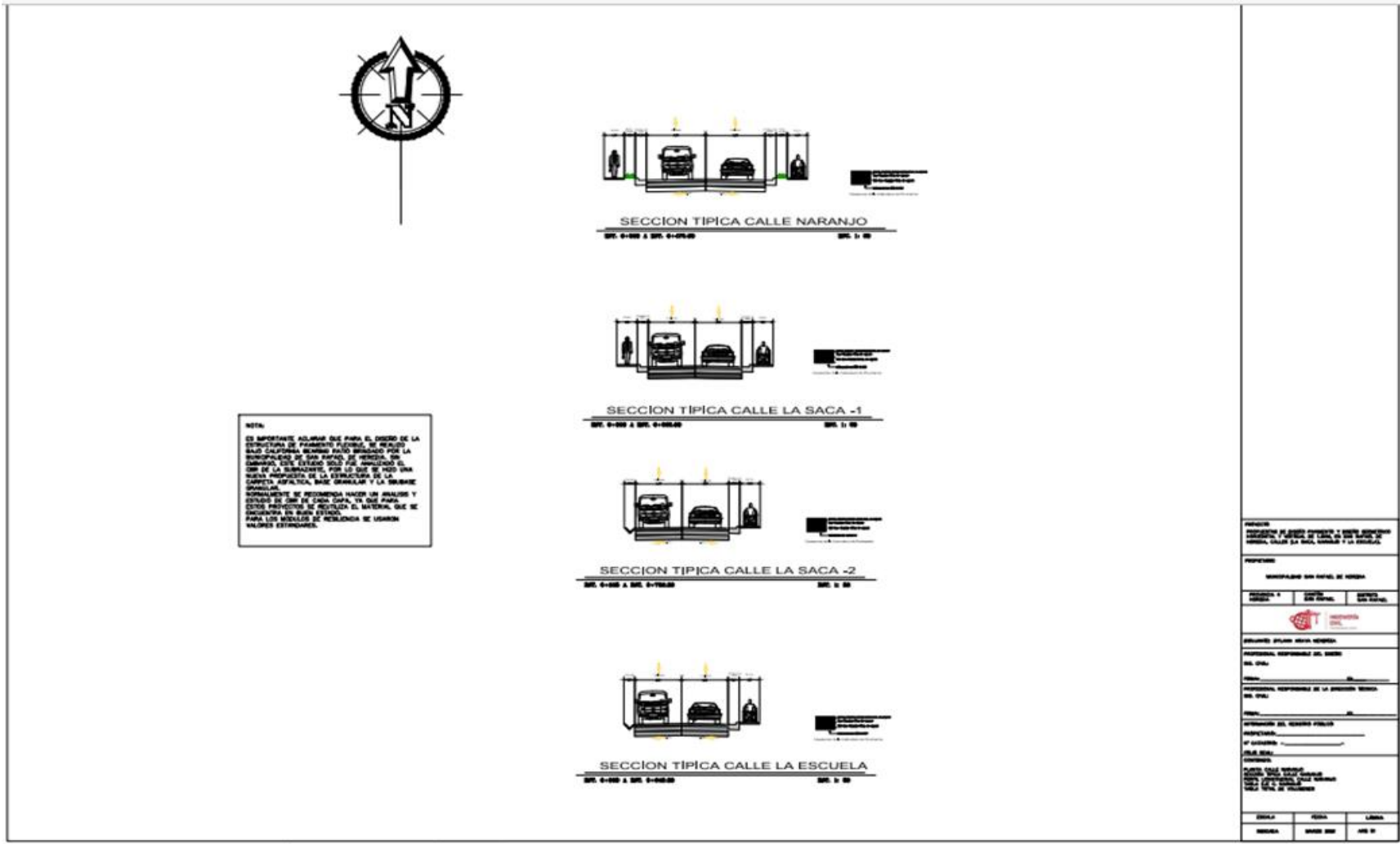


Figura 50. Secciones típicas TFG



Anexo C. Conteo vehicular por día y volumen de tránsito diario

Tabla 71. Conteo vehicular por día, calle Naranjo

Día / Vehículo	Livianos	Pick UP	C2+ Eje Simple	C2 Eje Doble	C3 Eje Tandem	C2 Bus	Moto	T3 S2
LUNES	207	39	14	23	5	13	16	2
MARTES	199	18	20	10	3	13	27	1
JUEVES	147	29	2	30	1	13	6	1

Día / Vehículo	Livianos	Pick UP	C2+ Eje Simple	C2 Eje Doble	C3 Eje Tandem	C2 Bus	Moto	T3 S2
LUNES	294	22	9	12	0	13	28	1
MARTES	253	36	3	5	0	12	42	2
JUEVES	231	19	13	0	0	12	25	1

Tabla 72. Conteo vehicular por día, calle La Saca

Día / Vehículo	Livianos	Pick UP	C2+ Eje Simple	C2 Eje Doble	C3 Eje Tandem	C2 Bus	Moto	T3 S2
LUNES	129	8	3	0	0	4	24	0
MARTES	105	5	1	1	0	4	15	0
JUEVES	114	11	1	0	0	4	32	0

Día / Vehículo	Livianos	Pick UP	C2+ Eje Simple	C2 Eje Doble	C3 Eje Tandem	C2 Bus	Moto	T3 S2
LUNES	150	9	1	2	0	3	26	0
MARTES	176	8	0	0	0	3	33	0
JUEVES	139	13	2	2	0	3	22	0

Tabla 73. Conteo vehicular por día, calle La Escuela.

Día / Vehículo	Livianos	Pick UP	C2+ Eje Simple	C2 Eje Doble	C3 Eje Tandem	C2 Bus	Moto	T3 S2
LUNES	222	37	16	2	0	0	28	0
MARTES	219	9	1	9	0	0	14	0
JUEVES	243	33	6	6	0	0	22	0

Día / Vehículo	Livianos	Pick UP	C2+ Eje Simple	C2 Eje Doble	C3 Eje Tandem	C2 Bus	Moto	T3 S2
LUNES	289	19	0	1	0	0	48	0
MARTES	237	10	4	0	0	0	15	0
JUEVES	297	25	0	3	0	0	33	0

Anexo D. Cálculo de ESAL'S de cada calle

Figura 51. ESAL'S, calle Naranja

Ejes Equivalentes (ESAL'S)	
TPD	1962,0
% Crecimiento r	4%
Periodo de Diseño y (años)	20
Gy	29,778

$$ESAL = TPD * T * Tf * GY * D * L * 365$$

$$GY = \frac{(1+r)^y - 1}{r}$$

Vehiculo	T	Tf
Livianos	0,770	0,005
Pick UP	0,094	0,020
C2+ Eje Simple	0,035	0,070
C2 Eje Doble	0,046	0,630
C3 Eje Tandem	0,005	1,280
C2 Bus	0,044	2,290
T3 S2	0,005	2,380

Vehiculo	TPD	T	Tf	Gy	D	L	365	TOTAL
Livianos	1962	0,770	0,005	29,778	0,50	1,00	365	41064,15
Pick UP	1962	0,094	0,020	29,778	0,50	1,00	365	20115,57
C2+ Eje Simple	1962	0,035	0,070	29,778	0,50	1,00	365	26347,7
C2 Eje Doble	1962	0,046	0,630	29,778	0,50	1,00	365	310989,2
C3 Eje Tandem	1962	0,005	1,280	29,778	0,50	1,00	365	71083,25
C2 Bus	1962	0,044	2,290	29,778	0,50	1,00	365	1073900
T3 S2	1962	0,005	2,380	29,778	0,50	1,00	365	117484,8

TOTAL ESAL 1660985

Figura 52. ESAL'S, calle La Saca

Ejes Equivalentes (ESAL'S)	
TPD	927
% Crecimiento r	4%
Periodo de Diseño y (años)	20
Gy	29,778

$$ESAL = TPD * T * Tf * GY * D * L * 365$$

$$GY = \frac{(1+r)^y - 1}{r}$$

Vehiculo	T	Tf
Livianos	0,902	0,005
Pick UP	0,060	0,020
C2+ Eje Simple	0,009	0,070
C2 Eje Doble	0,006	0,630
C3 Eje Tandem	0,000	1,280
C2 Bus	0,023	2,290
T3 S2	0,000	2,380

Vehiculo	TPD	T	Tf	Gy	D	L	365	TOTAL
Livianos	927	0,902	0,005	29,778	0,50	1,00	365	22728,72
Pick UP	927	0,060	0,020	29,778	0,50	1,00	365	6038,627
C2+ Eje Simple	927	0,009	0,070	29,778	0,50	1,00	365	3131,14
C2 Eje Doble	927	0,006	0,630	29,778	0,50	1,00	365	17612,66
C3 Eje Tandem	927	0,000	1,280	29,778	0,50	1,00	365	0
C2 Bus	927	0,023	2,290	29,778	0,50	1,00	365	268886,7
T3 S2	927	0,000	2,380	29,778	0,50	1,00	365	0

TOTAL ESAL 318398

Figura 53. ESAL'S, calle La Escuela

Ejes Equivalentes (ESAL'S)	
TPD	1839
% Crecimiento r	4%
Periodo de Diseño y (años)	20
Gy	29,778

$$ESAL = TPD * T * Tf * GY * D * L * 365$$

$$GY = \frac{(1+r)^y - 1}{r}$$

Vehiculo	T	Tf
Livianos	0,893	0,005
Pick UP	0,079	0,020
C2+ Eje Simple	0,016	0,070
C2 Eje Doble	0,012	0,630
C3 Eje Tandem	0,000	1,280
C2 Bus	0,000	2,290
T3 S2	0,000	2,380

Vehiculo	TPD	T	Tf	Gy	D	L	365	TOTAL
Livianos	1839	0,893	0,005	29,778	0,50	1,00	365	44612,04
Pick UP	1839	0,079	0,020	29,778	0,50	1,00	365	15748,91
C2+ Eje Simple	1839	0,016	0,070	29,778	0,50	1,00	365	11190,01
C2 Eje Doble	1839	0,012	0,630	29,778	0,50	1,00	365	78330,1
C3 Eje Tandem	1839	0,000	1,280	29,778	0,50	1,00	365	0
C2 Bus	1839	0,000	2,290	29,778	0,50	1,00	365	0
T3 S2	1839	0,000	2,380	29,778	0,50	1,00	365	0

TOTAL ESAL 149881

Anexo E. Número estructural por medio del programa AASHTO 93

Figura 54. Número estructural, calle Naranja

<p>Ecuación AASHTO 93</p> <p>Tipo de Pavimento <input checked="" type="radio"/> Pavimento flexible <input type="radio"/> Pavimento rígido</p> <p>Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So) 80% Zr=0.841 So 0.45</p> <p>Serviciabilidad inicial y final PSI inicial 4.2 PSI final 2</p> <p>Módulo resiliente de la subrasante Mr 10277 psi</p> <p>Información adicional para pavimentos rígidos Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J) Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)</p> <p>Tipo de Análisis <input checked="" type="radio"/> Calcular SN <input type="radio"/> Calcular W18</p> <p>W18 = 1660985</p> <p>Número Estructural SN = 3.00</p> <p>Calcular Salir</p>	<p>Ecuación AASHTO 93</p> <p>Tipo de Pavimento <input checked="" type="radio"/> Pavimento flexible <input type="radio"/> Pavimento rígido</p> <p>Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So) 80% Zr=0.841 So 0.45</p> <p>Serviciabilidad inicial y final PSI inicial 4.2 PSI final 2</p> <p>Módulo resiliente de la subrasante Mr 450000 psi</p> <p>Información adicional para pavimentos rígidos Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J) Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)</p> <p>Tipo de Análisis <input checked="" type="radio"/> Calcular SN <input type="radio"/> Calcular W18</p> <p>W18 = 1660985</p> <p>Número Estructural SN = 0.54</p> <p>Calcular Salir</p>
<p>Ecuación AASHTO 93</p> <p>Tipo de Pavimento <input checked="" type="radio"/> Pavimento flexible <input type="radio"/> Pavimento rígido</p> <p>Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So) 80% Zr=0.841 So 0.45</p> <p>Serviciabilidad inicial y final PSI inicial 4.2 PSI final 2</p> <p>Módulo resiliente de la subrasante Mr 28500 psi</p> <p>Información adicional para pavimentos rígidos Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J) Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)</p> <p>Tipo de Análisis <input checked="" type="radio"/> Calcular SN <input type="radio"/> Calcular W18</p> <p>W18 = 1660985</p> <p>Número Estructural SN = 2.07</p> <p>Calcular Salir</p>	<p>Ecuación AASHTO 93</p> <p>Tipo de Pavimento <input checked="" type="radio"/> Pavimento flexible <input type="radio"/> Pavimento rígido</p> <p>Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So) 80% Zr=0.841 So 0.45</p> <p>Serviciabilidad inicial y final PSI inicial 4.2 PSI final 2</p> <p>Módulo resiliente de la subrasante Mr 15000 psi</p> <p>Información adicional para pavimentos rígidos Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J) Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)</p> <p>Tipo de Análisis <input checked="" type="radio"/> Calcular SN <input type="radio"/> Calcular W18</p> <p>W18 = 1660985</p> <p>Número Estructural SN = 2.63</p> <p>Calcular Salir</p>

Figura 55. Número estructural, calle La Saca

The figure displays four instances of the 'Ecuación AASHTO 93' software interface, each showing a different set of input parameters for calculating the structural number (SN). The parameters are consistent across all instances, except for the subgrade resilient modulus (Mr) and the resulting SN value.

Mr (psi)	SN
9669	2.38
450000	0.30
28500	1.57
15000	2.02

Each window includes the following fields:

- Tipo de Pavimento:** Pavimento flexible, Pavimento rígido
- Confianza (R) y Desviación estándar (So):** 80% Zi=0.841, So = 0.45
- Serviciabilidad inicial y final:** PSI inicial = 4.2, PSI final = 2
- Módulo resiliente de la subrasante:** Mr = [value] psi
- Información adicional para pavimentos rígidos:**
 - Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi)
 - Módulo de rotura del concreto - Sc (psi)
 - Coefficiente de transmisión de carga - (J)
 - Coefficiente de drenaje - (Cd)
- Tipo de Análisis:** Calcular SN, Calcular W18
- Número Estructural:** SN = [value]

Figura 56. Número estructural, calle La Escuela

The figure displays four instances of the 'Ecuación AASHTO 93' software interface, each showing a different calculation for the structural number (SN) based on varying input parameters. All instances are for flexible pavement (Pavimento flexible) with a confidence level (So) of 0.45 and a traffic volume (W18) of 149881.

Subgrade Resilient Modulus (Mr) [psi]	Initial PSI	Final PSI	Resulting SN
7783	4.2	2	2.29
450000	4.2	2	0.20
28500	4.2	2	1.37
15000	4.2	2	1.78

Anexo F. Cálculos del software PITRA PAVE de cada calle

Figura 57. Resultados, calle Naranjo

ESPEORES CALLE NARAJ.O.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-2.5272e-06	3.4317e-05	-4.9683e-06	9.0242e-21	-1.3051e-20	0.0000e+00
2	-2.2874e-05	-2.2060e-05	1.1932e-04	9.9692e-23	1.7998e-21	2.9392e-05
3	-1.7810e-04	-2.3017e-05	1.0323e-04	3.7985e-20	-2.2423e-21	0.0000e+00
4	-1.9279e-04	-1.3337e-04	1.6181e-04	7.2767e-21	6.8226e-22	1.1142e-05
5	-1.5637e-04	-8.8757e-05	2.9929e-04	1.6560e-20	-2.2605e-20	0.0000e+00
6	-1.4839e-04	-1.0010e-04	3.0153e-04	5.9140e-21	9.4626e-21	1.5454e-04
7	-1.4020e-04	-1.1351e-04	2.9862e-04	6.5352e-21	-1.3356e-20	0.0000e+00
8	-1.3167e-04	-9.9010e-05	2.7359e-04	3.9996e-21	8.5459e-21	1.3956e-04
9	-1.2615e-04	-1.0780e-04	3.3478e-04	4.4960e-21	-1.1241e-20	0.0000e+00
10	-1.1949e-04	-9.4151e-05	3.1036e-04	3.1034e-21	8.0382e-21	1.3127e-04
11	-8.9612e-05	-8.0517e-05	2.4407e-04	2.2274e-21	-6.8461e-21	0.0000e+00
12	-8.6317e-05	-7.2270e-05	2.3032e-04	1.7203e-21	5.3697e-21	8.7694e-05

Figura 58. Resultados, calle La Saca

ESPEORES CALLE LA SACA.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	2.8368e-05	4.0629e-05	-1.7175e-05	3.0031e-21	-1.4438e-20	0.0000e+00
2	1.3638e-05	5.0590e-06	1.0779e-04	-1.0506e-21	7.9955e-22	1.3058e-05
3	-2.7027e-04	1.3361e-04	8.5119e-05	9.8924e-20	-5.0651e-21	0.0000e+00
4	-3.6769e-04	-2.8055e-04	3.3237e-04	1.0672e-20	9.5620e-22	1.5616e-05
5	-3.1735e-04	-5.5385e-05	5.0897e-04	6.4162e-20	-6.5672e-20	0.0000e+00
6	-3.2660e-04	-2.1311e-04	6.9557e-04	1.3899e-20	1.5925e-20	2.6007e-04
7	-3.2383e-04	-1.9258e-04	6.1225e-04	3.2147e-20	-4.4357e-20	0.0000e+00
8	-2.9954e-04	-1.8946e-04	5.7916e-04	1.3481e-20	1.9139e-20	3.1256e-04
9	-3.0003e-04	-2.0521e-04	7.3586e-04	2.3223e-20	-3.8485e-20	0.0000e+00
10	-2.7686e-04	-1.8161e-04	6.7243e-04	1.1618e-20	2.0203e-20	3.2995e-04
11	-1.8816e-04	-1.5147e-04	4.8919e-04	8.9861e-21	-1.9444e-20	0.0000e+00
12	-1.7586e-04	-1.2894e-04	4.4548e-04	5.7458e-21	1.2752e-20	2.0826e-04

Figura 59. Resultados, calle La Escuela

ESPEORES CALLE LA ESCUELA.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	3.1756e-05	4.3630e-05	-2.0039e-05	2.9084e-21	-1.4564e-20	0.0000e+00
2	1.6864e-05	7.7033e-06	1.0516e-04	-1.1219e-21	8.7966e-22	1.4366e-05
3	-2.7368e-04	1.3081e-04	8.7438e-05	9.9072e-20	-5.1733e-21	0.0000e+00
4	-3.7084e-04	-2.8283e-04	3.3440e-04	1.0779e-20	1.0273e-21	1.6777e-05
5	-3.2432e-04	-6.2573e-05	5.0762e-04	6.4109e-20	-6.7120e-20	0.0000e+00
6	-3.3333e-04	-2.1941e-04	6.9481e-04	1.3952e-20	1.6869e-20	2.7550e-04
7	-3.4660e-04	-2.1421e-04	6.2199e-04	3.2425e-20	-4.4841e-20	0.0000e+00
8	-3.2121e-04	-2.0797e-04	5.8839e-04	1.3868e-20	1.9382e-20	3.1652e-04
9	-3.4786e-04	-2.4205e-04	8.4157e-04	2.5916e-20	-4.3174e-20	0.0000e+00
10	-3.2137e-04	-2.1468e-04	7.7095e-04	1.3006e-20	2.2975e-20	3.7521e-04
11	-2.1717e-04	-1.7664e-04	5.5971e-04	9.9271e-21	-2.1747e-20	0.0000e+00
12	-2.0346e-04	-1.5131e-04	5.1173e-04	6.3868e-21	1.4405e-20	2.3526e-04

Anexo G. Informe de ensayos CBR

Figura 60. Informe de ensayo 1



INFORME DE ENSAYO

CR-LAB-SR-2020-6516
14 de mayo del 2020



IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE	
Empresa:	Municipalidad Sn Rafael de Heredia
Dirigido a:	Ing. Gustavo Barrantes
Dirección:	San Rafael, Heredia
Proyecto:	La Suiza, Los Ángeles y San Josecito


IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA Y DATOS DE CONTROL	
Fecha del muestreo:	20 de abril del 2020
Contenido:	Caracterización
Método de muestreo utilizado:	PT-LAB-07
Descripción de la muestra:	Subrasante
Procedencia de la muestra:	Sondeo 2, Frente a Panadería, Calle Naranjos
Lugar de realización de los ensayos:	LAB. CENTRAL
Fecha recepción de la muestra:	21 de abril del 2020
Fecha de ejecución del ensayo:	24 de abril del 2020 – 09 de mayo de 2020

Aclaraciones:

1. Los resultados que se presentan a continuación se refieren solo a las muestras ensayadas y/o pruebas realizadas y al momento y condiciones en que se realizaron los ensayos.
2. No se permite la reproducción parcial del Informe de Ensayos sin previa autorización escrita de CACISA.
3. El presente informe no es válido sin la firma de autorización respectiva.
4. Si la información o muestras son aportadas por el cliente, los resultados son únicamente aplicables a la muestra suministrada.
5. Siempre que se reporta la incertidumbre expandida, se declara como la incertidumbre estándar de la medición multiplicada por un factor de cobertura $k=2$ que corresponde a una probabilidad de cobertura aproximadamente del 95 %.
6. Cuando se requiera declarar la conformidad de los resultados, se tomará como regla de decisión lo siguiente: "si al menos un 50% del valor de la medición (resultado +/- incertidumbre) se encuentra entre lo especificado se da conformidad de aceptación, caso contrario se declara incumplimiento con la especificación". Cuando el cliente no la aporte, esta será la regla de decisión a utilizar.
7. Cualquier comentario acerca de nuestros servicios, favor enviarlo a calidad@cacisa.cr


Fuente: Elaboración propia de la investigadora para efectos del presente trabajo investigativo

Figura 61. Informe de ensayo 2

RESULTADOS					
Análisis Granulométrico del Agregado Fino y Grueso*					
Tamiz		% Pasando	Graduación		
			Superior	Inferior	Cumplimiento
N° 4	4,750	100	-	-	N/A
N° 10	2,000	99	-	-	N/A
N° 40	0,425	95	-	-	N/A
N° 200	0,075	81,9	-	-	N/A
Límites de Atterberg, AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)*					
Parámetro	Resultado	Especificación (Max.)	Incertidumbre (±)	Cumplimiento	
Límite líquido	55	---	0,049	N/A	
Índice plástico	21	---	0,3	N/A	
Densidad máxima seca y humedad óptima, método C (AASHTO T-99)*					
Densidad seca máxima, kg/m ³			1299		
Humedad óptima (%)			33,8		
Índice de soporte de California, AASHTO T-193 (ASTM D 1883) * (Los esfuerzos de compactación se definieron con 56, 28 y 14 golpes del mazo de Proctor)					
Parámetro	Resultado	Especificación CR-2010	Incertidumbre(±)	Cumplimiento	
CBR al 91% compactación	8,8	---	0,019	N/A	
Porcentaje de hinchamiento	0	---	0,044	N/A	
AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYOS					
					
Ing. Jorge Camacho Bermúdez Supervisor de Laboratorio					
cc: Archivo, JICB			Nulo sin sello blanco		

Fuente: Elaboración propia de la investigadora para efectos del presente trabajo investigativo

Figura 62. Informe de ensayo 3



CACISA
INGENIERÍA + EXPERENCIA + COMPROMISO

INFORME DE ENSAYO
CR-LAB-SR-2020-6545
14 de mayo del 2020



Laboratorio de Ensayo
Alcance de Acreditación N.º LE-030
Acreditado a partir de: 30.05.2006
Alcance disponible en www.eca.cr

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE	
Empresa:	Municipalidad Sn Rafael de Heredia
Dirección:	San Rafael, Heredia
Dirigido a:	Ing. Gustavo Barrantes
Proyecto:	La Suiza, Los Ángeles y San Josecito


IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA Y DATOS DE CONTROL	
Fecha del muestreo:	21 de abril del 2020
Contenido:	Caracterización
Método de muestreo utilizado:	PT-LAB-07
Descripción de la muestra:	Subrasante
Procedencia de la muestra:	Sondeo 11, 150 m NE de la Escuela, Calle Hernández, Barrio Los Ángeles
Lugar de realización de los ensayos:	LAB. CENTRAL
Fecha recepción de la muestra:	22 de abril del 2020
Fecha de ejecución del ensayo:	24 de abril del 2020 - 09 de mayo del 2020

Aclaraciones:

1. Los resultados que se presentan a continuación se refieren solo a las muestras ensayadas y/o pruebas realizadas y al momento y condiciones en que se realizaron los ensayos.
2. No se permite la reproducción parcial del Informe de Ensayos sin previa autorización escrita de CACISA.
3. El presente informe no es válido sin la firma de autorización respectiva.
4. Si la información o muestras son aportadas por el cliente, los resultados son únicamente aplicables a la muestra suministrada.
5. Siempre que se reporta la incertidumbre expandida, se declara como la incertidumbre estándar de la medición multiplicada por un factor de cobertura $k=2$ que corresponde a una probabilidad de cobertura aproximadamente del 95 %.
6. Cuando se requiera declarar la conformidad de los resultados, se tomará como regla de decisión lo siguiente: "si al menos un 50% del valor de la medición (resultado +/- incertidumbre) se encuentra entre lo especificado se da conformidad de aceptación, caso contrario se declara incumplimiento con la especificación". Cuando el cliente no la aporte, esta será la regla de decisión a utilizar.
7. Cualquier comentario acerca de nuestros servicios, favor enviarlo a calidad@cacisa.cr

Fuente: Elaboración propia de la investigadora para efectos del presente trabajo investigativo

Figura 63. Informe de ensayo 4

RESULTADOS					
Análisis Granulométrico del Agregado Fino y Grueso*					
Tamiz		% Pasando	Graduación		
			Superior	Inferior	Cumplimiento
N° 4	4,750	100	-	-	N/A
N° 10	2,000	100	-	-	N/A
N° 40	0,425	98	-	-	N/A
N° 200 *	0,075	90,0	-	-	N/A
Límites de Atterberg, AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)*					
Parámetro	Resultado	Especificación (Max.)	Incertidumbre (±)	Cumplimiento	
Límite líquido	53	---	0,049	N/A	
Índice plástico	21	---	0,3	N/A	
Densidad máxima seca y humedad óptima, método C (AASHTO T-99)*					
Densidad seca máxima, kg/m ³			1299		
Humedad óptima (%)			35,7		
Índice de soporte de California, AASHTO T-193 (ASTM D 1883) * (Los esfuerzos de compactación se definieron con 56, 28 y 14 golpes del mazo de Proctor)					
Parámetro	Resultado	Especificación CR-2010	Incertidumbre(±)	Cumplimiento	
CBR al 91% compactación	5,7	---	0,019	N/A	
Porcentaje de hinchamiento	0	---	0,044	N/A	
AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYOS					
					
Ing. Jorge Camacho Bermúdez Supervisor de Laboratorio					
cc: Archivo, JICB			Nulo sin sello blanco		

Fuente: Elaboración propia de la investigadora para efectos del presente trabajo investigativo

Figura 64. Informe de ensayo 5

 <p>CACISA INGENIERÍA+EXPERIENCIA+COMPROMISO</p>	<p>INFORME DE ENSAYO CR-LAB-SR-2020-6553 14 de mayo del 2020</p>		 <p>Laboratorio de Ensayo Alcance de Acreditación N.º LE.030 Acreditado a partir de: 16.06.2016 Alcance disponible en www.eca.or.cr</p>
	<p>IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE</p>		
<p>Empresa: Municipalidad Sn Rafael de Heredia</p>	<p>Dirigido a: Ing. Gustavo Barrantes</p>		
<p>Dirección: San Rafael, Heredia</p>	<p>Proyecto: La Suiza, Los Ángeles y San Josecito</p>		
<p>IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA Y DATOS DE CONTROL</p>			
<p>Fecha del muestreo:</p>	<p>22 de abril del 2020</p>		
<p>Contenido:</p>	<p>Caracterización</p>		
<p>Método de muestreo utilizado:</p>	<p>PT-LAB-07</p>		
<p>Descripción de la muestra:</p>	<p>Subrasante</p>		
<p>Procedencia de la muestra:</p>	<p>Sondeo 16, 200 m después de intersección, Calle Saca, Barrio Los Ángeles</p>		
<p>Lugar de realización de los ensayos:</p>	<p>LAB. CENTRAL</p>		
<p>Fecha recepción de la muestra:</p>	<p>24 de abril del 2020</p>		
<p>Fecha de ejecución del ensayo:</p>	<p>25 de abril del 2020 - 09 de mayo del 2020</p>		
<p>Aclaraciones:</p>			
<p>1. Los resultados que se presentan a continuación se refieren solo a las muestras ensayadas y/o pruebas realizadas y al momento y condiciones en que se realizaron los ensayos.</p>			
<p>2. No se permite la reproducción parcial del Informe de Ensayos sin previa autorización escrita de CACISA.</p>			
<p>3. El presente informe no es válido sin la firma de autorización respectiva.</p>			
<p>4. Si la información o muestras son aportadas por el cliente, los resultados son únicamente aplicables a la muestra suministrada.</p>			
<p>5. Siempre que se reporta la incertidumbre expandida, se declara como la incertidumbre estándar de la medición multiplicada por un factor de cobertura $k=2$ que corresponde a una probabilidad de cobertura aproximadamente del 95 %.</p>			
<p>6. Cuando se requiera declarar la conformidad de los resultados, se tomará como regla de decisión lo siguiente: "si al menos un 50% del valor de la medición (resultado +/- incertidumbre) se encuentra entre lo especificado se da conformidad de aceptación, caso contrario se declara incumplimiento con la especificación". Cuando el cliente no la aporte, esta será la regla de decisión a utilizar.</p>			
<p>7. Cualquier comentario acerca de nuestros servicios, favor enviarlo a calidad@cacisa.cr</p>			
<p>*ENSAYO ACREDITADO, ** ENSAYO NO ACREDITADO: Ver alcance en www.eca.or.cr</p>			

Fuente: Elaboración propia de la investigadora para efectos del presente trabajo investigativo


Figura 65. Informe de ensayo 6

RESULTADOS					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, AASHTO T-27/11 (ASTM 117/136)*					
Tamiz		% Pasando	Graduación		
			Superior	Inferior	Cumplimiento
N° 4	4,750	100	-	-	N/A
N° 10	2,000	99	-	-	N/A
N° 40	0,425	95	-	-	N/A
N° 200	0,075	76,3	-	-	N/A

Límites de Atterberg, AASHTO T 89/90 (ASTM 4318)*				
Parámetro	Resultado	Especificación (Max.)	Incertidumbre (±)	Cumplimiento
Límite líquido	50	---	0,049	N/A
Índice plástico	15	---	0,3	N/A

Densidad máxima seca y humedad óptima, método C (AASHTO T-99)*	
Densidad seca máxima, kg/m ³	1362
Humedad óptima (%)	33,8

Índice de soporte de California, AASHTO T-193 (ASTM D 1883) * (Los esfuerzos de compactación se definieron con 56, 28 y 14 golpes del mazo de Proctor)				
Parámetro	Resultado	Especificación CR-2010	Incertidumbre(±)	Cumplimiento
CBR al 91% compactación	8	---	0,019	N/A
Porcentaje de hinchamiento	1	---	0,044	N/A

AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYOS	
	
Ing. Jorge Camacho Bermúdez Supervisor de Laboratorio	
cc: Archivo, JICB	Nulo sin sello blanco

Fuente: Elaboración propia de la investigadora para efectos del presente trabajo investigativo

Anexo H. Cálculo de la propuesta de los espesores de la estructura de pavimento

Figura 66. Cálculo de espesores, calle Naranja

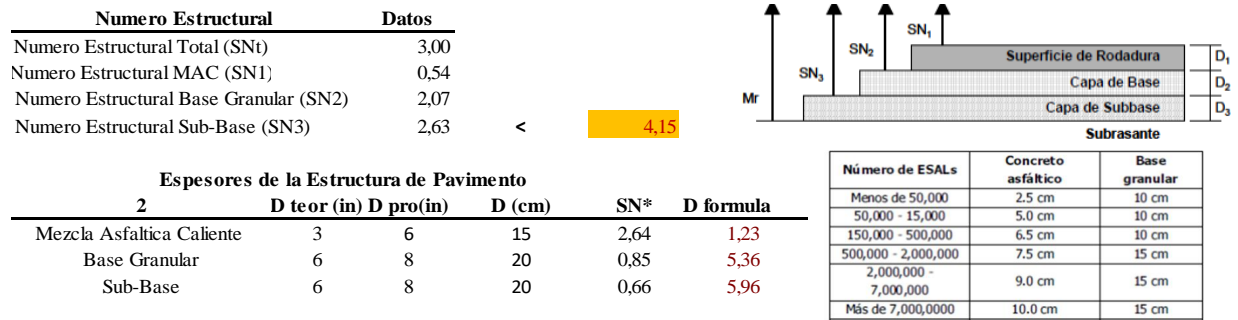


Figura 67. Cálculo de espesores, calle La Saca.

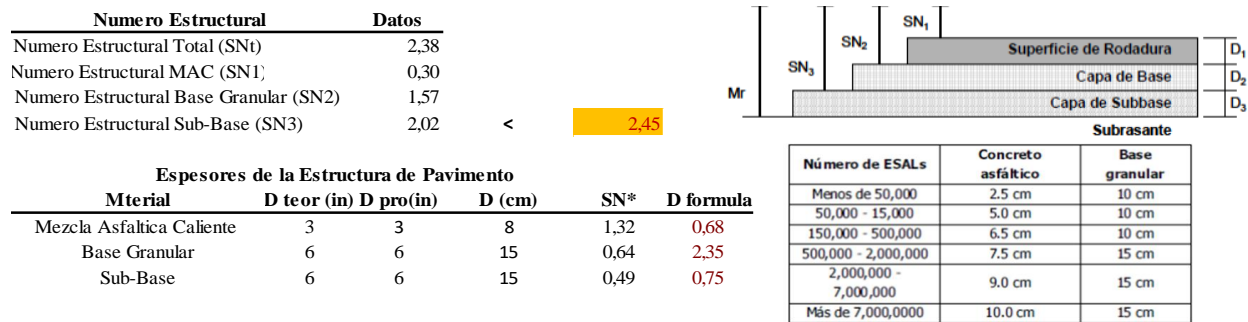
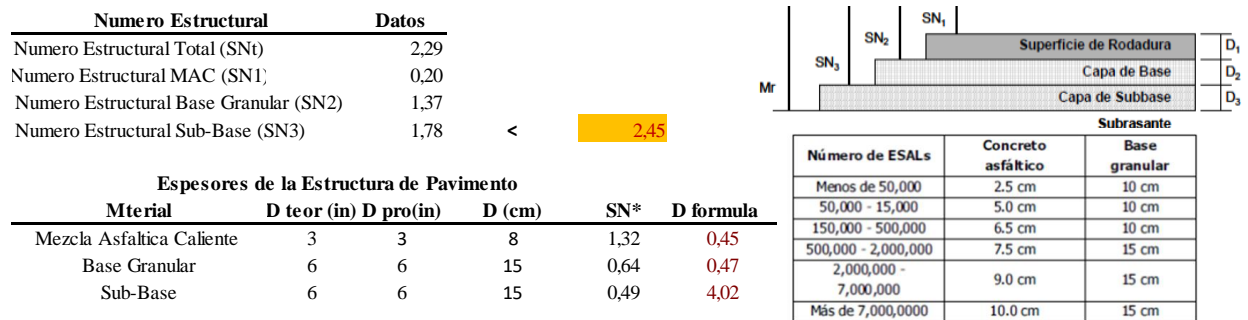


Figura 68. Cálculo de espesores, calle La Escuela.



Anexo I. Cálculo de falla por área de porcentaje de agrietamiento

Figura 69. Datos generales, calle Naranja

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO					Punto	Profundidad
Capa	Espesor (in)	Módulo (psi)	Poisson			
MAC	6,0	450000	0,3	Fibra superior MAC	0,01	
Base	8,0	28500	0,35	Fibra intermedia MAC	3,00	
Subbase	8,0	15000	0,4	Fibra inferior MAC	6,00	
Subrasante	-	10277	0,3	Fibra intermedia BG	10,00	
				Fibra intermedia SB	18,00	
				Fibra Superior SR	22,00	
				6 pulgadas bajo la SR	28,00	

ESALS diseño	1 660 985
<i>Carga</i>	
Presión (psi)	100
Carga (lbs)	4500
<i>Diseño de mezcla</i>	
Porcentaje de asfalto efectivo	4,60%
Porcentaje de asfalto mezcla (%)	6,00%
Porcentaje de vacíos (%)	4,00%

<i>Medio ambiente</i>	
Profundidad del NF (m)	7,75
Profundidad del NF (pies)	25,43
Profundidad de la roca (pies)	350,0
Temperatura °C (MAC)	38,18
Temperatura °F (MAC)	100,7

Figura 70. Datos generales, calle La Saca

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO					Punto	Profundidad
Capa	Espesor (in)	Módulo (psi)	Poisson			
MAC	3,0	450000	0,3	Fibra superior MAC	0,01	
Base	6,0	28500	0,35	Fibra intermedia MAC	1,50	
Subbase	6,0	15000	0,4	Fibra inferior MAC	3,00	
Subrasante	-	9669	0,3	Fibra intermedia BG	6,00	
				Fibra intermedia SB	12,00	
				Fibra Superior SR	15,00	
				6 pulgadas bajo la SR	21,00	

ESALS diseño	318 398
<i>Carga</i>	
Presión (psi)	100
Carga (lbs)	4500
<i>Diseño de mezcla</i>	
Porcentaje de asfalto efectivo	4,60%
Porcentaje de asfalto mezcla (%)	6,00%
Porcentaje de vacíos (%)	4,00%

<i>Medio ambiente</i>	
Profundidad del NF (m)	7,75
Profundidad del NF (pies)	25,43
Profundidad de la roca (pies)	350,0
Temperatura °C (MAC)	38,18
Temperatura °F (MAC)	100,7

Figura 71. Datos generales, calle La Escuela

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO				Punto	Profundidad
Capa	Esesor (in)	Módulo (psi)	Poisson		
MAC	3,0	450000	0,3	Fibra superior MAC	0,01
				Fibra intermedia MAC	1,50
Base	6,0	28500	0,35	Fibra inferior MAC	3,00
Subbase	6,0	15000	0,4	Fibra intermedia BG	6,00
Subrasante	-	7783	0,3	Fibra intermedia SB	12,00
				Fibra Superior SR	15,00
				6 pulgadas bajo la SR	21,00

ESALS diseño	149 881
--------------	---------

Carga	
Presión (psi)	100
Carga (lbs)	4500

Diseño de mezcla	
Porcentaje de asfalto efectivo	4,60%
Porcentaje de asfalto mezcla (%)	6,00%
Porcentaje de vacíos (%)	4,00%

Medio ambiente	
Profundidad del NF (m)	7,75
Profundidad del NF (pies)	25,43
Profundidad de la roca (pies)	350,0
Temperatura °C (MAC)	38,18
Temperatura °F (MAC)	100,7

Figura 72. Cálculo del daño acumulado, calle Naranja

Fatiga en Mezcla asfáltica 2

Vb	4,60%
Va	4,00%
M	-0,751

C	0,178
---	-------

Vb: porcentaje de asfalto efectivo (%).
Va: porcentaje de vacíos (%).

I. Agriet. Abajo-arriba	
k1	250,0
N	5,128520E+06

$$k_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{-(11,07 - 3,46 \ln N)}}}$$

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

$$k_1 = \frac{1}{0,001 + \frac{12}{1 + e^{-(15,67 - 2,818 \ln N)}}}$$

$$C = 10^M$$

$$N_f = 0,00432 \times C \times k_1 \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E^*} \right)^{1,281}$$

% Crecimiento	4,0%
Nf adm fatiga	5 128 520
ESALs diseño	1 660 985

DAÑO				
Año	ESALs año	ESALs acumulado	Daño relativo	Daño acumulado
1	55005	55 005	1,1%	1,1%
2	57205	112 209	1,1%	2,2%
3	59493	171 702	1,2%	3,3%
4	61873	233 575	1,2%	4,6%
5	64348	297 923	1,3%	5,8%
6	66921	364 844	1,3%	7,1%
7	69598	434 442	1,4%	8,5%
8	72382	506 825	1,4%	9,9%
9	75278	582 102	1,5%	11,4%
10	78289	660 391	1,5%	12,9%
11	81420	741 811	1,6%	14,5%
12	84677	826 488	1,7%	16,1%
13	88064	914 552	1,7%	17,8%
14	91587	1 006 139	1,8%	19,6%
15	95250	1 101 389	1,9%	21,5%
16	99060	1 200 449	1,9%	23,4%
17	103023	1 303 472	2,0%	25,4%
18	107143	1 410 615	2,1%	27,5%
19	111429	1 522 045	2,2%	29,7%
20	115886	1 637 931	2,3%	31,9%

Figura 73. Cálculo de daño acumulado, calle La Saca

Fatiga en Mezcla asfáltica 2

Vb	4,60%
Va	4,00%
M	-0,751

C	0,178
---	-------

Vb: porcentaje de
asfalto efectivo (%).
Va: porcentaje de
vacíos (%).

I.Agriet. Abajo-arriba	
k1	582,8
N	9,447106E+05

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

$$C = 10^M$$

$$N_f = 0,00432 \times C \times k_1 \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E^*} \right)^{1,281}$$

$$k_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 \times N_f)}}$$

$$k_1 = \frac{1}{0,001 + \frac{12}{1 + e^{(15,67 - 1,8186 \times N_f)}}$$

% Crecimiento	4,0%
Nf adm fatiga	944 711
ESALs diseño	318 398

DAÑO

Año	ESALs año	ESALs acumulado	Daño relativo	Daño acumulado
1	10569	10 569	1,1%	1,1%
2	10992	21 562	1,2%	2,3%
3	11432	32 994	1,2%	3,5%
4	11889	44 883	1,3%	4,8%
5	12365	57 248	1,3%	6,1%
6	12859	70 107	1,4%	7,4%
7	13374	83 481	1,4%	8,8%
8	13909	97 390	1,5%	10,3%
9	14465	111 855	1,5%	11,8%
10	15044	126 898	1,6%	13,4%
11	15645	142 544	1,7%	15,1%
12	16271	158 815	1,7%	16,8%
13	16922	175 737	1,8%	18,6%
14	17599	193 336	1,9%	20,5%
15	18303	211 639	1,9%	22,4%
16	19035	230 674	2,0%	24,4%
17	19796	250 471	2,1%	26,5%
18	20588	271 059	2,2%	28,7%
19	21412	292 471	2,3%	31,0%
20	22268	314 739	2,4%	33,3%

Figura 74. Cálculo de daños acumulado, calle La Escuela

Fatiga en Mezcla asfáltica 2

Vb	4,60%
Va	4,00%
M	-0,751

C	0,178
---	-------

Vb: porcentaje de
asfalto efectivo (%).
Va: porcentaje de
vacíos (%).

I.Agriet. Abajo-arriba	
k1	582,8
N	9,148203E+05

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

$$C = 10^M$$

$$N_f = 0,00432 \times C \times k_1 \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E^*} \right)^{1,281}$$

$$k_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 \times N_f)}}$$

$$k_1 = \frac{1}{0,001 + \frac{12}{1 + e^{(15,67 - 1,8186 \times N_f)}}$$

% Crecimiento	4,0%
Nf adm fatiga	914 820
ESALs diseño	149 881

DAÑO

Año	ESALs año	ESALs acumulado	Daño relativo	Daño acumulado
1	5448	5 448	0,6%	0,6%
2	5666	11 113	0,6%	1,2%
3	5892	17 005	0,6%	1,9%
4	6128	23 133	0,7%	2,5%
5	6373	29 506	0,7%	3,2%
6	6628	36 134	0,7%	3,9%
7	6893	43 027	0,8%	4,7%
8	7169	50 196	0,8%	5,5%
9	7455	57 651	0,8%	6,3%
10	7754	65 405	0,8%	7,1%
11	8064	73 469	0,9%	8,0%
12	8386	81 855	0,9%	8,9%
13	8722	90 577	1,0%	9,9%
14	9071	99 647	1,0%	10,9%
15	9434	109 081	1,0%	11,9%
16	9811	118 892	1,1%	13,0%
17	10203	129 095	1,1%	14,1%
18	10611	139 707	1,2%	15,3%
19	11036	150 742	1,2%	16,5%
20	11477	162 220	1,3%	17,7%

Figura 75. Porcentaje de agrietamiento por fatiga, calle Naranjo

C1'	-2,000
C2''	-2,562
Daño acumulado	FC (%)
1,1%	4,5
2,2%	9,5
3,3%	14,4
4,6%	19,2
5,8%	23,7
7,1%	28,1
8,5%	32,2
9,9%	36,0
11,4%	39,6
12,9%	43,0
14,5%	46,2
16,1%	49,2
17,8%	52,0
19,6%	54,7
21,5%	57,2
23,4%	59,5
25,4%	61,7
27,5%	63,7
29,7%	65,7
31,9%	67,5

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

where:

D = damage.

T = total number of periods.

n_i = actual traffic for period i .

N_i = traffic allowed under conditions prevailing in i .

$$FC_{\text{bottom}} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 C_1' + C_2 C_2' \log_{10}(D^{1000}))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad (3.3.31a)$$

where:

FC_{bottom} = bottom-up fatigue cracking, percent lane area

D = bottom-up fatigue damage

C_1 = 1.0

C_1' = $-2 * C_2'$

C_2' = 1.0

C_2 = $-2.40874 - 39.748 * (1 + h_{ac})^{-2.856}$

Figura 76. Porcentaje de agrietamiento por fatiga, calle La Saca

C1'	-2,000
C2''	-3,167
Daño acumulado	FC (%)
1,1%	1,5
2,3%	3,9
3,5%	6,8
4,8%	10,1
6,1%	13,5
7,4%	17,1
8,8%	20,8
10,3%	24,5
11,8%	28,2
13,4%	31,8
15,1%	35,4
16,8%	38,9
18,6%	42,2
20,5%	45,5
22,4%	48,6
24,4%	51,5
26,5%	54,3
28,7%	57,0
31,0%	59,6
33,3%	62,0

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

where:

D = damage.

T = total number of periods.

n_i = actual traffic for period i .

N_i = traffic allowed under conditions prevailing in i .

$$FC_{\text{bottom}} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 C_1' + C_2 C_2' \log_{10}(D^{1000}))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad (3.3.31a)$$

where:

FC_{bottom} = bottom-up fatigue cracking, percent lane area

D = bottom-up fatigue damage

C_1 = 1.0

C_1' = $-2 * C_2'$

C_2' = 1.0

C_2 = $-2.40874 - 39.748 * (1 + h_{ac})^{-2.856}$

Figura 77. Porcentaje de agrietamiento por fatiga, calle La Escuela.

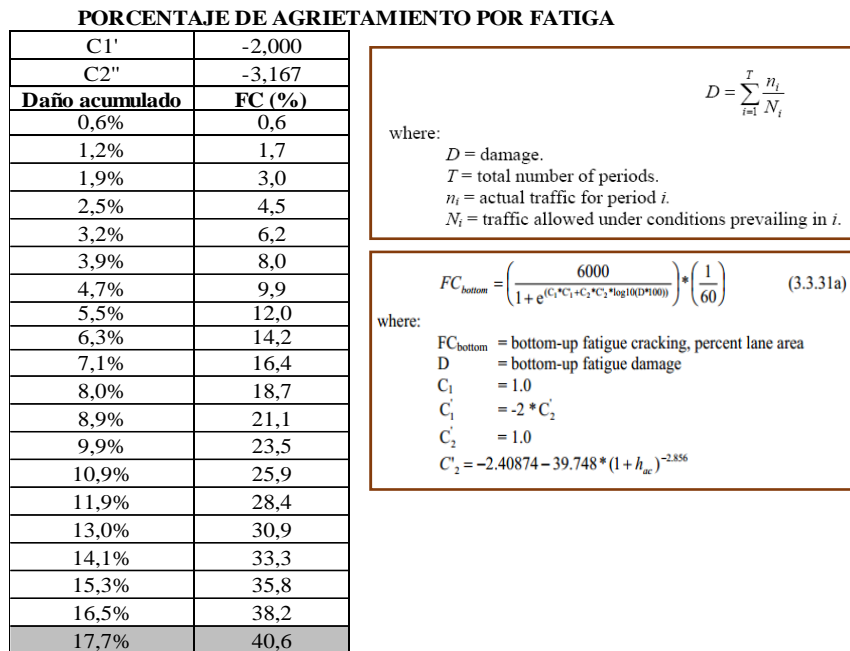


Figura 78. Gráfico 1, calle Naranja

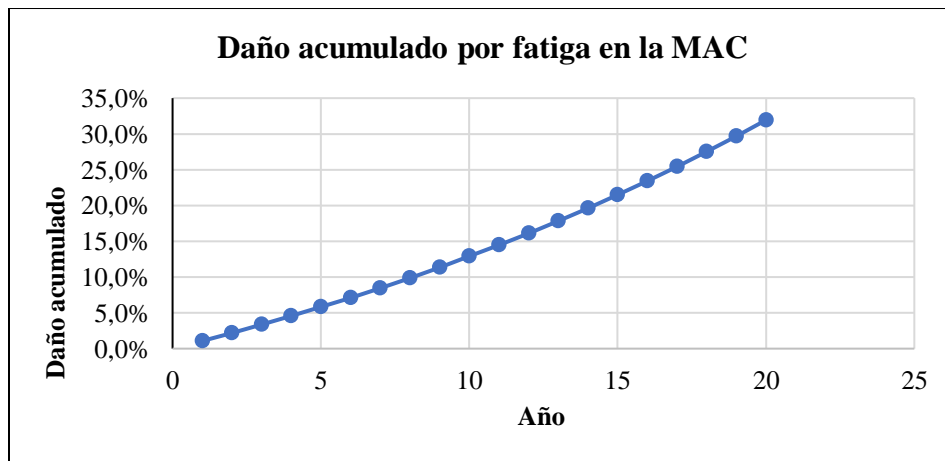


Figura 79. Gráfico 2, calle Naranjo

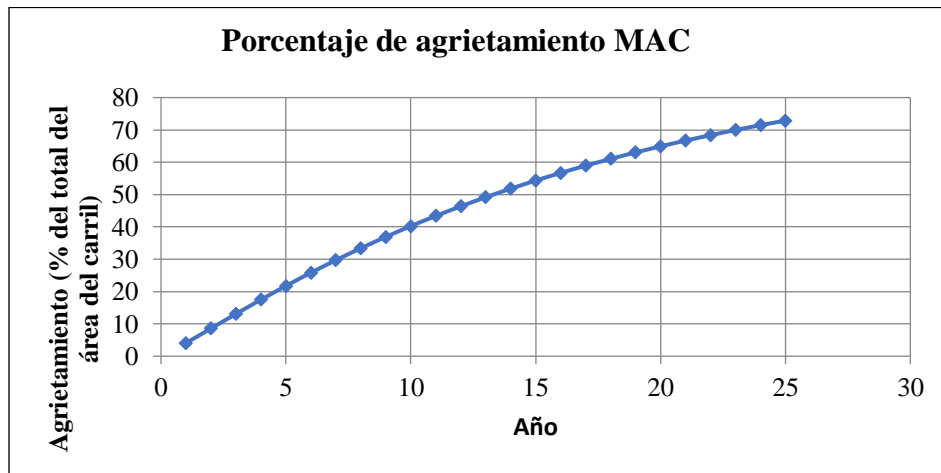


Figura 80. Gráfico 1, calle La Saca

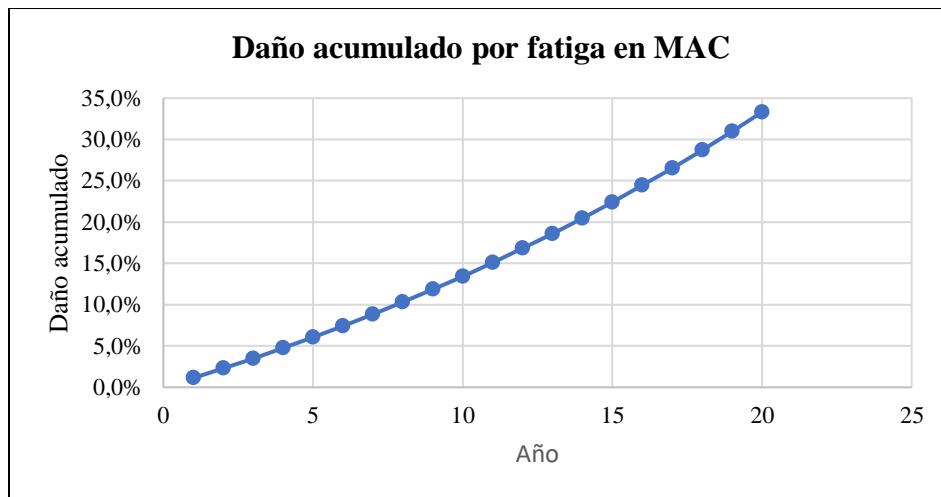


Figura 81. Gráfico 2, calle La Saca

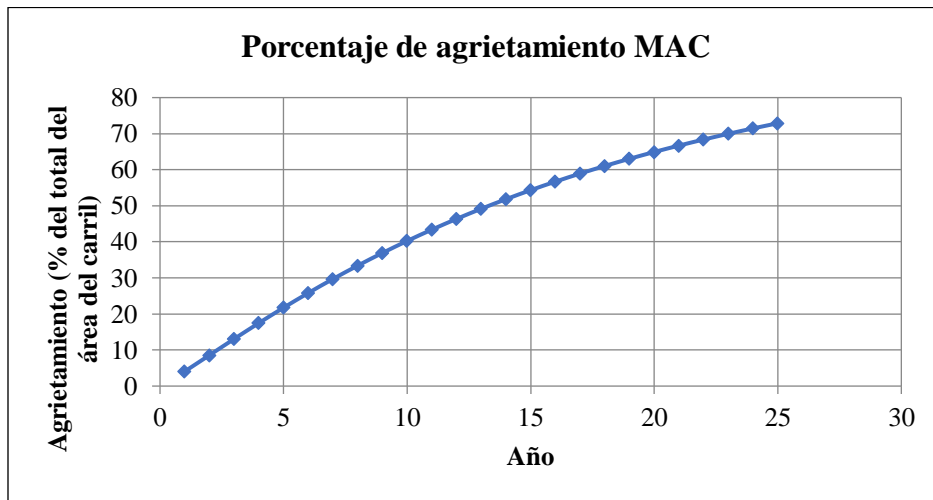


Figura 82. Gráfico 1, calle La Escuela

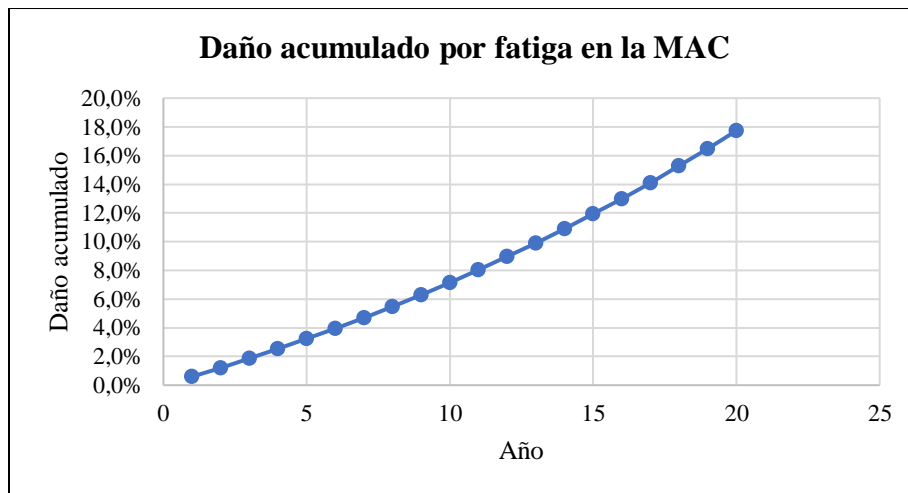
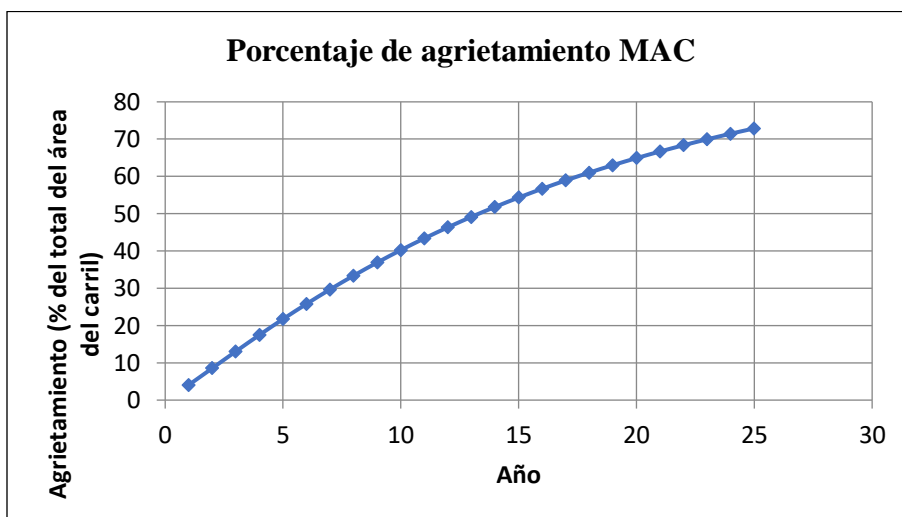


Figura 83. Gráfico 2, calle La Escuela



Anexo J. Cálculo de falla por deformaciones permanentes

Figura 84. Deformación permanente MAC, calle Naranja

en el modelo	
C1	-6,162
C2	17,649
K1	1,6539
Temperatura °F	100,7
N (Esals)	1,66E+06
ϵ_r	119,00
DEFORMACIONES	
ϵ_p (in/in)	0,054
Deformación (in)	0,09
Deformación (cm)	0,23

Figura 85. Deformación permanente MAC, calle La Saca

C1	-10,817
C2	22,384
K1	4,2790
Temperatura °F	100,7
N (Esals)	3,18E+05
ϵ_r	108,00
DEFORMACIONES	
ϵ_p (in/in)	0,022
Deformación (in)	0,10
Deformación (cm)	0,24

Figura 86. Deformación permanente MAC, calle La Escuela

C1	-10,817
C2	22,384
K1	4,2790
Temperatura °F	
	100,7
N (Esals)	
	1,50E+05
ε _r	
	105,00
DEFORMACIONES	
ε _p (in/in)	0,015
Deformación (in)	0,06
Deformación (cm)	0,16

Figura 87. Deformaciones de la base, subbase y subrasante, calle Naranja

Deformación permanente en materiales granulares		Deformación permanente en la subrasante	
BASE		SUBBASE	
β1 base	1,673	β1 subbase	1,673
Er base (psi)	28500	Er subbase (psi)	15000
GWT (pies)	25,43	GWT (pies)	25,43
Wc	7,09	Wc	12,03
log B	-0,736	log B	-0,823
B	0,184	B	0,150
a1	0,15	a1	0,15
b1	0	b1	0
a9	20	a9	20
b9	0	b9	0
p	6450,47	p	52772,67

MEPDG

$$\delta = \int_0^{h_{bedrock}} \epsilon_p(z) dz$$

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

Donde

δ= Deformación plástica total de la subrasante (in)

H bedrock= Profundidad de la roca, pies (z=0 representa la superficie de la subrasante)

E	10 276,85
Nivel freatico	25,43
N	1 660 984,81

Z=0 in	
β1 subrasante	1,35
Wc	16,42
log β	-0,614
β	0,243
ρ	703,57

Z=6 in	
β1 subrasante	1,35
Wc	16,42
log β	-0,614
β	0,243
ρ	703,57

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) = 22,36$$

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) = 25,12$$

Esesor de la base (in)	8
δa (in)	0,063
δ (cm)	0,159

Esesor de la Sub base (in)	8
δa (in)	0,055
δ (cm)	0,140

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_p} \right) = 20,65$$

$$\epsilon_p \text{ (in)} = 0,008027$$

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_p} \right) = 20,65$$

$$\epsilon_p \text{ (in)} = 0,005847$$

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

k	0,053
---	-------

Deformación permanente en la subrasante

δ (in)	0,152
δ (cm)	0,39

Figura 88. Deformaciones de base, subbase y subrasante, calle La Saca

Deformación permanente en materiales granulares

BASE	
β1 base	1,673
Er base (psi)	28500
GWT (pies)	25,43
Wc	7,09
log B	-0,612
B	0,244
a1	0,15
b1	0
a9	20
b9	0
p	685,98

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) = 20,64$$

Esesor de la base (in)	6
δa (in)	0,115
δ (cm)	0,292

SUBBASE	
β1 subbase	1,673
Er subbase (psi)	15000
GWT (pies)	25,43
Wc	12,03
log B	-0,613
B	0,244
a1	0,15
b1	0
a9	20
b9	0
p	695,22

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) = 20,64$$

Esesor de la Sub base (in)	6
δa (in)	0,101
δ (cm)	0,257

Deformación permanente en la subrasante

MEPDG

$$\delta = \int_0^{h_{bedrock}} \epsilon_p(z) dz$$

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

Donde

δ= Deformacion plástica total de la subrasante (in)

H bedrock= Profundidad de la roca, pies (z=0 representa la superficie de la subrasante)

E	9 668,71
Nivel freatico	25,43
N	318 397,82

Z=0 in

β1 subrasante	1,35
Wc	17,27
log β	-0,614
β	0,243
ρ	705,19

Z=6 in

β1 subrasante	1,35
Wc	17,27
log β	-0,614
β	0,243
ρ	705,19

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) = 20,65$$

$$\epsilon_p \text{ (in)} = 0,016340$$

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) = 20,65$$

$$\epsilon_p \text{ (in)} = 0,010871$$

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

k	0,068
---	-------

Deformación permanente en la subrasante

δ (in)	0,241
δ (cm)	0,61

Figura 89. Deformaciones de base, subbase y subrasante, calle La Escuela

Deformación permanente en materiales granulares

BASE	
β1 base	1,673
Er base (psi)	28500
GWT (pies)	25,43
Wc	7,09
log B	-0,736
B	0,184
a1	0,15
b1	0
a9	20
b9	0
p	6450,47

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) = 22,36$$

Esesor de la base (in)	6
δa (in)	0,089
δ (cm)	0,226

SUBBASE	
β1 subbase	1,673
Er subbase (psi)	15000
GWT (pies)	25,43
Wc	12,03
log B	-0,823
B	0,150
a1	0,15
b1	0
a9	20
b9	0
p	52772,67

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) = 25,12$$

Esesor de la Sub base (in)	6
δa (in)	0,067
δ (cm)	0,169

Deformación permanente en la subrasante

MEPDG

$$\delta = \int_0^{h_{bedrock}} \epsilon_p(z) dz$$

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

Donde

δ= Deformacion plástica total de la subrasante (in)

H bedrock= Profundidad de la roca, pies (z=0 representa la superficie de la subrasante)

E	7 783,07
Nivel freatico	25,43
N	149 881,06

Z=0 in

β1 subrasante	1,35
Wc	20,65
log β	-0,615
β	0,243
ρ	711,71

Z=6 in

β1 subrasante	1,35
Wc	20,65
log β	-0,615
β	0,243
ρ	711,71

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) = 20,65$$

$$\epsilon_p \text{ (in)} = 0,017849$$

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) = 20,65$$

$$\epsilon_p \text{ (in)} = 0,011864$$

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

k	0,068
---	-------

Deformación permanente en la subrasante

δ (in)	0,262
δ (cm)	0,67

Figura 90. Deformación total, calle Naranja

Deformación permanente total	
Ahuellamiento Total (in)	
RD AC =	0,09 in
RD GB =	0,063 in
RD GSUB-B =	0,055 in
RD SG =	0,152 in
RD TOTAL =	0,36 in
RD TOTAL =	9,13 mm SI CUMPLE

$$RD_{Total} = RD_{AC} + RD_{GB} + RD_{SG}$$

Donde:
 RD_{AC} , deformación permanente de la carpeta asfáltica
 RD_{GB} , deformación permanente de la Base Granular
 RD_{SG} , deformación permanente de la sub-rasante

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

Figura 91. Deformación total, calle La Saca

Deformación permanente total	
Ahuellamiento Total (in)	
RD AC =	0,10 in
RD GB =	0,115 in
RD GSUB-B =	0,101 in
RD SG =	0,241 in
RD TOTAL =	0,55 in
RD TOTAL =	14,03 mm SI CUMPLE

$$RD_{Total} = RD_{AC} + RD_{GB} + RD_{SG}$$

Donde:
 RD_{AC} , deformación permanente de la carpeta asfáltica
 RD_{GB} , deformación permanente de la Base Granular
 RD_{SG} , deformación permanente de la sub-rasante

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

Figura 92. Deformación total, calle La Escuela

Deformación permanente total	
Ahuellamiento Total (in)	
RD AC =	0,06 in
RD GB =	0,089 in
RD GSUB-B =	0,067 in
RD SG =	0,262 in
RD TOTAL =	0,48 in
RD TOTAL =	12,25 mm SI CUMPLE

$$RD_{Total} = RD_{AC} + RD_{GB} + RD_{SG}$$

Donde:
 RD_{AC} , deformación permanente de la carpeta asfáltica
 RD_{GB} , deformación permanente de la Base Granular
 RD_{SG} , deformación permanente de la sub-rasante

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