



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**GUÍA PRÁCTICA PARA LA APLICACIÓN DEL SOFTWARE “WESLEA”, EN EL
CÁLCULO Y MODELACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingenieros Civiles

AUTORES: Byron Rubén Dorado Benavides

Juan Gabriel Ortiz Montero

TUTOR: Sandri Germánico Castro Angulo

Quito - Ecuador
2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Byron Rubén Dorado Benavides con documento de identificación N° 0402053318 y Juan Gabriel Ortiz Montero con documento de identificación N° 0201970985; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 31 de julio del 2023

Atentamente,



Byron Rubén Dorado Benavides
0402053318



Juan Gabriel Ortiz Montero
0201970985

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Byron Rubén Dorado Benavides con documento de identificación N° 0402053318 y Juan Gabriel Ortiz Montero con documento de identificación N° 0201970985; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Guía Práctica para la Aplicación del Software WESLEA, para el Cálculo y Modelación de Pavimentos Flexibles”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 31 de julio del 2023

Atentamente,



Byron Rubén Dorado Benavides

0402053318



Juan Gabriel Ortiz Montero

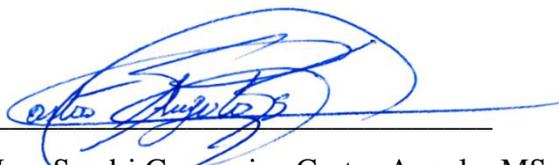
0201970985

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Sandri Germánico Castro Angulo con documento de identificación N° 0802550301, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: GUÍA PRÁCTICA PARA LA APLICACIÓN DEL SOFTWARE WESLEA, PARA EL CÁLCULO Y MODELACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, realizado por Byron Rubén Dorado Benavides con documento de identificación N° 0402053318 y Juan Gabriel Ortiz Montero con documento de identificación N° 0201970985, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 31 de julio del 2023

Atentamente,



Ing. Sandri Germanico Castro Angulo, MSc.

0802550301

DEDICATORIA

A mis padres, que han sido mi apoyo inquebrantable a lo largo de este proceso académico, sin su cariño, aliento y sacrificio, esto no sería realidad. Siempre han estado a mi lado, alentándome a perseguir mis sueños y brindándome las herramientas necesarias para alcanzarlos.

Han sido mi apoyo en los momentos más difíciles, infundiéndome confianza y motivación cuando más lo necesitaba. Sus sacrificios son innumerables, han dedicado su tiempo, recursos y esfuerzo incansable para que nada me hiciera falta. Siempre han estado pendientes, levantándome cuando caía y celebrando mis logros con orgullo. Cada éxito que he alcanzado también es suyo, porque son el cimiento en el que se construyen mis triunfos.

Su ejemplo de perseverancia, dedicación y sacrificio ha quedado marcado en mi ser, con sus palabras de aliento y amor incondicional, me han convertido en la persona que soy, que me han llevado hasta este punto. Por todo esto y mucho más les dedico este trabajo, ya que, sin ustedes, no habría encontrado el coraje para iniciar este proceso ni la confianza para terminarlo.

Juan Gabriel Ortiz Montero

DEDICATORIA

A Dios quien ha sido mi guía, fortaleza y amor, me ha dado fuerza para seguir adelante y no rendirme, él siempre estuvo presente en los momentos más difíciles.

A mis padres Patricio y Gioconda, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir mi sueño, por inculcar valores en mí, el ejemplo de esfuerzo y valentía, con sus consejos, y sus palabras de aliento.

A mi hijo que me dio fuerza para no rendirme y poder ser un ejemplo para él.

A mi hermano por su cariño y apoyo incondicional, durante este proceso, por estar conmigo en todo momento.

Byron Rubén Dorado Benavides

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la fuerza, sabiduría y salud necesarios para superar los desafíos y para poder avanzar por este camino hasta alcanzar este logro.

A mis amados padres y familia, les debo mi gratitud. Su apoyo incondicional, palabras de aliento han sido parte fundamental para terminar con éxito este proyecto.

A todos los que de una u otra forma contribuyeron en mi formación, a la Universidad por brindarme las oportunidades de aprendizaje y crecimiento. Profesores, compañeros y amigos, gracias por su influencia positiva, sus consejos, conocimientos y palabras de aliento que siempre recordare.

Juan Gabriel Ortiz Montero

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios, por llenarme de bendiciones, permitirme culminar mis estudios, por darme sabiduría y paciencia en este largo camino.

A mis padres por su apoyo incondicional, por los esfuerzos diarios para alcanzar mis objetivos, ya que sin ellos no podría haberlo logrado.

Expreso mi agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana que me ha dado la oportunidad de formarme profesionalmente para desenvolverme en un campo laboral.

A mis maestros por compartir sus enseñanzas, experiencia y conocimientos, también a mi tutor por brindarme su ayuda y apoyo en el transcurso de este trabajo.

Byron Rubén Dorado Benavides

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	1
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Problema de estudio	1
1.2.1. Antecedentes	1
1.2.2. Importancia y Alcance	2
1.2.3. Delimitación.....	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1. Estructura de la vía	5
2.3. Pavimento flexible.....	7
2.4. Diseño de Pavimento Flexible.....	7
2.5. Software para la comprobación del diseño de Pavimentos Flexibles.....	8
2.6. Software WESLEA.....	9
CAPÍTULO III	10
METODOLOGÍA	10
3.1. Tipo de Investigación	10

3.2. Método.....	10
3.3. Técnicas de Recolección de Información.....	10
3.4. Proceso Técnico de Ingeniería Civil.....	10
CAPÍTULO IV.....	12
PROPUESTA GUÍA PRÁCTICA PARA LA APLICACIÓN DEL SOFTWARE	
“WESLEA”, PARA EL CÁLCULO Y MODELACIÓN DE PAVIMENTOS	
FLEXIBLES	12
4.1. Parte 1: introducción al software weslea	12
4.2. Parte 2: introducción de datos e interpretación de resultados en el software Weslea.	48
4.3. Parte 3: ejercicio de aplicación	58
CONCLUSIONES.....	121
RECOMENDACIONES	122
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rango de valores del Módulo	18
Tabla 2. Rango de Valores de la Relación de Poisson.....	19
Tabla 3. Datos de tránsito promedio diario de vehículos.....	59
Tabla 4. Factor daño según tipo de vehículos.....	60
Tabla 5. TPD según el tipo de vehículo	60
Tabla 6. Periodos de Diseño en Función del Tipo de Carretera.	61
Tabla 7. Tránsito Promedio Diario	61
Tabla 8. Tasa de crecimiento anual de tráfico.	63
Tabla 9. Resumen Tasas de Crecimiento de Tráfico	65
Tabla 10. Factor carril.....	66
Tabla 11. Tránsito Promedio Diario anual.....	67
Tabla 12. Ejes equivalentes W18.....	68
Tabla 13. Nivel de Confiabilidad.....	69
Tabla 14. Factores de Desviación Normal.....	70
Tabla 15. Valores de Desviación Estándar (So), para Pavimentos Rígidos y Flexibles.....	70
Tabla 16. Índice de Serviciabilidad de Diseño.	71
Tabla 17. Tiempo de drenaje para capas granulares.	75
Tabla 18. Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles.....	75
Tabla 19. Espesores mínimos, en pulgadas, en función de los Ejes Equivalentes.....	79
Tabla 20. Espesores teóricos.....	81
Tabla 21. Espesores propuestos.	81
Tabla 22. Daño del Pavimento.....	84
Tabla 23. Espesores Reajustados.	86
Tabla 24. Resultados fatiga y ahuellamiento.	117

Tabla 25. Porcentaje de daño por fatiga y ahuellamiento.	118
Tabla 26. Comparación de resultados del Software WESLEA vs. Método Jones en el punto de análisis: Carpeta Asfáltica.....	119
Tabla 27. Comparación de resultados del Software WESLEA vs. Método Jones en el punto de análisis: Sub-rasante.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interfaz inicial software WESLEA.....	12
Figura 2. Units en software WESLEA.....	13
Figura 3. Interfaz inicial software WESLEA.....	14
Figura 4. Pestaña general software WESLEA.	15
Figura 5. Input software WESLEA.....	16
Figura 6. Ingreso número de capas software WESLEA	17
Figura 7. Tipo de material software WESLEA.....	17
Figura 8. Información estructural en software WESLEA.....	19
Figura 9. Tipos de cargas en software WESLEA.	21
Figura 10. Número de aplicaciones de carga en software WESLEA.	21
Figura 11. Posición y magnitud de cargas en software WESLEA.	22
Figura 12. Número de cargas en software WESLEA.	22
Figura 13. Botones de control de cargas en software WESLEA.	22
Figura 14. Eje simple con llantas dobles software WESLEA.	23
Figura 15. Esquema eje tándem.....	24
Figura 16. Distancia de llantas y ubicaciones críticas eje simple software WESLEA.	24
Figura 17. Esquema ubicación de carga de neumáticos eje simple.	25
Figura 18. Eje tándem.....	25
Figura 19. Distancia de llantas y ubicaciones críticas eje tándem software WESLEA.....	25
Figura 20. Ubicación de las cargas de neumáticos eje tándem.....	27
Figura 21. Eje trídem.	27
Figura 22. Distancia de llantas y ubicaciones críticas eje trídem software WESLEA.	28
Figura 23. Ubicación de las cargas de los neumáticos eje trídem.	29
Figura 24. Eje simple ruedas simples.	30

Figura 25. Distancia de llantas y ubicaciones críticas eje simple rueda simple software WESLEA	30
Figura 26. Ubicación de las cargas de los neumáticos eje simple rueda simple.....	30
Figura 27. Otros ejes software WESLEA.....	31
Figura 28. Número de cargas software WESLEA.....	32
Figura 29. Número de aplicaciones de carga software WESLEA.....	32
Figura 30. Posición y magnitud de cargas software WESLEA.....	33
Figura 31. Ubicación de las cargas de los neumáticos.....	35
Figura 32. Esquema eje tándem.....	35
Figura 33. Distancia de llantas y ubicaciones críticas en software WESLEA.....	36
Figura 34. Ubicación de las cargas de los neumáticos.....	36
Figura 35. Numero de aplicaciones de carga software WESLEA.....	37
Figura 36. Sistema de coordenadas software WESLEA.....	38
Figura 37. Ubicaciones críticas software WESLEA.....	39
Figura 38. Output software WESLEA.....	41
Figura 39. Número y ubicaciones de carga software WESLEA.....	41
Figura 40. Ubicación software WESLEA.....	41
Figura 41. Botones de control de ubicaciones software WESLEA.....	42
Figura 42. Datos de salida del software WESLEA.....	42
Figura 43. Grupo vida del pavimento software WESLEA.....	43
Figura 44. Botón exportar datos software WESLEA.....	43
Figura 45. Convención de signos de esfuerzos.....	45
Figura 46. Convención de signos de desplazamientos.....	45
Figura 47. Exportar datos software WESLEA.....	47
Figura 48. Pestaña unidades software WESLEA.....	47

Figura 49. Pestaña ayuda software WESLEA.	48
Figura 50. Introducción de espesores en software WESLEA.....	49
Figura 51. Introducción de cargas software WESLEA.....	50
Figura 52. Presión de inflado software WESLEA.....	50
Figura 53. Puntos de análisis.	51
Figura 54. Ubicación 1 de evaluación software WESLEA.	52
Figura 55. Ubicación 2 de evaluación software WESLEA.	53
Figura 56. Ubicación 3 de evaluación software WESLEA.	53
Figura 57. Ubicación 4 de evaluación software WESLEA.	54
Figura 58. Resultados del punto 1 de análisis.....	55
Figura 59. Resultados del punto 2 de análisis.....	55
Figura 60. Resultados del punto 3 de análisis.....	56
Figura 61. Resultados del punto 4 de análisis.....	56
Figura 62. Convención de signos.....	57
Figura 63. Desplazamientos de los puntos de análisis software WESLEA.....	57
Figura 64. Vida del pavimento software WESLEA.	58
Figura 65. Tasas de crecimiento de tráfico livianos.	63
Figura 66. Tasas de crecimiento de tráfico bus.	64
Figura 67. Tasas de crecimiento de tráfico pesado.....	65
Figura 68. Tasas de crecimiento de tráfico pesado.....	72
Figura 69. Tasas de crecimiento de tráfico pesado.....	73
Figura 70. Tasas de crecimiento de tráfico pesado.....	74
Figura 71. Cálculo de número estructural software Ecuación AASHTO 93.....	77
Figura 72. Cálculo de número estructural software Ecuación AASHTO 93.....	78
Figura 73. Cálculo de número estructural software Ecuación AASHTO 93.....	79

Figura 74. Resultados punto crítico parte inferior Carpeta Asfáltica.	82
Figura 75. Resultados punto crítico parte superior sub-rasante.....	83
Figura 76. Daño del Pavimento.	85
Figura 77. Ingreso de datos WESLEA.....	86
Figura 78. Ancho del Eje.	89
Figura 79. Ingreso Datos en WESLEA.....	90
Figura 80. Distancia al centro del eje de rueda doble.....	91
Figura 79. Ubicación puntos de análisis	91
Figura 80. Ubicación 1 de evaluación software WESLEA.	92
Figura 81. Ubicación 2 de evaluación software WESLEA.	93
Figura 82. Ubicación 3 de evaluación software WESLEA.	93
Figura 83. Ubicación 4 de evaluación software WESLEA.	94
Figura 84. Resultados del punto 1 de análisis.....	95
Figura 85. Resultados del punto 2 de análisis.....	96
Figura 86. Resultados del punto 3 de análisis.....	97
Figura 87. Resultados del punto 4 de análisis.....	98
Figura 88. Figura de Pattie para factor ZZ1 (K1=20, K2=2).....	102
Figura 89. Figura de Pattie para factor ZZ1 (K1=2, K2=2).....	103
Figura 90. Figura de Pattie para factor ZZ2 (K1=20, K2=2).....	104
Figura 91. Figura de Pattie para factor ZZ2 (K1=2, K2=2).....	105
Figura 92. Cuadro de factores de esfuerzo tricapa H=0,5.	106
Figura 93. Cuadro de factores de esfuerzo tricapa H=0,25.	107
Figura 94. Esfuerzos en los puntos críticos.	115
Figura 95. Porcentaje de daño por fatiga y ahuellamiento.	119

RESUMEN

En el medio se carece de una guía del software WESLEA, para la comprobación del diseño de pavimentos flexibles, por lo que optan por métodos tradicionales, los cuales toman demasiado tiempo y pueden llegar a ser confusos.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una guía de manejo del Software “WESLEA”, mediante un ejemplo práctico, que permita la correcta aplicación del Software, teniendo en cuenta la importancia de un software de este tipo para la comprobación del diseño de pavimentos flexibles, para estudiantes y profesionales de la ingeniería civil. Al contar con esta guía práctica, tendrán una herramienta que les facilitará la elaboración de diseños que incluyan pavimentos flexibles.

Este es un software de análisis mecánico que indica cómo responde el pavimento cuando actúan las cargas de los neumáticos, la respuesta que se obtiene del pavimento se define como esfuerzo, deformación y desplazamiento, resultados útiles para predecir la vida útil del pavimento en términos de fatiga y ahuellamiento.

En el presente trabajo también se comparó los resultados obtenidos mediante el software “WESLEA” con los diseños tradicionales, concluyendo que para el diseño propuesto para el ejercicio práctico propuesto no existirá daño por fatiga y ahuellamiento, la variación de los resultados obtenidos con el método tradicional no se considera significativa.

Palabras Claves

Guía, manual, software weslea, pavimentos flexibles.

ABSTRACT

In the environment there is a lack of a WESLEA software guide to verify the design of flexible pavements, so they opt for traditional methods, which take too much time and can become confusing. The objective of this work is to develop a management guide for the "WESLEA" Software, through a practical example, which allows the correct application of the Software, taking into account the importance of a software of this type for the verification of the design of flexible pavements, for students and professionals of civil engineering. By having this practical guide, they will have a tool that will facilitate the development of designs that include flexible pavements. This is a mechanical analysis software that indicates how the pavement responds when the tire loads act, the response obtained from the pavement is defined as stress, deformation and displacement, useful results to predict the useful life of the pavement in terms of fatigue and rutting. In the present work, the results obtained through the "WESLEA" software were also compared with the traditional designs, concluding that for the design proposed for the proposed practical exercise there will be no damage due to fatigue and rutting, the variation of the results obtained with the traditional method. is not considered significant.

Keywords

Guide, manual, weslea software, flexible pavements.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El software WESLEA (Waterways Experimental Station Layered Elastic Analysis) fue desarrollado en los Estados Unidos. Permite modelar pavimentos flexibles con un máximo de 5 capas y con configuraciones de tránsito para ejes direccionales, ejes duales, ejes tandem y ejes tridem.

WESLEA es un software de análisis mecánico de pavimentos que calcula como responde el pavimento cuando las cargas de los neumáticos actúan sobre este. La respuesta que se obtiene del pavimento se define como esfuerzo, deformación y desplazamiento. Estos resultados se pueden utilizar para predecir la vida útil del pavimento en términos de fatiga y ahuellamiento.

Este software es de carácter empírico mecanicista, adopta un modelo mecanicista que toma en cuenta los esfuerzos y deformaciones que permite dar una predicción más acertada del comportamiento del pavimento; también tiene un componente empírico para la determinación de la fatiga y ahuellamiento mediante el uso de ecuaciones que se han obtenido empíricamente para saber si estos esfuerzos y deformaciones son admisibles. (Mendez, 2020)

1.2. PROBLEMA DE ESTUDIO

1.2.1. Antecedentes

En el medio nacional se carece de una guía para la aplicación del software WESLEA, para la comprobación del cálculo y modelación de pavimentos flexibles, por lo que tanto estudiantes, como profesionales optan por métodos tradicionales, los cuales toman demasiado tiempo y pueden llegar a ser confusos. Esto genera, que se tarde mucho tiempo en realizar la comprobación del diseño de un pavimento flexible y tener varias alternativas que se puedan ajustar a sus proyectos.

Los estudiantes al desconocer el uso de este software se les hace complicado realizar un diseño de pavimentos flexibles, pudiendo existir incongruencias a nivel del diseño.

¿Cuál sería la mejor metodología para adoptarla y que describa de mejor manera el uso del software “WESLEA”?

¿Por qué se desaprovecha la utilidad del software “WESLEA” en el diseño de pavimentos flexibles?

1.2.2. Importancia y Alcance

El uso del software WESLEA, se utiliza específicamente en la materia de Diseño Vial de sexto semestre de la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad Politécnica Salesiana, en la comprobación del diseño de pavimentos flexibles, por lo tanto, todos los estudiantes realizan diseños de pavimentos a modo de aprendizaje, pero se desaprovecha este software que es de gran utilidad para solucionar proyectos en los que se usa pavimentos flexibles, ya que son escenarios que en un futuro se presentarían en el ámbito laboral.

Al contar con una guía práctica, el estudiante tendrá una herramienta de aprendizaje que brinda la posibilidad de comprobar el diseño de un pavimento flexible, para que las características sean en función de las condiciones reales que exponga el proyecto. Al poder contar con una guía para el fácil y correcto uso del software se lograría mejorar el planteamiento del diseño en base a las condiciones reales del terreno.

1.2.3. Delimitación

Este proyecto está enfocado en brindar un recurso puntual y eficiente, para el uso del software “WESLEA”, dirigido a la comunidad universitaria y/o profesional de la carrera de Ingeniería Civil, para la elaboración de diseños viales que incluyan pavimentos flexibles.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Ecuador desarrolla casi la totalidad de su comercio, por medio de vías terrestres, convirtiéndose estas en parte del desarrollo del país, es por ello que hay la necesidad de implementar una guía del software weslea para la comprobación del método AASHTO 93 en pavimentos flexibles de fácil y rápida aplicación, que permitan un diseño óptimo.

El presente proyecto propone soluciones prácticas para poder comprobar el diseño de pavimentos flexibles, debido que en el medio nacional no existen tales guías del uso de este software y que, además en la malla curricular de Ingeniería Civil no se llega a aprender correctamente el uso del software WESLEA, por lo tanto es importante que a nivel académico se pueda contar con el uso de esta opción para que el estudiante cuente con herramientas que le permitan ejecutar proyectos donde se necesiten pavimentos flexibles, de modo que una de las ventajas que brinda este software es, que ofrece resultados de forma rápida y confiables.

A través de este trabajo, el alumnado y/o proyectistas podrán llevar a cabo el correcto diseño y comprobación de pavimentos flexibles que se presenten en nuestro país con mayor rapidez y facilidad.

Este proyecto es factible porque se cuenta con los conocimientos teóricos y prácticos que han adquirido a lo largo de la carrera de Ingeniería Civil. Además, se dispone del programa. Un punto a destacar es que la Universidad Politécnica Salesiana dispone de laboratorios computacionales donde se puede usar el software “WESLEA”, esto facilitará a los estudiantes el uso de este software.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar una guía de manejo del Software “WESLEA”, mediante un ejemplo práctico, que permita la correcta aplicación del Software.

1.4.2. Objetivos Específicos

Analizar las partes que componen el software “WESLEA” mediante el uso de sus funciones, para lograr comprender su correcta aplicación de manera clara y didáctica.

Evaluar el alcance que posee el software “WESLEA”, mediante el análisis de sus características, para una aplicación eficiente y productiva en el diseño vial.

Comparar los resultados obtenidos mediante el software “WESLEA” con los diseños tradicionales.

Desarrollar una metodología ágil y práctica sobre el uso del software “WESLEA”

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Estructura de la vía

Sub-base

Se denomina Sub-base a la capa que forma parte de la estructura del pavimento que se ubica por debajo de la capa de base. La capacidad de soporte de esta capa será de $CBR > 30\%$. (Ministerio de Obras Públicas, 2002)

Base

Es la capa inferior a la de rodadura, que sostiene, distribuye y transmite las cargas ocasionadas por el tránsito. A diferencia de la Sub-base la capacidad de soporte de esta capa será de $CBR > 80\%$ caso contrario deberá ser tratada con asfalto, cal o cemento. (Ministerio de Obras Públicas, 2002)

Pavimento

Estructura construida sobre la subrasante de la vía para resistir y distribuir los esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general está conformada por una capa de rodadura, base y subbase. (Ministerio de Economía y Finanzas, 2015)

Otra definición es que el pavimento es la estructura de las vías de comunicación terrestre formada por una o más capas de materiales elaborados o no colocados sobre el terreno acondicionado que tiene como función permitir el tránsito de vehículos:

- Con seguridad.
- Con comodidad
- Con el costo óptimo de operación
- Superficie uniforme.
- Superficie impermeable.

- Color y textura adecuados.
- Resistencia a la repetición de cargas.
- Resistencia a la acción del medio ambiente.
- Que no transmita a las capas inferiores esfuerzos mayores a su resistencia. (Giordani & Leone, S.f)

Propiedades que debe Reunir un Pavimento

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de la intemperie.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior que influye en el entorno debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico. Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito. (Mocondino, 2020)

2.2. Tipos de pavimentos

Los pavimentos se pueden diferenciar en cuestión de propiedades, por ejemplo, en la elasticidad que tienen y la capacidad para deformarse. Esas diferencias vienen de su estructura y los materiales que se usan en su construcción. Entre estos podemos enlistar:

- ✓ Pavimentos rígidos
- ✓ Pavimentos flexibles
- ✓ Pavimentos semirrígidos
- ✓ Pavimentos articulados. (Mocondino, 2020)

2.3. Pavimento flexible

Los pavimentos flexibles son los más utilizados en vías ya que se adaptan mejor al frío, al calor o a cualquier otra condición que pueda llegar a afectar en la conducción de los usuarios de una vía. Disponen de varias capas de asfalto que soportan las deformaciones de modo que tras librarse de la carga recuperan su estado inicial.

El pavimento flexible es el que se emplea de forma mayoritaria en las carreteras, en cualquier lugar en el que pueda haber un tráfico intenso de vehículos sea carretera o no como un parking, siempre habrá que apostar por este tipo de pavimento. Los motivos son varios ya que se trata del pavimento que mejor soporta el desgaste de la rodadura de los vehículos, pero también es el que mayor adherencia da a los neumáticos por lo que cumple con los más altos estándares de seguridad (ONROAD, 2023)

2.4. Diseño de Pavimento Flexible

Para el diseño del pavimento flexible se pueden emplear los siguientes métodos:
Método AASHTO 93.

El método AASHTO-1993 para el diseño de pavimentos flexibles, el cual se basa primordialmente en identificar un “número estructural (SN)” para el pavimento que pueda soportar el nivel de carga solicitado.

Para determinar el número estructural, el método se apoya en una ecuación que relaciona los coeficientes, con sus respectivos números estructurales, los cuales se calculan con ayuda de un software, AASHTO 93 mismo que requiere datos de entrada como número de ejes equivalentes, el rango de serviciabilidad, la confiabilidad y el módulo resiliente de la capa a analizar.

Por otro lado, también se usa el Método Racional que es un método analítico que tiene en cuenta el estado de esfuerzo y deformación que experimentan las capas que conforman la estructura del pavimento influyen en el comportamiento del mismo. Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones, se emplean programas de computador disponibles desde la década de los 60's.

En estos programas se introducen la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales (por lo general el módulo elástico y la relación de Poisson) y el espesor de las capas del pavimento con el fin de obtener los estados de esfuerzos y deformación.

Una vez calculados estos estados se comparan con aquellos que admite el pavimento para la vida útil proyectada, y en un procedimiento de ensayo y error (aumentando o disminuyendo por lo general los espesores de capas) se dimensionan las capas que conformarán la estructura de pavimento.

La metodología racional busca aplicar teorías multicapa elástica para analizar el comportamiento y establecer los materiales y espesores necesarios. (Aristizabal, Hoyos, Gil, Gómez, & Gómez, 2014)

2.5. Software para la comprobación del diseño de Pavimentos Flexibles

Existen varios softwares que son usados para el diseño de pavimentos flexibles desarrollados por distintos autores entre estos podemos mencionar: Bisar, Dispav, Weslea, entre otros.

2.6. Software WESLEA

WESLEA para Windows es un programa de análisis de pavimento mecánico que puede calcular la respuesta del pavimento a las cargas de neumáticos aplicadas. (Cruz & Escobar, 2019)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo de Investigación

En este proyecto se usa una investigación descriptiva, puesto que, se detallarán las características y funciones del software “WESLEA”, en un entorno de figuras y pasos, para el posterior diseño de pavimentos flexibles. Según Borja Suárez (2012), “Una de las características principales de la investigación descriptiva es la capacidad para seleccionar las características fundamentales del objeto de estudio y su descripción detallada de las partes, categorías o clases de dicho objeto” (p. 13). Por lo cual, se toma este tipo de investigación como la mejor para el desarrollo del proyecto.

3.2. Método

El método a utilizarse es el analítico ya que, se va a descomponer el objeto de estudio, separándolo en partes con el propósito de describir su proceso de funcionamiento, para el diseño de pavimentos flexibles. Tal como postula Pascuas Rengifo (2014), el método analítico “es un método de investigación, que consiste en descomponer el todo en sus partes, con el único fin de observar la naturaleza y los efectos del fenómeno” (p. 21). Por lo cual es viable la separación por partes y su correspondiente estudio.

3.3. Técnicas de Recolección de Información

El proyecto se realizará mediante la técnica de fichaje; es decir, se empleará un diagrama de flujo y la descripción narrativa con imágenes puesto que, el manejo de estas técnicas permitirá desarrollar de mejor manera una guía de diseño a través de procesos.

3.4. Proceso Técnico de Ingeniería Civil

Se empezará la guía con la introducción al software, con la descripción de cada espacio de trabajo. Para la descripción de cada paso se registrará de manera gráfica las funciones y

características de cada apartado principal que se necesita, para el diseño. Se definirá cuáles son los conceptos básicos para la correcta utilización del software, a través de la descripción narrativa con imágenes. Para llevar a cabo el inicio del diseño, se va a evaluar un ejemplo.

Al final, se crea los reportes dando por finalizado todos los procedimientos que tendrá la guía.

CAPÍTULO IV

PROPUESTA GUÍA PRÁCTICA PARA LA APLICACIÓN DEL SOFTWARE “WESLEA”, PARA EL CÁLCULO Y MODELACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

4.1. PARTE 1: INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE WESLEA

Introducción de la interfaz del software

Figura 1.

Interfaz inicial software WESLEA.



Nota. La ventana General del Software, donde se encuentra el menú principal que da acceso a cada una de las pantallas de entrada. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Siempre al iniciar el software WESLEA debe seleccionar SI (Métrico) en el menú Unidades, ya que estas unidades son las que se usa comúnmente en nuestro país, como se indica en la figura 2.

Figura 2.

Unidades en software WESLEA.



Nota. Las unidades en el Sistema Inglés y Métrico. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Los menús a los que podemos acceder en este software son cinco, como se observa en la figura 3:

- ✓ General.
- ✓ Input (Entrada).
- ✓ Output (Salida).
- ✓ Units (Unidades).
- ✓ Help (Ayuda).

Menús del software

Figura 3.

Interfaz inicial software WESLEA



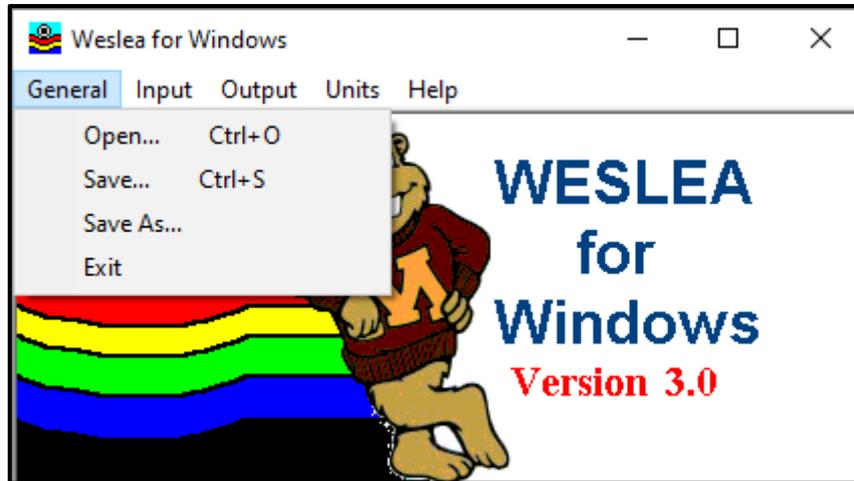
Nota. Los menús del Software Weslea. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

- ✓ **Open (Abrir) Ctrl+O:** Permite abrir archivos del software que tengamos de trabajos realizados anteriormente o archivos realizados por otras personas.
- ✓ **Save (Guardar) Ctrl+S:** Guarda en el archivo que se está trabajando los cambios que se vayan realizando en el software.
- ✓ **Save As (Guardar Como):** Esta opción permite guardar el archivo con el nombre que nos parezca conveniente o que sirva para localizar el archivo con facilidad.
- ✓ **Exit (Salir):** Al presionar esta opción se sale del Software.

General

Figura 4.

Pestaña general Software WESLEA.



Nota. Las opciones de la pestaña General. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Input (Ingresos)

En este menú el usuario debe introducir tres entradas principales:

- ✓ Structure (Estructura)
- ✓ Loads (Condiciones de Carga)
- ✓ Evaluation (Evaluación)

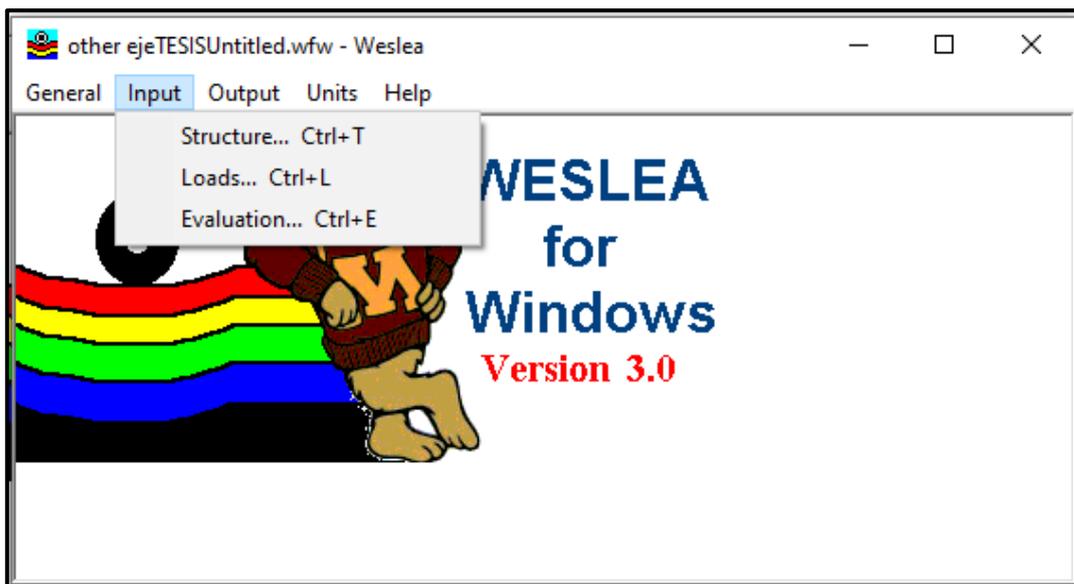
Los datos que se requiere ingresar en el Software WESLEA son los siguientes:

- Propiedades de los materiales que constituyen cada una de las capas.
 - ✓ Módulo de Elasticidad (E).
 - ✓ Relación de Poisson (μ).
- Espesores de las capas que conforman el pavimento.
- Condiciones de Carga.
 - ✓ Magnitud de la carga del neumático (P).
 - ✓ Radio del área circular formada por el contacto del neumático con el pavimento (a).

- ✓ Presión de contacto (Q).
- ✓ Ubicación en la superficie (coordenadas x, y).
- Ubicación de los puntos que se van a analizar los esfuerzos y deformaciones (coordenadas x, y, z).

Figura 5.

Input software WESLEA.



Nota. El menú de la pestaña input. Fuente: Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

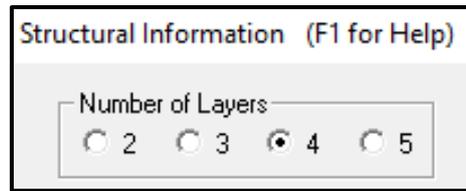
Structure (Estructura) Ctrl+T:

En esta opción se procede a definir la estructura del pavimento a analizar, los datos concretos que se utilizan se describen a continuación en la figura 6.

Seleccione el número de capas.

Figura 6.

Información Estructural.



Nota. Se ingresa el número de capas del Software Weslea. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

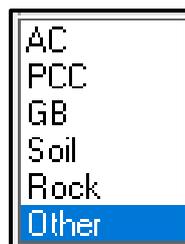
Por cada una de las capas que conforman el pavimento, especifique:

- **Material Type (Tipo de material)**

Aquí se procede a escoger el tipo de material a utilizar para cada capa, los materiales están relacionados al módulo y relación de Poisson como se aprecia en la figura 7.

Figura 7.

Tipo de material software WESLEA



Nota. El tipo de material a utilizar para cada capa. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

- ✓ **AC:** Asphalt Concrete (Carpeta Asfáltica)
- ✓ **PCC:** Portland Cement Concrete (Concreto de Cemento Portland)
- ✓ **GB:** Granular Basis (Base Granular)

- ✓ **Soil:** Suelo
- ✓ **Rock:** Roca
- ✓ **Other:** Otro

- **Modulus (Módulo de Elasticidad)**

El módulo es la rigidez de un material expresada en MPa. Al escoger un material, el programa selecciona el rango y el valor óptimos del módulo. Cualquier valor en el rango se puede utilizar para el módulo.

Tabla 1.

Rango de valores del Módulo.

Material	Modulo mínimo (MPa)	Modulo por defecto (MPa)	Modulo máximo (MPa)
AC	551.6	3447.4	13789.5
PCC	13789.5	27579	48263.3
GB	34.5	137.9	344.7
Soil	20.7	82.7	206.8
Rock	3447.4	6894.8	27579
Other	0	6894.8	68947.6

Nota. Los módulos de elasticidad para algunos materiales. Elaborado por: Los autores.

- **Poisson's Ratio (Relación de Poisson)**

El módulo dinámico y la relación de Poisson de las mezclas asfálticas, se constituyen en un parámetro importante dentro del diseño por métodos empírico-mecanistas, pues hacen parte del algoritmo que ayuda a definir el espesor de cada capa. El comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas está definido por la variación de la temperatura y frecuencia de aplicación de carga, incluso por las propiedades del asfalto y el agregado utilizado en la fabricación de las mismas. (Universidad EAFIT, 2006)

Este parámetro nos ayuda a describir como se deforma el material por la acción de las cargas.

Tabla 2.

Rango de Valores de la Relación de Poisson.

Material	Poisson mínimo	Poisson por defecto	Poisson máximo
AC	0.15	0.35	0.40
PCC	0.14	0.18	0.25
GB	0.30	0.40	0.45
Soil	0.20	0.45	0.50
Rock	0.10	0.15	0.25
Other	0.10	0.35	0.50

Nota. Los valores de relación de Poisson para algunos materiales. Elaborado por: Los autores.

Thickness (Espesor)

En esta parte especificar los espesores de cada capa que se obtuvieron mediante el diseño de espesores por el Método AASHTO.

Slip Condition (Condición de deslizamiento)

En este menú podemos escoger entre dos opciones:

- Slip = 1 Full Adhesion (No slip) (Sin deslizamiento).
- Slip = 0 No Adhesion (Full Slip) (Deslizamiento Completo).

Figura 8

Información estructural en software WESLEA.

Structural Information (F1 for Help)

Number of Layers
 2 3 4 5

	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
Material Type	AC	GB	GB	Soil	Soil
Min Modulus, MPa	551.6	20.7	20.7	20.7	20.7
Layer Modulus, MPa	2757.9	200	117.2	120.6	120.6
Max Modulus, MPa	13789.5	206.8	206.8	206.8	206.8
Poisson's Ratio	0.35	0.4	0.4	0.45	0.45
Min - Max	0.15- 0.4	0.2- 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2- 0.5
Thickness, cm	15.01	16	16.99	2537.46	Infinite
Slip (0 or 1) 1 = Full Adhesion 0 = Full Slip		1	1	1	1

OK Cancel

Nota. Se ingresa los datos del diseño por AASHTO 93. Elaborado por los autores. A través del Software Weslea.

Loads (Cargas).

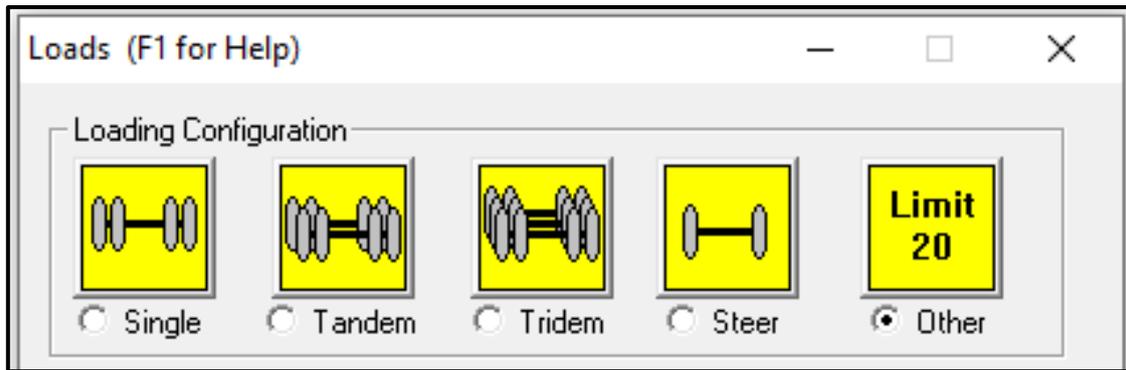
El valor de la carga se obtiene del peso del espectro de carga dividida entre el número total de neumáticos en la configuración de eje que se va a analizar.

Las cargas de los neumáticos sobre la superficie de la carretera se expresan de una manera específica. Para la mayoría de los ejes, solo es necesario modelar la mitad del eje debido a la simetría, como se muestra a continuación.

El software posee cuatro configuraciones de carga estándar. Al elegir una configuración estándar, se definirá automáticamente la cantidad de llantas en la configuración y su espacio.

Figura 9.

Tipos de cargas en software WESLEA.



Nota. La quinta configuración (Otra) debe ingresarse manualmente. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

- Single (Simple).
- Tándem.
- Tridem.
- Sterr (Dirigir).
- Other (Otro).

Figura 10.

Número de aplicaciones de carga en software WESLEA.



Nota. Ingresar el número total de aplicaciones de la carga en la ventana. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Al seleccionar la casilla UNIFORME, se aplica la carga o presión mostrada a todos los neumáticos en la configuración. Si se quita la marca a la casilla de verificación ÚNICO, puede ingresar diferentes cargas y presiones.

Figura 11.

Posición y magnitud de cargas en software WESLEA.

Location Data		Load Data	
X	<input type="text" value="0"/> cm	Uniform?	<input checked="" type="checkbox"/>
Y	<input type="text" value="0"/> cm	Load Magnitude	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="text" value="20"/> kN
		Tire Pressure	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="text" value="690.03"/> kPa

Nota. Cada neumático debe tener una carga, la presión de los neumáticos, la posición x y la posición. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

El ID de carga que se muestra a continuación:

Figura 12.

Número de carga en software WESLEA.

Number of Loads in Configuration		
Number of Loads	<input type="text" value="2"/>	
Load number	1 of	2 total loads.

Nota. Localiza el número de capa de análisis. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 13.

Botones de control de cargas en software WESLEA.

Use los botones Next load, Previous Load para ver cada carga en la configuración. Los botones se muestran en la figura 13.



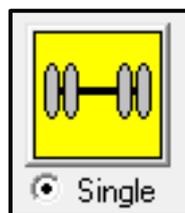
Nota. Los botones de carga Siguiente o Anterior para ver cada carga en la configuración.

Fuente: Software Weslea.

Figura 14.

Eje simple con llantas dobles software WESLEA.

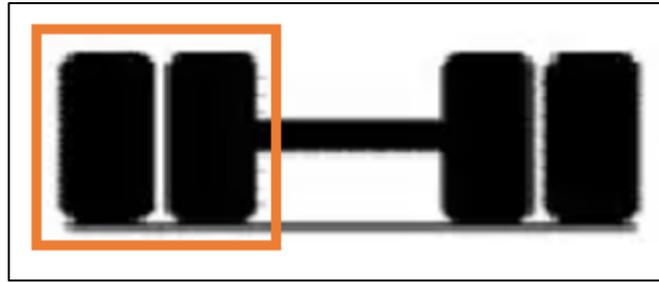
Eje Simple con Llantas Dobles.



Nota. El ícono del eje simple con llantas dobles en el software. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 15.

Esquema eje tándem.



Nota. Se analiza solo los neumáticos de un lado del eje. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 16.

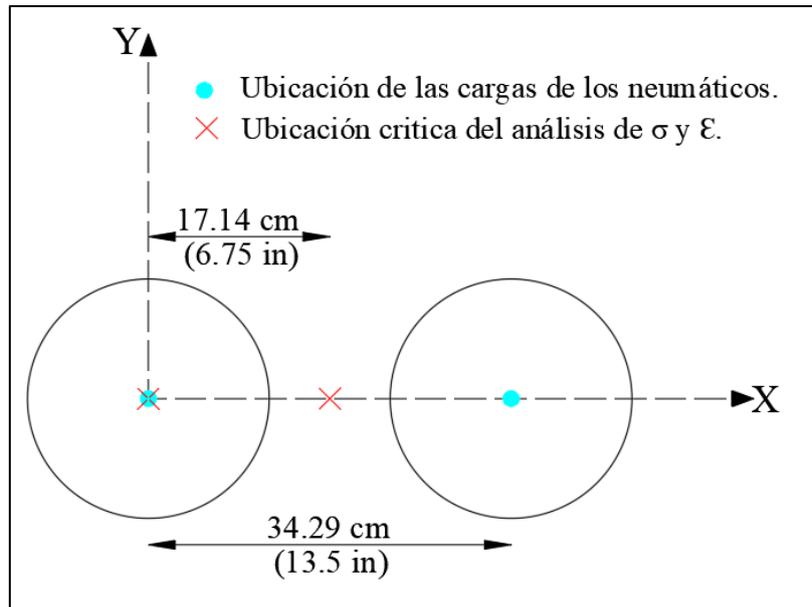
Distancia de llantas y ubicaciones críticas eje simple software WESLEA.

Number of Loads in Configuration Number of Loads <input type="text" value="2"/>		Number of Loads in Configuration Number of Loads <input type="text" value="2"/>	
Load number 1 of 2 total loads.		Load number 2 of 2 total loads.	
Location Data X <input type="text" value="0"/> in. Y <input type="text" value="0"/> in.		Load Data Load Magnitude Tire Pressure	Location Data X <input type="text" value="13.5"/> in. Y <input type="text" value="0"/> in.

Nota. Se ingresa las distancias de llantas y ubicaciones críticas. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 17.

Esquema ubicación de carga de neumáticos eje simple.



Nota. Idealización de las ubicaciones de las cargas de los neumáticos. Elaborado por: Los autores.

Eje tándem con neumáticos dobles

Figura 18.

Eje tándem.



Nota. El ícono del eje tándem con neumáticos dobles. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 19.

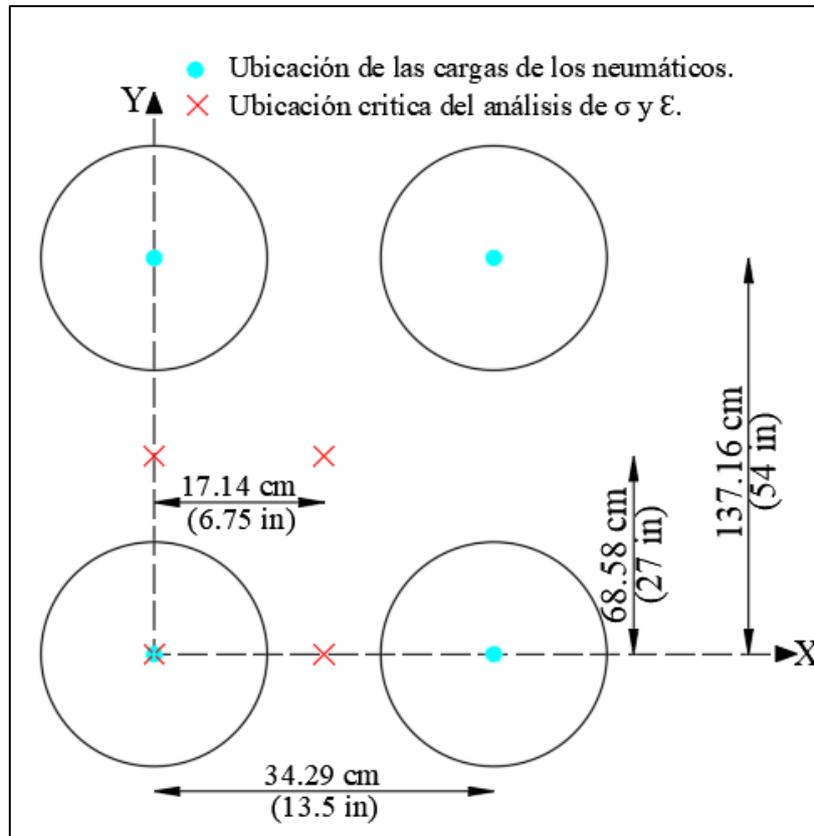
Distancia de llantas y ubicaciones críticas eje tándem software WESLEA.

Number of Loads in Configuration Number of Loads <input type="text" value="4"/> Load number 1 of 4 total loads.		Number of Loads in Configuration Number of Loads <input type="text" value="4"/> Load number 2 of 4 total loads.	
Location Data X <input type="text" value="0"/> in. Y <input type="text" value="0"/> in.	Load Data Uniform? <input checked="" type="checkbox"/> Load Magnitude <input checked="" type="checkbox"/> Tire Pressure <input checked="" type="checkbox"/>	Location Data X <input type="text" value="13.5"/> in. Y <input type="text" value="0"/> in.	Load Data Uniform? <input checked="" type="checkbox"/> Load Magnitude <input checked="" type="checkbox"/> Tire Pressure <input checked="" type="checkbox"/>
Number of Loads in Configuration Number of Loads <input type="text" value="4"/> Load number 3 of 4 total loads.		Number of Loads in Configuration Number of Loads <input type="text" value="4"/> Load number 4 of 4 total loads.	
Location Data X <input type="text" value="13.5"/> in. Y <input type="text" value="54"/> in.	Load Data Uniform? <input checked="" type="checkbox"/> Load Magnitude <input checked="" type="checkbox"/> Tire Pressure <input checked="" type="checkbox"/>	Location Data X <input type="text" value="0"/> in. Y <input type="text" value="54"/> in.	Load Data Uniform? <input checked="" type="checkbox"/> Load Magnitude <input checked="" type="checkbox"/> Tire Pressure <input checked="" type="checkbox"/>

Nota. La pantalla para ingresar las distancias de llantas y ubicaciones críticas. Elaborado por:
 Los autores a través del Software Weslea.

Figura 20.

Ubicación de las cargas de neumáticos eje tándem.



Nota. Idealización de las ubicaciones de las cargas de los neumáticos. Elaborado por: Los autores.

Eje trídem con neumáticos duales

Figura 21.

Eje trídem.



Nota. El ícono del eje trídem con neumáticos dobles. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 22.

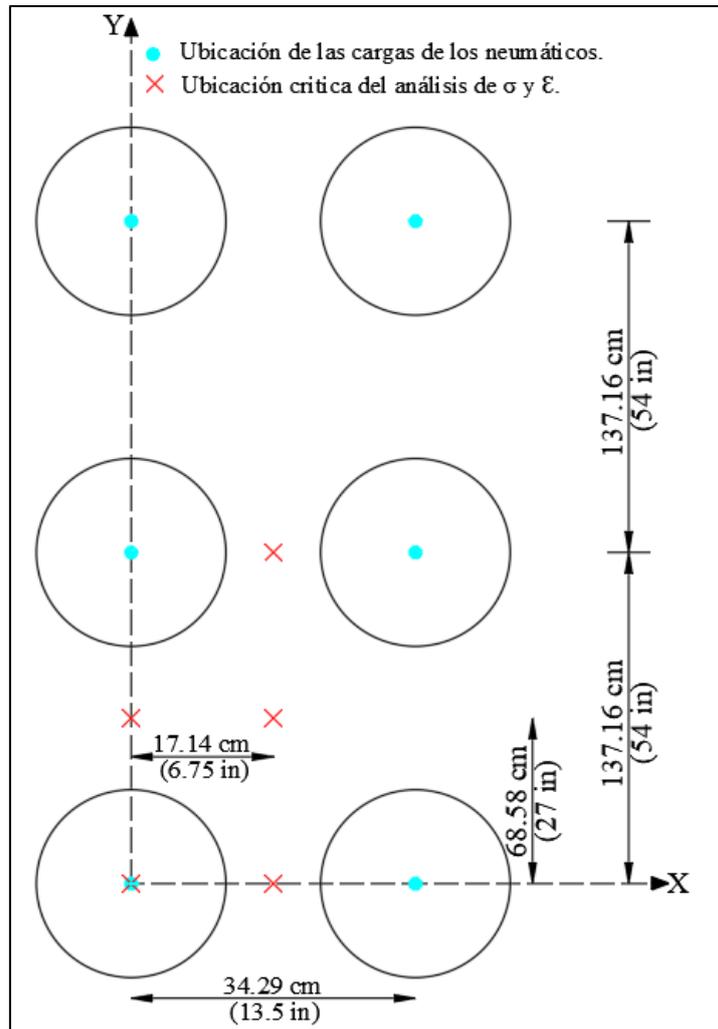
Distancia de llantas y ubicaciones críticas eje trídrem software WESLEA.

Load Number	X (in.)	Y (in.)
1 of 6 total loads.	0	0
2 of 6 total loads.	13.5	0
3 of 6 total loads.	13.5	54
4 of 6 total loads.	0	54
5 of 6 total loads.	0	108
6 of 6 total loads.	13.5	108

Nota. Se ingresa las distancias de llantas y ubicaciones críticas. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 23.

Ubicación de las cargas de los neumáticos eje trídem.

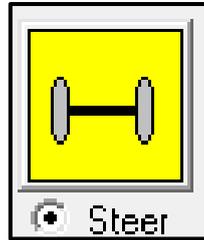


Nota. Idealización de las ubicaciones de las cargas de los neumáticos. Elaborado por: Los autores.

Eje de dirección con llantas simples

Figura 24.

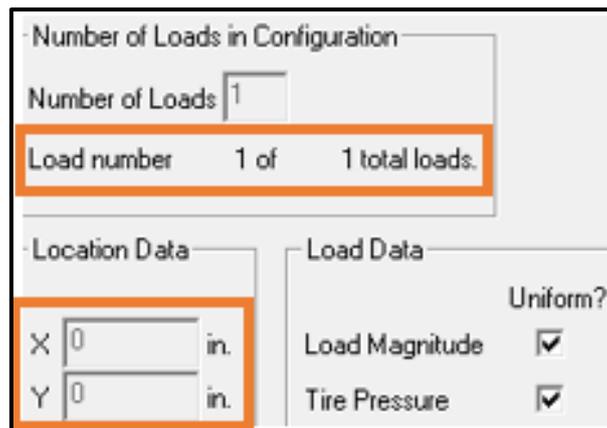
Eje simple ruedas simples.



Nota. El ícono del eje de dirección con llantas simples. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

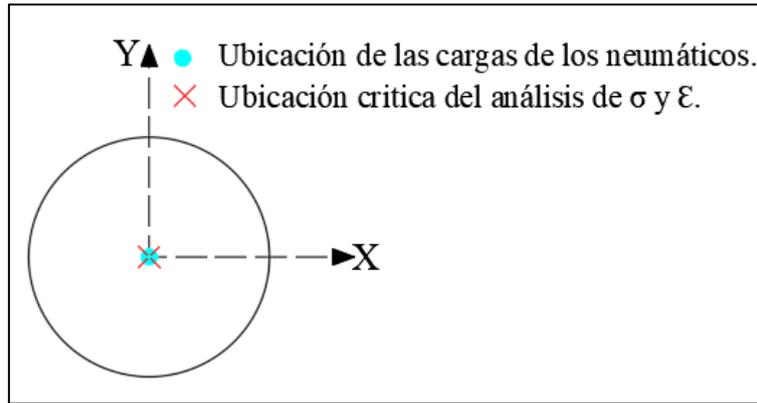
Figura 25.

Distancia de llantas y ubicaciones críticas eje simple rueda simple software WESLEA

The image is a screenshot of a software interface. At the top, there is a section titled "Number of Loads in Configuration" with a text box containing the number "1". Below this, a line of text reads "Load number 1 of 1 total loads." and is highlighted with an orange border. The interface is divided into two columns: "Location Data" and "Load Data". Under "Location Data", there are two input fields: "X" with the value "0" and "in." next to it, and "Y" with the value "0" and "in." next to it. Both of these input fields are highlighted with an orange border. Under "Load Data", there are two checked checkboxes: "Load Magnitude" and "Tire Pressure". To the right of these checkboxes is the label "Uniform?".

Nota. Se ingresa las distancias de llantas y ubicaciones críticas. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 26. Ubicación de las cargas de los neumáticos eje simple rueda simple.



Nota. Idealización de las ubicaciones de las cargas de los neumáticos. Elaborado por: Los autores.

Otros

Figura 27.

Otros ejes software WESLEA.

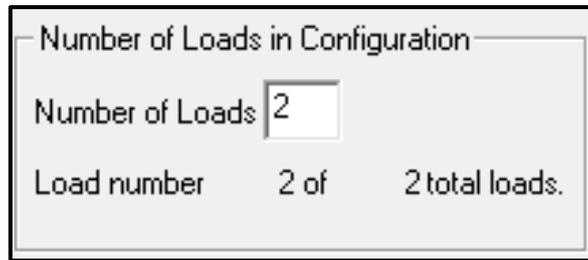


Nota. El ingreso para otros se programa manualmente. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Esta selección requiere que ingrese la información de la carga manualmente. Los siguientes pasos describen el proceso y proporcionan instrucciones sobre cómo crear la configuración. Puede ser útil dibujar primero un boceto de la configuración recomendada antes de ingresar información en el software.

Figura 28.

Número de cargas software WESLEA.



A screenshot of a software configuration window titled "Number of Loads in Configuration". It features a text input field containing the number "2". Below the input field, the text "Load number 2 of 2 total loads." is displayed.

Nota. Se Introduce el número de neumáticos en los ajustes (hasta 20). Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 29.

Número de aplicaciones de carga software WESLEA.



A screenshot of a software configuration window showing a text input field with the value "1000". The label "Total Number of Load Applications" is positioned to the left of the input field.

Nota. Se Ingresa el número total de aplicaciones de carga. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

- Posición X
- Posición Y
- Load magnitude (Valor de carga)
- Tire pressure (Presión de los neumáticos)

Figura 30.

Posición y magnitud de cargas software WESLEA

The image shows a software interface with two main sections: 'Location Data' and 'Load Data'.
Under 'Location Data', there are two input fields: 'X' with the value '0' and 'cm', and 'Y' with the value '0' and 'cm'.
Under 'Load Data', there is a 'Uniform?' label with a checked checkbox. Below it are two rows: 'Load Magnitude' with a checked checkbox, the value '20', and the unit 'kN'; and 'Tire Pressure' with a checked checkbox, the value '690', and the unit 'kPa'.

Nota. Se Introduce los datos de presión y carga. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Luego, toque para confirmar la entrada, seleccione Estimación en el menú Entrada e ingrese las posiciones clave para su configuración particular de rueda.

y Seleccione Ver salida en el menú Salida.

El programa tiene otras opciones de ejes predeterminadas que están desarrollados con los parámetros que rigen en Estados Unidos, por lo que se debe desarrollar una configuración propia.

Ejemplo de Configuración:

Se analiza un eje simple con llantas dobles, el número de cargas serán dos de los dos neumáticos del semieje, la carga para este ejemplo tendrá una magnitud de 80 kN, esta carga se divide para el numero de neumáticos que son cuatro, por lo que cada neumático tendría una carga de 20 kN.

El valor típico de la presión de inflado del neumático es de 690 kPa.

Para obtener la ubicación sobre la superficie de los puntos de análisis utilizar la ecuación, que básicamente es un esfuerzo que resulta al dividir la magnitud de la carga por neumático para el área de la carga circular.

$$Q = \frac{P}{\pi * a^2}$$

- ✓ Q: Presión de contacto.
- ✓ P: Magnitud de la carga por neumático.
- ✓ a: Radio del área de la carga circular.

Los valores conocidos son la presión de contacto (Q) y la magnitud de la carga por neumático (P), a partir de estos datos despejar de la ecuación 1. Presión de contacto, el valor del radio del área de la carga circular (a).

- ✓ $Q = 690 \text{ kPa} = 690 \text{ kN/m}^2$
- ✓ $P = 20 \text{ kN}$

$$690 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = \frac{20 \text{ kN}}{\pi * a^2}$$

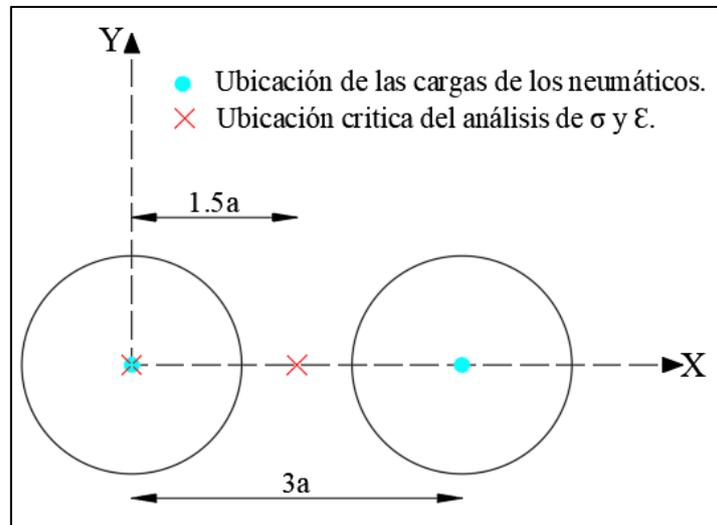
$$a = 0.096 \text{ m} = 9.6 \text{ cm}$$

$$3a = 28.8 \text{ cm}$$

Solo para este caso hay que realizar este análisis ya que para las otras cuatro configuraciones de carga el software posee una configuración que está definida.

Figura 31.

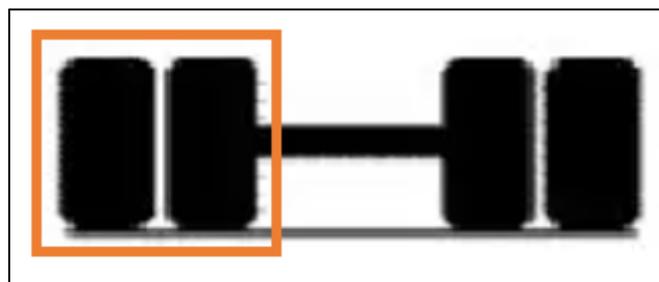
Ubicación de las cargas de los neumáticos.



Nota. Al escoger una de las configuraciones definidas el software definirá automáticamente el número de neumáticos y sus espacios. Elaborado por: Los autores.

Figura 32.

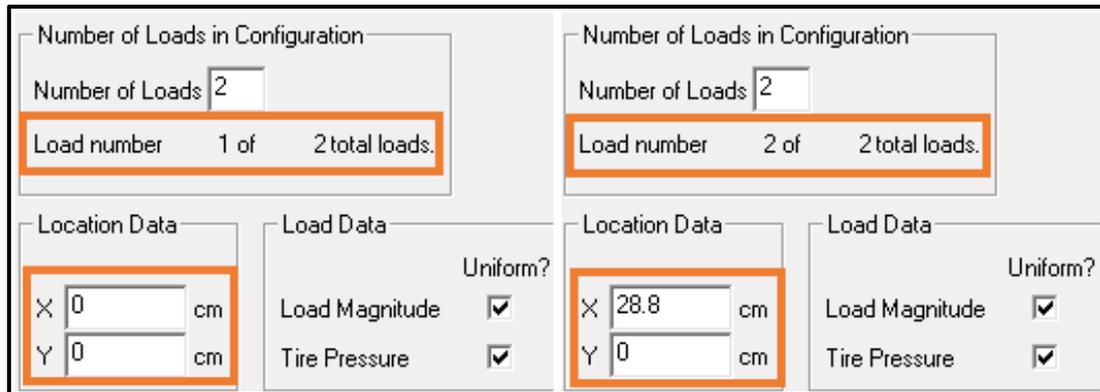
Esquema eje tándem.



Nota. Se ilustra el esquema de un eje tándem y marcado un solo lado de análisis. Elaborado por: Los autores.

Figura 33.

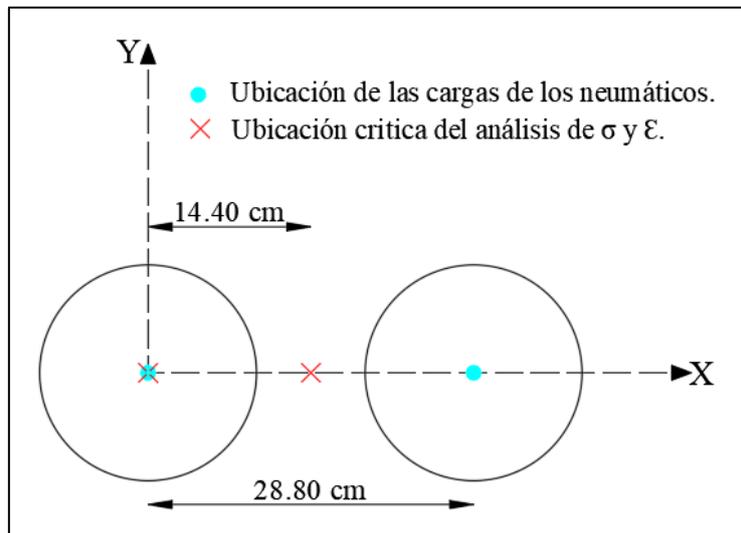
Distancia de llantas y ubicaciones críticas en software WESLEA.



Nota. Se muestra un ejemplo de distancia de llantas y ubicaciones críticas. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 34.

Ubicación de las cargas de los neumáticos.



Nota. Se muestra la ubicación de las cargas de los neumáticos. Elaborado por: Los autores.

Número total de aplicaciones de carga.

Es el número total de aplicaciones repetidas de la configuración de rueda especificada que experimentará el pavimento. Esto quiere decir que es el número de veces que se espera que se aplique el eje sobre el pavimento durante su vida útil como se muestra en la siguiente figura:

Figura 35.

Numero de aplicaciones de carga software WESLEA.



Nota. Se introduce el número de ESAL's. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Magnitud de la carga

Es el peso que está transmitiendo cada neumático al pavimento.

Presión de los neumáticos

Se supone que la presión de los neumáticos es la presión a la que están inflados los neumáticos. Un valor típico para neumáticos de camión es 100 Psi (690 kPa), este valor se utiliza en WESLEA para calcular el área de contacto entre el neumático y el pavimento. Tomamos el área como circular y se calcula mediante la ecuación:

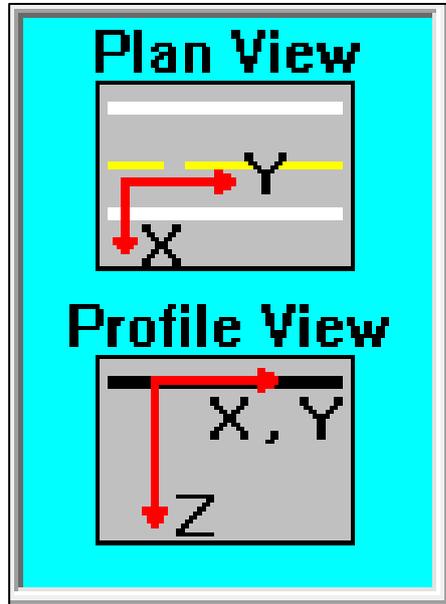
$$\text{Área de Contacto} = \frac{\text{Carga del Neumático}}{\text{Presión del Neumático}}$$

Sistema de coordenadas en WESLEA

X e Y definen el plano horizontal. Z define la posición vertical en el pavimento. Z positivo es hacia abajo. X se define transversalmente a través del pavimento (perpendicular al tráfico). Y se define longitudinalmente a través del pavimento (paralelo al tráfico).

Figura 36.

Sistema de coordenadas software WESLEA.



Nota. El origen se coloca directamente debajo de la primera carga de rueda en la configuración.

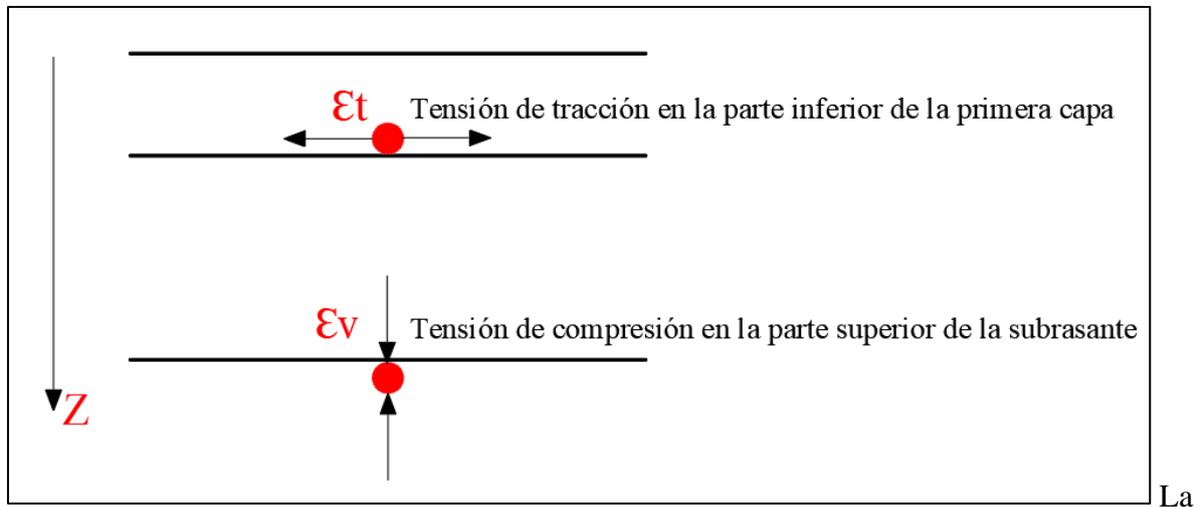
Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Ubicaciones críticas

Este cuadro de diálogo especifica las ubicaciones críticas en el pavimento. El esfuerzo, la deformación y la deflexión se determinarán en estos lugares para el conjunto dado de condiciones estructurales y de carga. En general, las ubicaciones verticales de interés se encuentran en la parte inferior de la primera capa y en la parte superior de la sub-rasante. La deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa 1 se utiliza para predecir la fatiga. La tensión de compresión vertical en la parte superior de la sub-rasante se utiliza para predecir la formación de surcos.

Figura 37.

Ubicaciones críticas software WESLEA.



Nota. Aquí se ilustran las ubicaciones. Elaborado por: Los autores

Las ubicaciones x, y generalmente se especifican directamente debajo de las llantas y en el punto medio entre las llantas. Estos lugares generalmente producirán la mayor tensión y experimentarán el mayor daño. Si se seleccionó una configuración de carga estándar (simple, tándem, tridem, direccional), las ubicaciones de evaluación están todas listas de forma predeterminada. Si se ingresó una configuración no estándar (Otro), se deben especificar las ubicaciones críticas.

Fatiga

Las grietas por fatiga se forman como resultado de tensiones y deformaciones repetidas en la parte inferior de la primera capa de pavimento, esto se expresa mediante la ecuación:

$$Nf = 2,83 * 10^{-6} \left(\frac{10^6}{\epsilon_t} \right)^{3,148}$$

Donde:

Nf = número de cargas repetidas bajo las condiciones estructurales actuales antes de que se forme una fisura por fatiga.

ϵt = máxima deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la primera capa provocada por una pasada de la configuración actual de la rueda, expresada en micro deformación.

Ahuellamiento

En WESLEA, la formación de surcos se atribuye a las tensiones aplicadas a la sub-rasante. Esto se calcula mediante la ecuación.

$$Nd = 1 * 10^{16} \left(\frac{1}{\epsilon v} \right)^{3,87}$$

Donde:

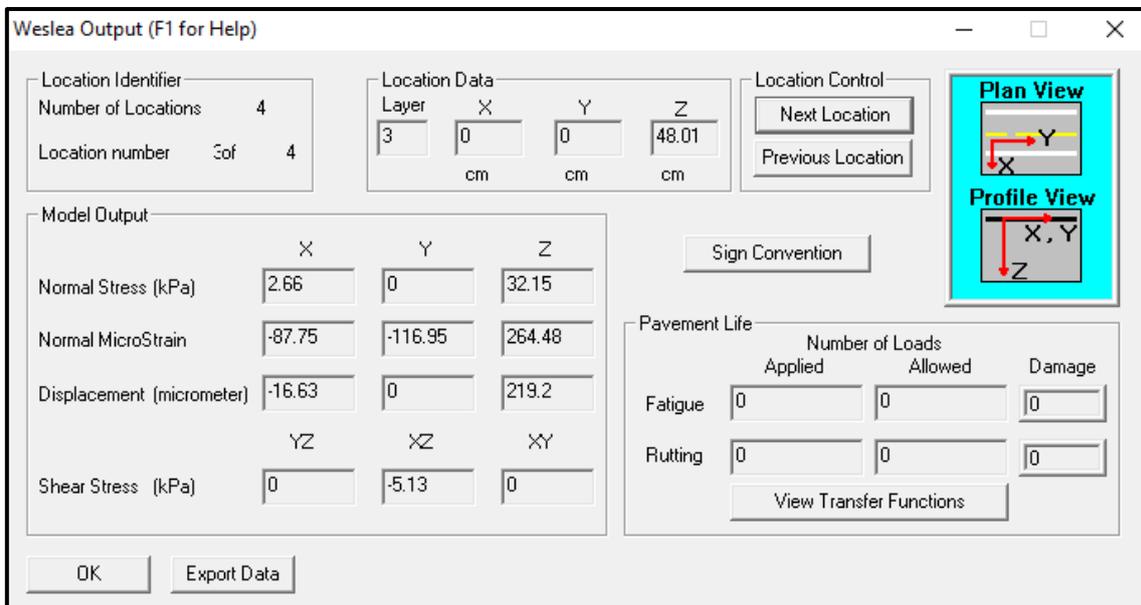
Nd = número de cargas repetidas bajo las condiciones estructurales actuales antes de que ocurra la falla por ahuellamiento.

ϵv = deformación por compresión vertical máxima en la parte superior de la sub-rasante causada por una pasada de la configuración actual de la rueda, expresada en micro deformación.

Output (Salida)

Figura 38.

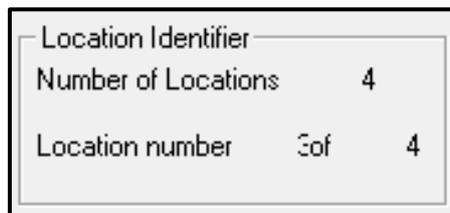
Output software WESLEA.



Nota. En este cuadro de diálogo contiene la salida del análisis mecanicista Weslea. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

El grupo Identificador de ubicación especifica cuántas ubicaciones críticas totales se ingresaron e indica qué ubicación se muestra actualmente como se muestra en la siguiente figura:

Figura 39. Número y ubicaciones de carga software WESLEA.



Nota. Aquí se muestra la localización de la capa en análisis. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 40.

Ubicación software WESLEA.

Location Data			
Layer	X	Y	Z
3	0	0	48.01
	cm	cm	cm

Nota. El grupo datos de ubicación indica la capa y las coordenadas x, y, z de la ubicación actual.

Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 41.

Botones de control de ubicaciones software WESLEA.

Location Control	
Next Location	
Previous Location	

Nota. Los botones de control de ubicación se pueden usar para ver cada ubicación especificada.

Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Figura 42. Datos de salida del software WESLEA.

Model Output			
	X	Y	Z
Normal Stress (kPa)	2.66	0	32.15
Normal MicroStrain	-87.75	-116.95	264.48
Displacement (micrometer)	-16.63	0	219.2
	YZ	XZ	XY
Shear Stress (kPa)	0	-5.13	0

Nota. El grupo Salida del modelo contiene los datos de respuesta del pavimento para la ubicación actual. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

El grupo de Vida del Pavimento indica el número de cargas aplicadas, el número de cargas admisibles por fatiga o ahuellamiento, y el daño relativo como se muestra en la siguiente figura:

Figura 43.

Grupo vida del pavimento software WESLEA.

	Number of Loads		Damage
	Applied	Allowed	
Fatigue	0	0	0
Rutting	0	0	0

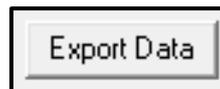
View Transfer Functions

Nota. La fatiga y ahuellamiento se puede calcular manualmente con las deformaciones obtenidas con el software weslea. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

El botón Exportar datos permite exportar los datos en un formato delimitado por tabuladores. Este botón se muestra en la siguiente figura:

Figura 44.

Botón exportar datos software WESLEA.



Nota. Exporta datos en formato exe. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Model Output (Salida del Modelo)

Esfuerzo normal

Esfuerzo del pavimento debido a la condición de carga aplicada (Psi o kPa). Convención de signos.

Normal MicroStrain

Deformación del pavimento debido a la condición de carga aplicada. Convención de signos

Desplazamiento

Desplazamiento del pavimento debido a la condición de carga aplicada (mili pulgadas o micrómetros).

Esfuerzo cortante

Esfuerzo cortante del pavimento debido a la condición de carga aplicada (Psi o kPa). Convención de signos

Convención de signos de tensión

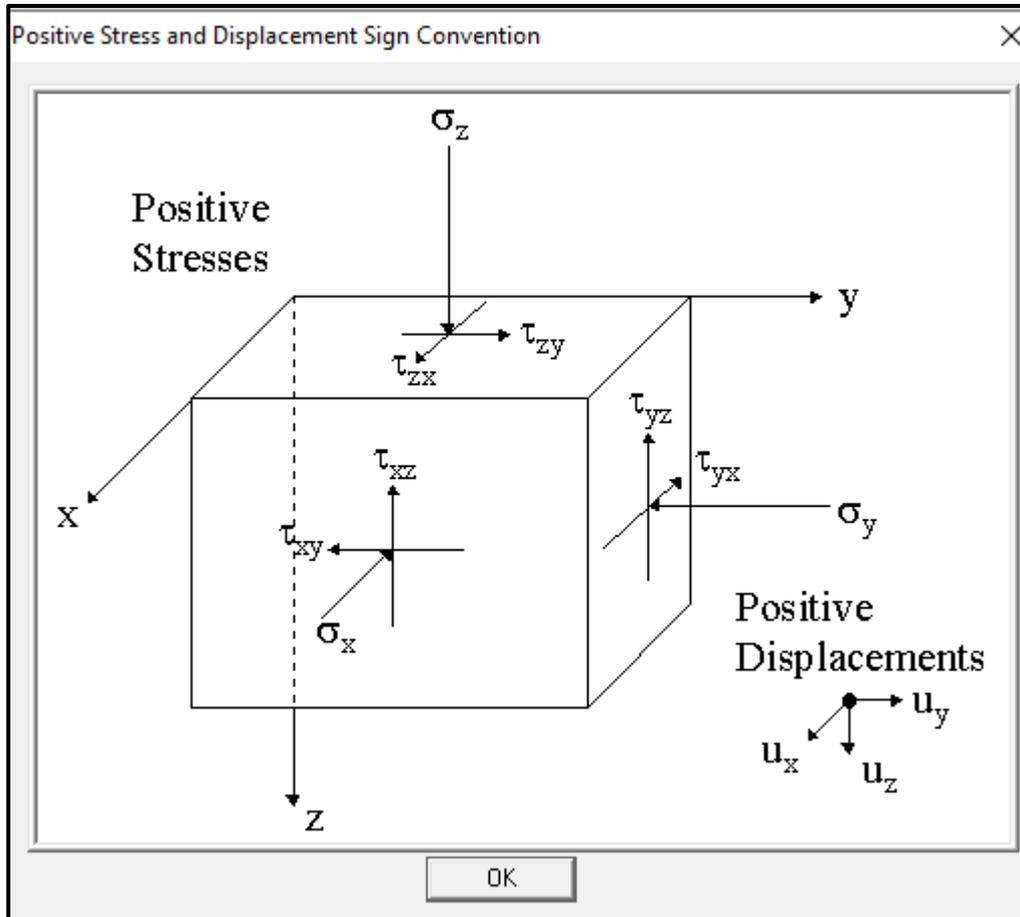
(-) = tensión.

(+) = compresión.

La figura 45 ilustra la condición de tensión positiva en un elemento además de los desplazamientos positivos:

Figura 45.

Convención de signos de esfuerzos.



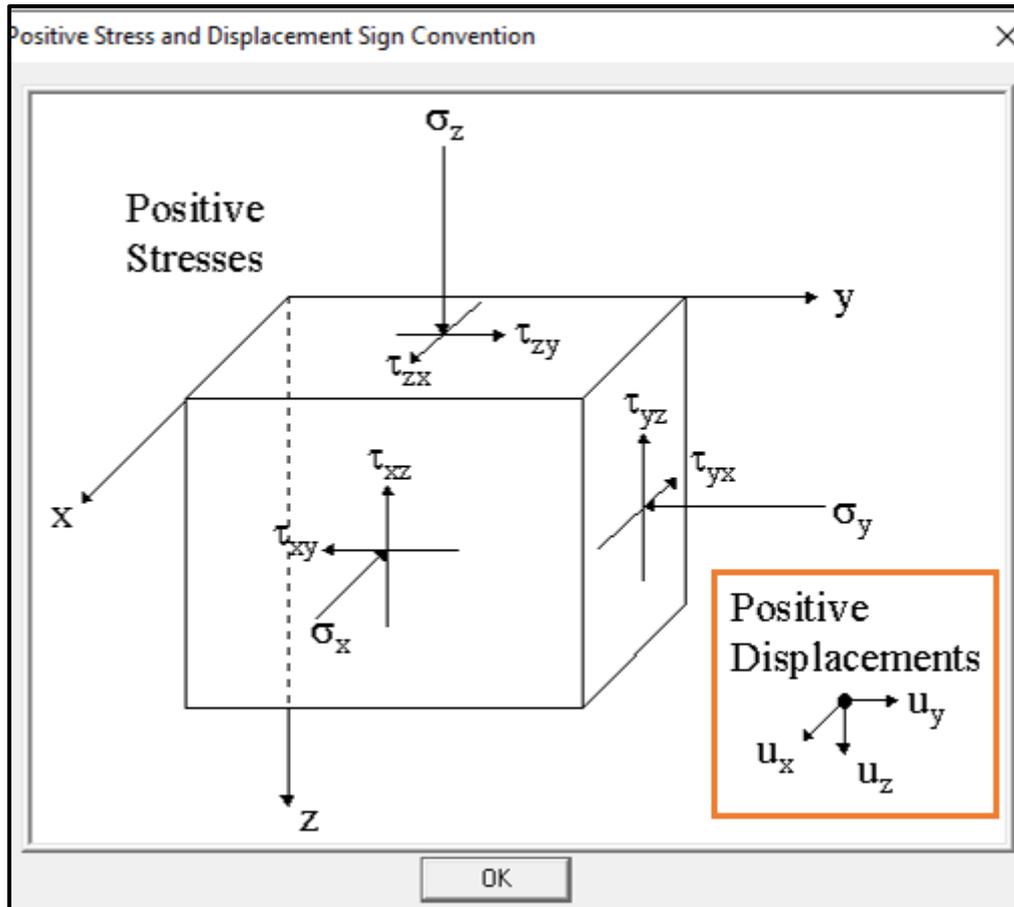
Nota. Se muestra la dirección de los esfuerzos positivos. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Convención de signos de desplazamiento

Los desplazamientos son positivos a lo largo de sus respectivos ejes, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 46.

Convención de signos de desplazamientos.



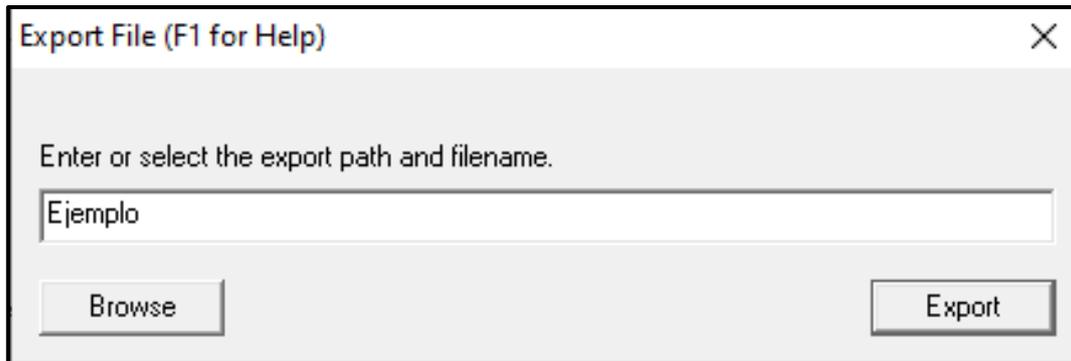
Nota. Se muestra la dirección de los desplazamientos positivos. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Export Data (Exportar Datos)

Introducir el nombre de archivo de la ruta en el cuadro de control de edición. El botón de exploración se puede usar para seleccionar fácilmente la unidad y el nombre de archivo deseados. Proporcionar la extensión ".xls" permitirá que el archivo se abra en Excel. Sin embargo, el archivo está delimitado por tabuladores y se puede abrir en cualquier tipo de hoja de cálculo o editor de texto. Tenga en cuenta que WESLEA para Windows no abrirá Excel automáticamente, el usuario debe hacer esto y luego abrir el archivo de datos exportado. Como el ejemplo de la figura siguiente:

Figura 47.

Exportar datos software WESLEA.



Nota. La extensión ".xls" permitirá que el archivo se abra en Excel. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Units (Unidades)

En esta sección se puede escoger entre el Sistema de Unidades Inglesas y el Sistema Internacional de Unidades, por lo general se utiliza el Sistema Internacional de Unidades como se muestra en la figura siguiente:

Figura 48.

Pestaña unidades software WESLEA.



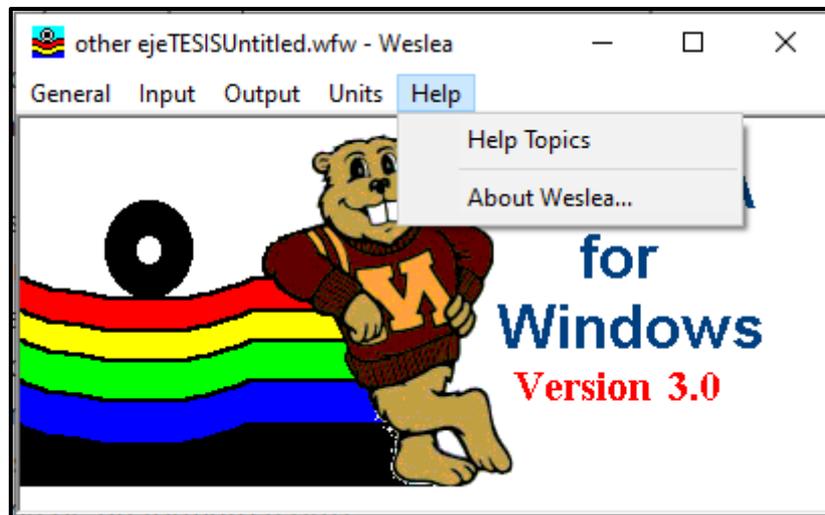
Nota. Se puede escoger entre Sistema inglés y SI. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Help (Ayuda)

En este menú se puede acceder a temas de ayuda del Software WESLEA y también tenemos información acerca de WESLEA como su versión, por quien fue desarrollada esta aplicación, etc.

Figura 49.

Pestaña ayuda software WESLEA.



Nota. En el menú se tiene pestaña de ayuda. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

4.2. PARTE 2: INTRODUCCIÓN DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN EL SOFTWARE WESLEA

Introducción de espesores y propiedades de las capas de la estructura vial

Ingresar los datos de la estructura, escogemos el menú Input, luego la opción Structure.

Number of Layers (Numero de Capas): Ingresar el número de capas que posee el pavimento a analizar, en este ejemplo son cuatro.

Material Type (Tipo de Material): AC = Concreto asfáltico, PCC = Concreto de cemento portland, GB = Base granular, Soil = Suelo, Rock = Roca, Otros.

Layer Modulos (Modulo de capa): Ingresar el módulo de cada capa en MPa.

Poisson's Ratio (Relación de Poisson): Ingresar la relación de Poisson de cada capa.

Thickness (Espesores): Ingresar los espesores de cada capa en centímetros.

Slip (Deslizamiento): Existen dos opciones 1 Full Adhesión (Adhesión Completa) y 0 Full Slip (Deslizamiento Completo).

Figura 50.

Introducción de espesores en software WESLEA.

	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
Number of Layers	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5				
Material Type	AC	GB	GB	Soil	Soil
Min Modulus, MPa	551.6	20.7	20.7	20.7	20.7
Layer Modulus, MPa	2757.9	200	117.2	79.9	79.9
Max Modulus, MPa	13789.5	206.8	206.8	206.8	206.8
Poisson's Ratio	0.35	0.4	0.4	0.45	0.45
Min - Max	0.15- 0.4	0.2- 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2- 0.5
Thickness, cm	15.01	16	16.99	2537.46	Infinite
Slip (0 or 1)		1	1	1	1
1 = Full Adhesion 0 = Full Slip					

Nota. Ejemplo de introducción de espesores en el software. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Introducción de cargas

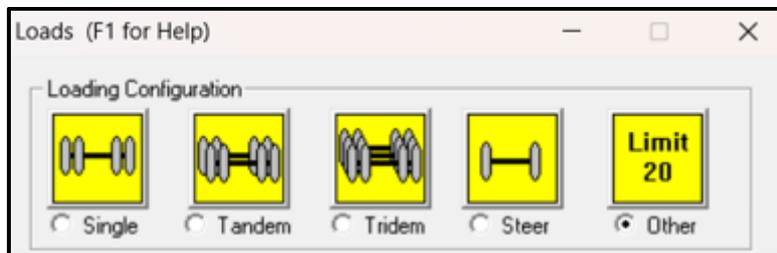
Loading Configuration (Configuración de carga): Se puede escoger las siguientes configuraciones de eje (Single, Tandem, Tridem, Steer, Other).

Total Number of Load Applications (Número total de aplicaciones de carga): Introducir el número total de aplicaciones de carga.

Load Magnitude (Magnitud de Carga): Para las primeras cuatro opciones de configuración de carga ya viene por defecto en el software, para la opción Other hay que hacer el respectivo análisis especificado en la guía.

Figura 51.

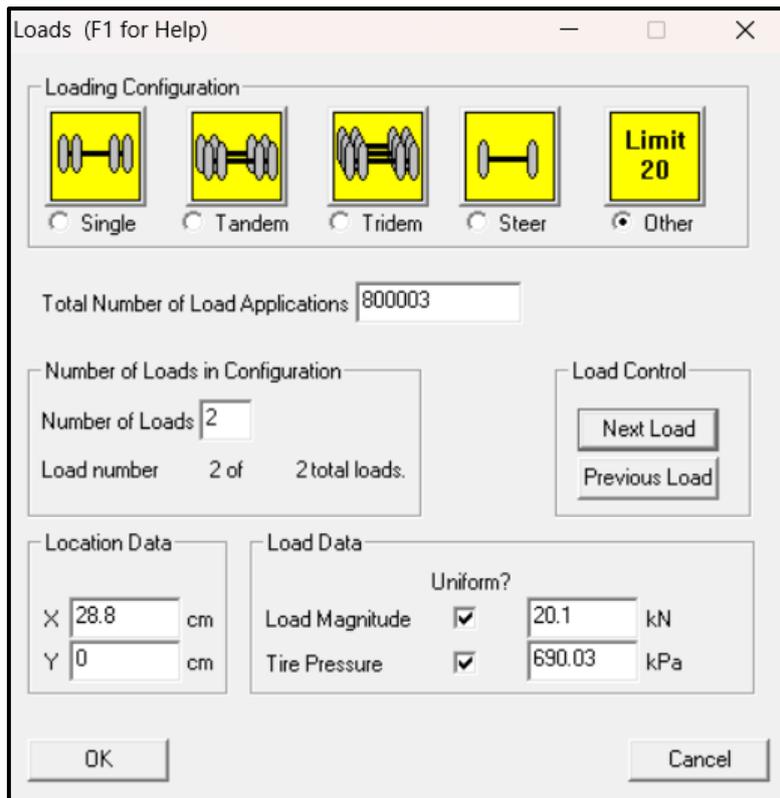
Introducción de cargas software WESLEA.



Nota. Las opciones para introducción de cargas. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Tire Pressure (Presión de Inflado): Igual que la magnitud de carga para las primeras cuatro opciones de configuración de carga ya viene por defecto en el software.

Figura 52. Presión de inflado software WESLEA.



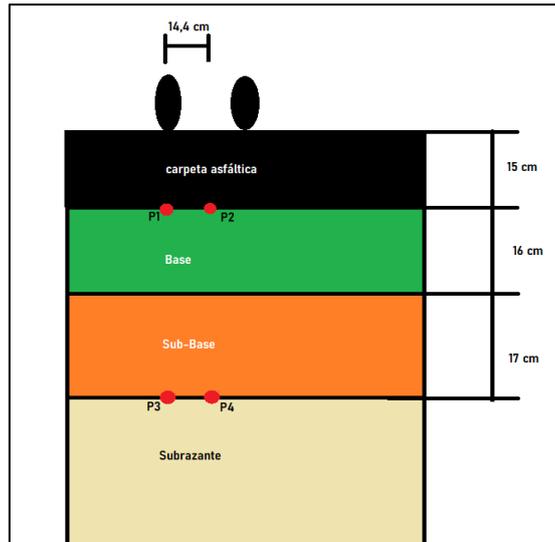
Nota. En la opción Other utilizar el valor típico de la presión de inflado del neumático de 690 kPa. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Introducción de puntos de análisis

Los puntos de análisis para las condiciones de carga que vienen establecidas en el software ya están definidos y para la opción Other se debe realizar según esta especificado en la guía.

Figura 53.

Puntos de análisis.

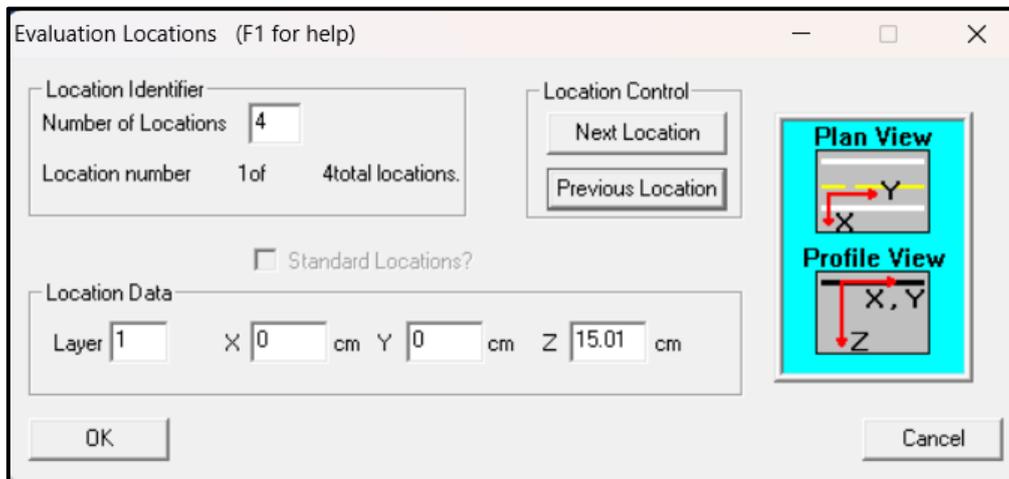


Nota. En la figura se muestra un esquema de puntos de análisis. Elaborado por: Los autores.

Location number: 1

Figura 54.

Ubicación 1 de evaluación software WESLEA.



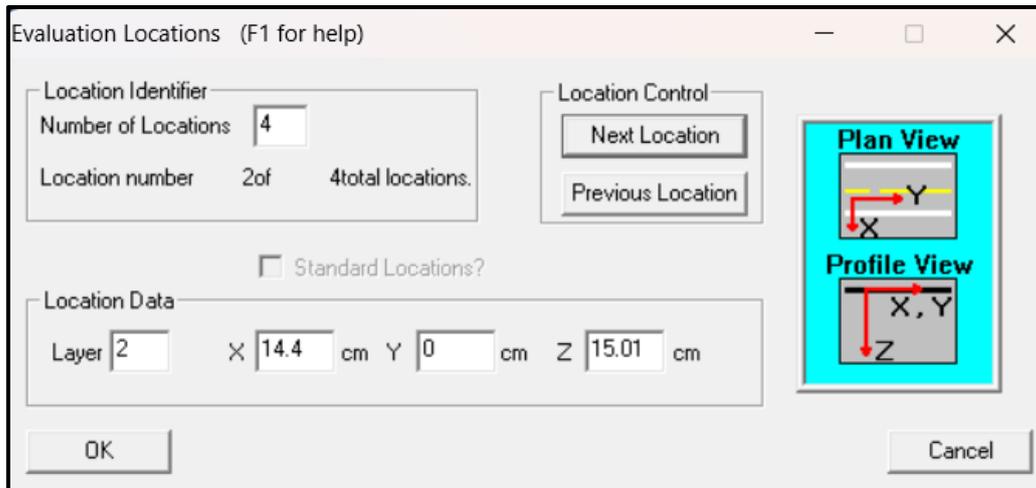
Nota. Se muestra un ejemplo de la ubicación 1 de los puntos de evaluación. Elaborado por:

Los autores a través del Software Weslea.

Location number: 2

Figura 55.

Ubicación 2 de evaluación software WESLEA.

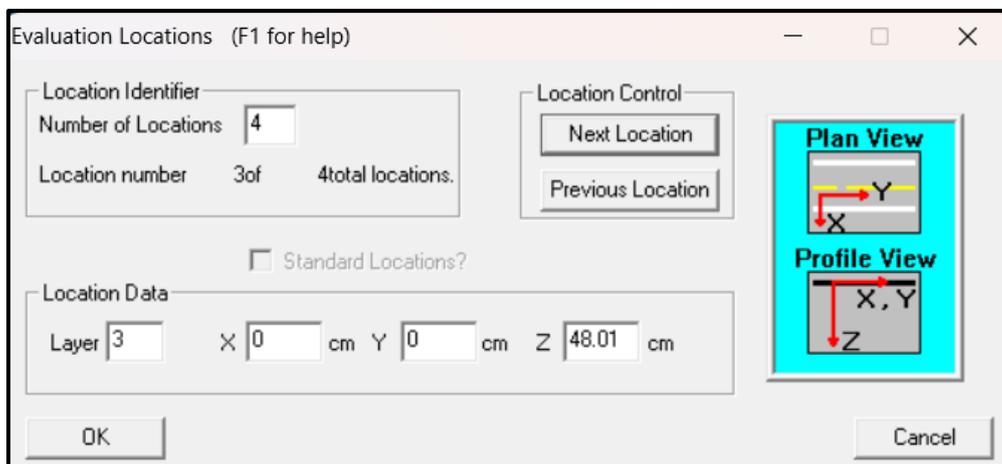


Nota. Se muestra un ejemplo de la ubicación 2 de los puntos de evaluación. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Location number: 3

Figura 56.

Ubicación 3 de evaluación software WESLEA.

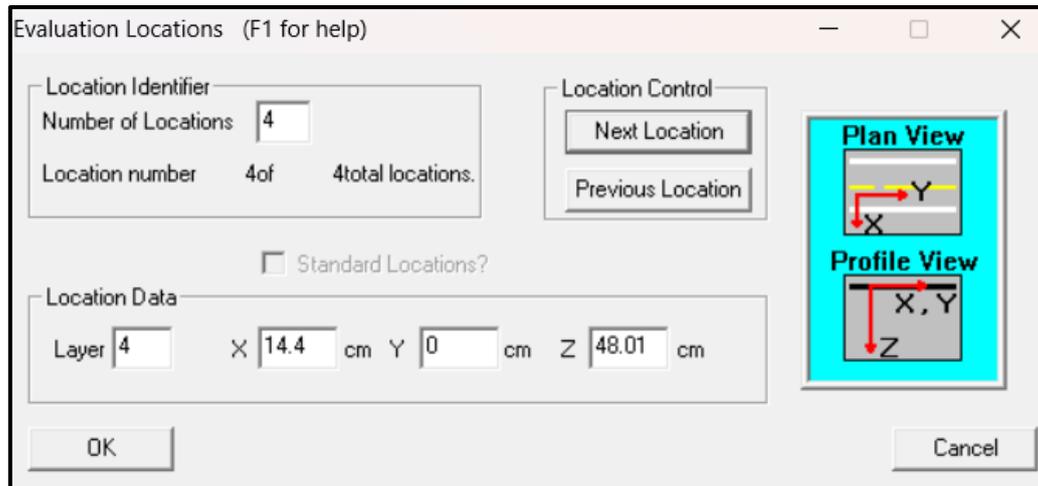


Nota. En la figura, se muestra un ejemplo de la ubicación 3 de los puntos de evaluación. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Location number: 4

Figura 57.

Ubicación 4 de evaluación software WESLEA.



Nota. En la figura, se muestra un ejemplo de la ubicación 4 de los puntos de evaluación.
Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

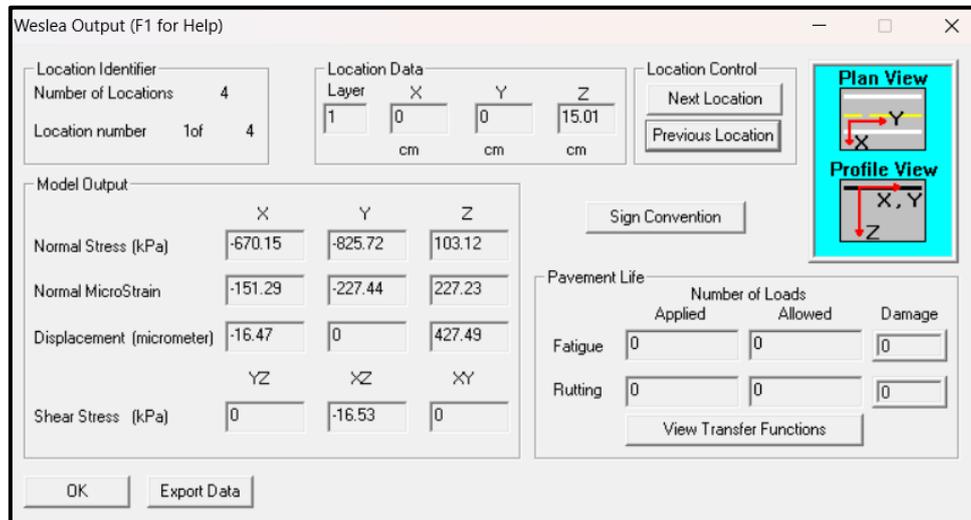
Esfuerzos en los puntos de análisis (Output)

Estos se los puede encontrar en la siguiente ventana, para cada punto de análisis indicado.

Resultados del punto 1 de análisis

Figura 58.

Resultados del punto 1 de análisis.

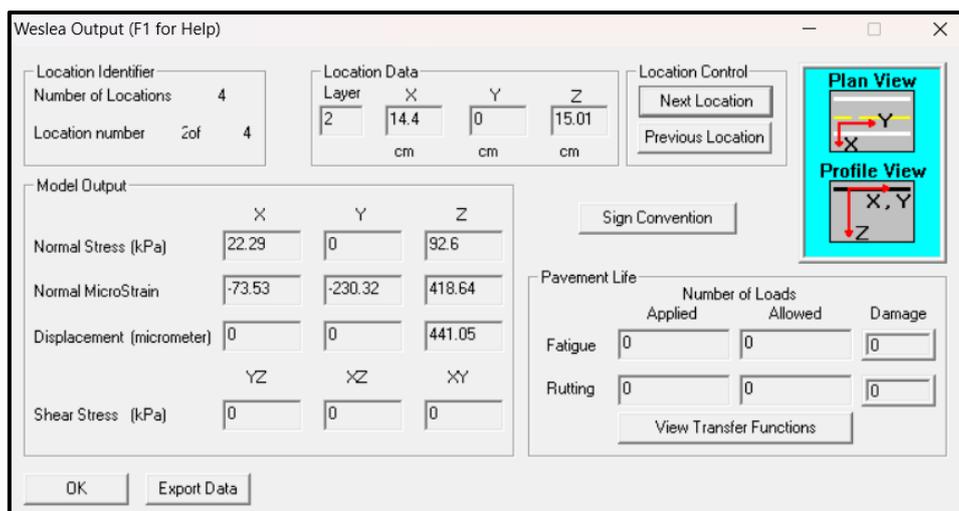


Nota. Se muestra la ventana de resultados del punto 1 de análisis. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Resultados del punto 2 de análisis

Figura 59.

Resultados del punto 2 de análisis

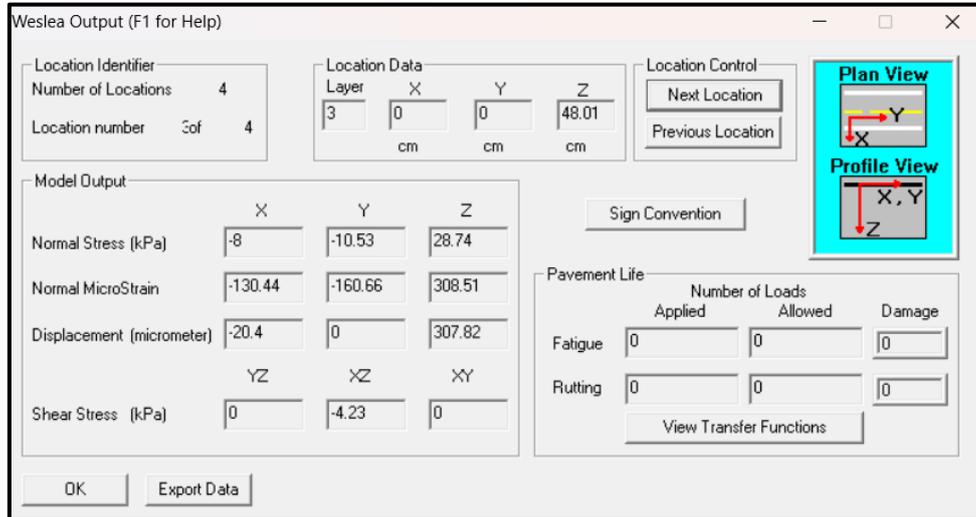


Nota. Se muestra la ventana de resultados del punto 2 de análisis. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Resultados del punto 3 de análisis

Figura 60.

Resultados del punto 3 de análisis

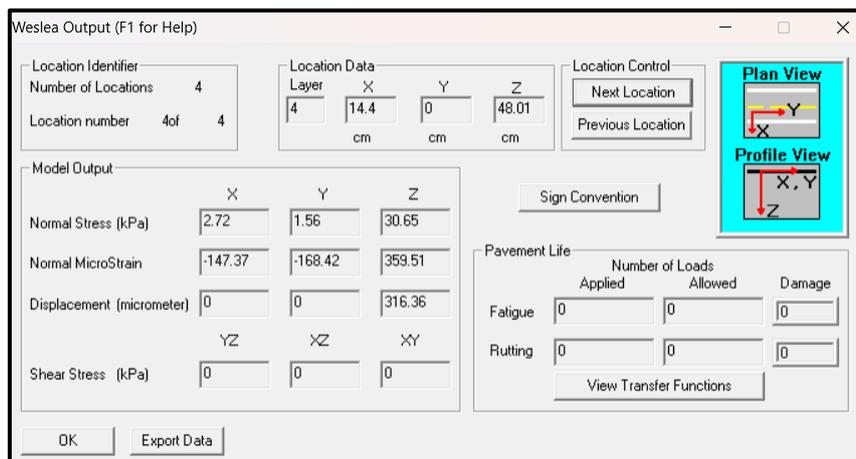


Nota. Se muestra la ventana de resultados del punto 3 de análisis. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Resultados del punto 4 de análisis

Figura 61.

Resultados del punto 4 de análisis



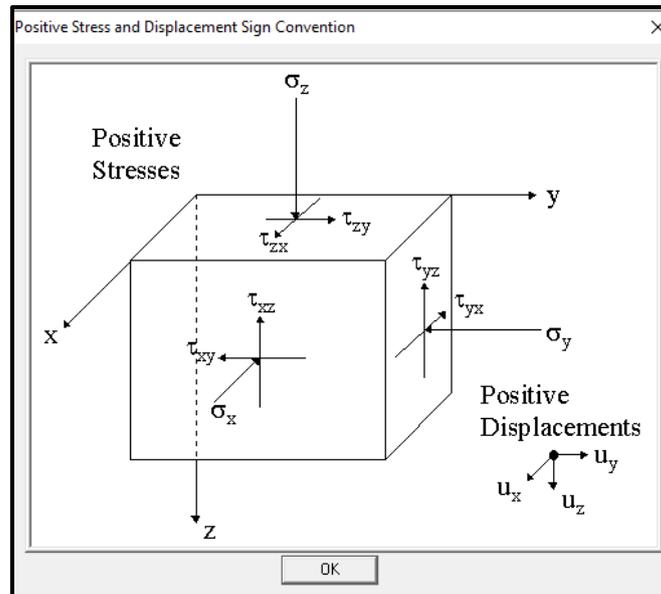
Nota. Se muestra la ventana de resultados del punto 4 de análisis. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Convención de signos

Convención de signos de tensión: (-) = tensión, (+) = compresión.

Figura 62.

Convención de signos.



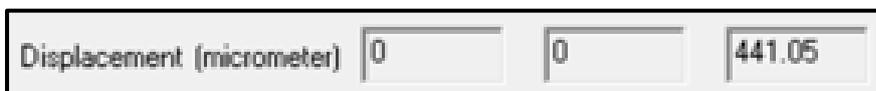
Nota. Los desplazamientos son positivos a lo largo de sus respectivos ejes. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Desplazamientos de los puntos de análisis

Desplazamiento del pavimento debido a la condición de carga aplicada (mili pulgadas o micrómetros). Se muestra en la figura siguiente:

Figura 63.

Desplazamientos de los puntos de análisis software WESLEA.



Nota. Los desplazamientos se muestran en las tres direcciones x,y,z. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Vida del pavimento

El grupo de Vida del Pavimento indica el número de cargas aplicadas, el número de cargas admisibles por fatiga o ahuellamiento, y el daño relativo. La ventana del software se muestra en la siguiente figura.

Figura 64.

Vida del pavimento software WESLEA.

The screenshot shows a software window titled "Pavement Life". Inside, there is a table with the following structure:

	Number of Loads		
	Applied	Allowed	Damage
Fatigue	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Rutting	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Below the table is a button labeled "View Transfer Functions".

Nota. Para un eje programado la fatiga y ahuellamiento se calcula manualmente. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Number of Loads Applied: Numero de Cargas Aplicadas

Number of Loads Allowed: Numero de Cargas Permitidas

Fatigue: Fatiga

Rutting: Ahuellamiento

Damage: Daño

Acumulación de Daños: Esta se obtiene de la división de las repeticiones de carga esperada (N) y la repetición de carga admisible (N_{adm}) como se muestra en la ecuación:

$$D = \sum \frac{N}{N_{adm}}$$

4.3. PARTE 3: EJERCICIO DE APLICACIÓN

Planteamiento del Ejercicio

Se requiere diseñar un pavimento flexible, la capa de rodadura será construida con hormigón asfáltico preparado en caliente con Estabilidad de Marshall 18000lb.

Tabla 3.

Datos de tránsito promedio diario de vehículos.

Autos	Buses	Camiones	Tipos de camiones					
			2DA	2DB	3A	3S2	3S3	4C
904	16	36	22	4	3	2	2	3

Nota. TPD según el tipo de vehículo. Elaborado por: Los autores.

Tránsito Generado asumido (TG): 0,15

Tránsito Desarrollado asumido (TD): 0,06

Tránsito Desviado asumido (Td): 0,07

La Base tiene un CBR de 90 al ser compactada.

La Sub-base tiene un CBR de 40 al ser compactada.

El CBR de la sub-rasante es 8 al porcentaje de compactación.

El tiempo de drenaje es de 1 día para capas granulares (base y sub base).

Coefficiente de Poisson Carpeta Asfáltica = 0.35

Coefficiente de Poisson Base y Sub-base = 0.40

Coefficiente de Poisson Sub-rasante = 0.45

Presión de aire en los neumáticos = 690 kPa

Diseño Método AASHTO 93

Factor Daño según el tipo de vehículo

El factor daño según tipo de vehículo se muestra en la tabla 4.

Tabla 4.*Factor daño según tipo de vehículos.**Nota. F.D. según el tipo de vehículo. Elaborado por: Los autores.*

Factor daño según tipo de vehículo									
Tipo	Simple		Simple doble		Tandem		Tridem		Factor daño
	ton	$\frac{P^4}{6,6}$	ton	$\frac{P^4}{8,2}$	Ton	$\frac{P^4}{15}$	ton	$\frac{P^4}{23}$	
BUS	4	0,13	8	0,91					1,04
2D	3	0,04							0,18
	4	0,13							
2DA	3	0,04	7	0,53					0,57
2DB	7	1,27	11	3,24					4,50
3A	7	1,27			20	3,16			4,43
3S2	7	1,27			20	3,16			7,59
					20	3,16			
3S3	7	1,27			20	3,16	24	1,19	5,61
4C	7	1,27					24	1,19	2,45
2S2	7	1,27	11	3,24	20	3,16			7,66

Tránsito Promedio Diario

El tránsito promedio diario obtenido se muestra en la tabla 5.

Tabla 5.*TPD según el tipo de vehículo.*

Tipo de vehículo	Tránsito diario promedio	Porcentaje (%)
AUTOS	904	94,6%
BUSES	16	1,7%

2DA	22	2,3%
2DB	4	0,4%
3A	3	0,3%
3S2	2	0,2%
3S3	2	0,2%
4C	3	0,3%
TOTAL	956	

Nota. Porcentaje del TPD según el tipo de vehículo. Elaborado por: Los autores.

Tabla 6.

Periodos de Diseño en Función del Tipo de Carretera.

Tipo de Carretera	Periodo de Diseño (Años)
Urbana de tránsito elevado.	30 – 50
Interurbana de tránsito elevado	20 – 50
Pavimentada de baja intensidad de tránsito	15 – 25
De baja intensidad de tránsito, pavimentación con grava	10 – 20

Nota. Se presenta periodos de diseño en función del tipo de carretera. Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

El periodo de diseño es para 20 años en este tipo de carretera debido a que su elevado número de vehículos, lo cual es probable que en ese tiempo el pavimento se fatigue o se ahuelle.

Tabla 7.

Tránsito Promedio Diario

Tránsito promedio diario									
Año	Autos	Buses	Camiones	Camiones					
				2DA	2DB	3A	3S2	3S3	4C
2023	904	16	36	22	4	3	2	2	3

2024	936	16	37	22	4	3	2	2	3
2025	970	17	37	23	4	3	2	2	3
2026	1004	17	38	23	4	3	2	2	3
2027	1037	17	39	24	4	3	2	2	3
2028	1071	17	39	24	4	3	2	2	3
2029	1105	18	40	24	4	3	2	2	3
2030	1141	18	40	25	4	3	2	2	3
2031	1178	18	41	25	5	3	2	2	3
2032	1214	19	42	25	5	3	2	2	3
2033	1251	19	42	26	5	4	2	2	4
2034	1289	19	43	26	5	4	2	2	4
2035	1328	19	43	27	5	4	2	2	4
2036	1368	20	44	27	5	4	2	2	4
2037	1408	20	45	27	5	4	2	2	4
2038	1448	20	45	28	5	4	3	3	4
2039	1490	21	46	28	5	4	3	3	4
2040	1533	21	47	28	5	4	3	3	4
2041	1578	21	47	29	5	4	3	3	4
2042	1622	21	48	29	5	4	3	3	4
2043									

Nota. Se muestra el tránsito promedio diario. Elaborado por: Los autores.

Tránsito Promedio Diario anual

Existen porcentajes de crecimiento para diferentes periodos dependiendo del tipo de vehículo, adicionalmente están los de tráfico generado, desarrollado y desviado y también los factores carril y dirección.

Tabla 8.

Tasa de crecimiento anual de tráfico.

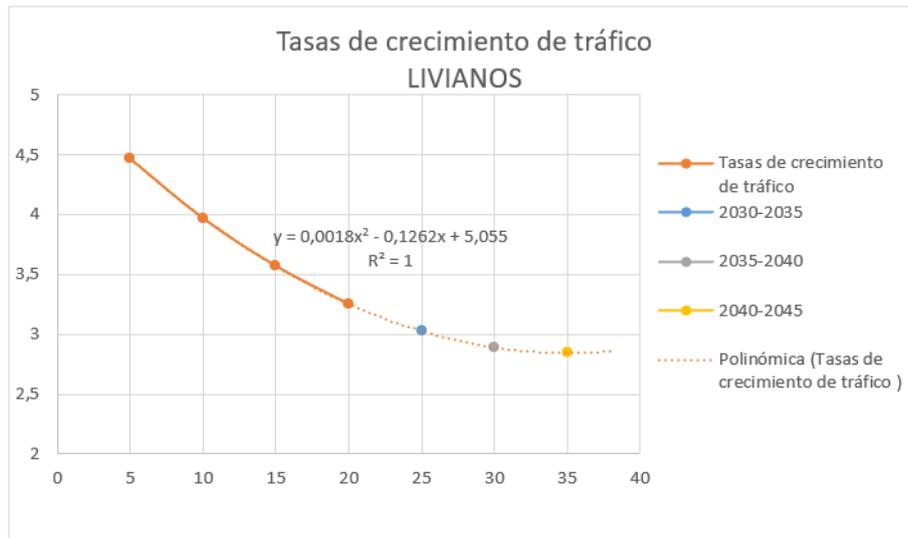
TASAS DE CRECIMIENTO ANUAL DE TRAFICO (%)			
PERIODO	LIVIANO	BUS	PESADO
2010 -2015	4,47	2,22	2,18
2015 -2020	3,97	1,97	1,94
2020-2025	3,57	1,78	1,74
2025 -2030	3,25	1,62	1,58

Nota. La tasa de crecimiento anual de tráfico, para cada periodo de cinco años. Fuente: Normas M.T.O.P. 2003.

Líneas de tendencias para las tasas de crecimiento de tráfico liviano, se muestran en la siguiente figura:

Figura 65.

Tasas de crecimiento de tráfico livianos.

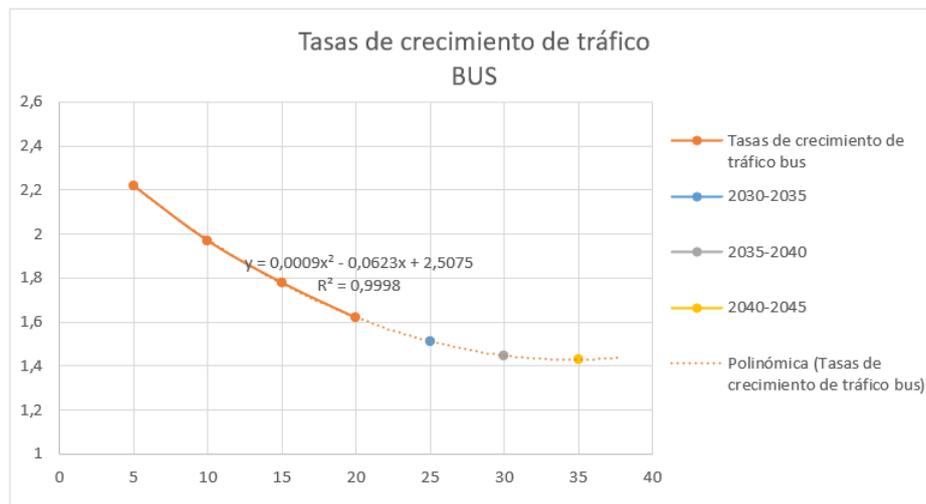


Nota. La línea de crecimiento vehicular tipo liviano es polinómica. Elaborado por: Los autores.

Líneas de tendencias para las tasas de crecimiento de tráfico bus, se muestran en la siguiente figura:

Figura 66.

Tasas de crecimiento de tráfico bus.

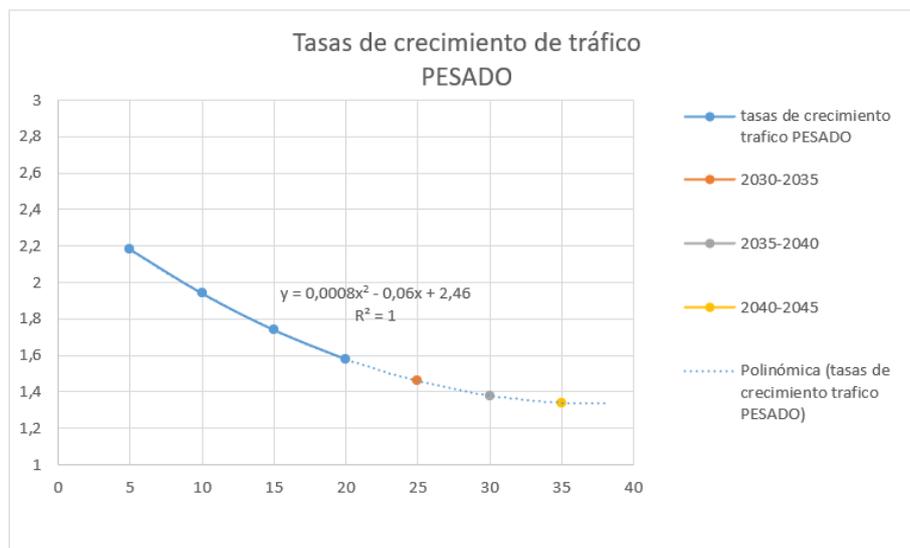


Nota. La línea de crecimiento vehicular tipo bus es polinómica. Elaborado por: Los autores.

Líneas de tendencias para las tasas de crecimiento de tráfico pesado, se muestran en la siguiente figura:

Figura 67.

Tasas de crecimiento de tráfico pesado.



Nota. La línea de crecimiento vehicular pesado es polinómica. Elaborado por: Los autores.

Tabla 9.

Resumen Tasas de Crecimiento de Tráfico

Tasas de crecimiento de tráfico					
Años	Δ años	Acumulados	Livianos	Bus	Pesados
2010 - 2015	5		4,47	2,22	2,18
2015 - 2020	10		3,97	1,97	1,94
2020 - 2025	15		3,57	1,78	1,74
2025 - 2030	20		3,25	1,62	1,58
2030 - 2035	25		3,03	1,51	1,46
2035 - 2040	30		2,89	1,45	1,38
2040 - 2045	35		2,84	1,43	1,34

Nota. Las tasas de crecimiento debido a generar línea de tendencia para cada tipo de vehículo. Elaborado por: Los autores.

Factor de distribución por dirección o sentido (Fd)

Por lo general bajo una contabilización vehicular, las vías cuentan con un 50% de vehículos que circulan en una dirección y otro 50% hacia la otra dirección, es por esto que la AASHTO recomienda tomar el valor de 0.5 (50 por ciento).

Factor de distribución por carril (Fc)

Este factor depende del número de carriles, por lo que se toma como referencia el carril más cargado.

Tabla 10.

Factor carril.

NUMERO DE CARRILES DE CADA DIRECCION	PORCENTAJE DE EJES EQUIVALENTES DE 8.2 t. EN EL CARRIL DE DISEÑO
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4 o más	0.50 – 0.75

Nota. La AASHTO recomienda la utilización del siguiente factor de distribución para su diseño. Fuente: AASHTO Guide for design of pavement structures,1993. pII-9.

Para un número de 2 carriles de cada dirección el factor carril está entre 0.80-1.00 por lo que se escoge el intermedio de los dos factores: 0.9.

Para el número de ESAL's (ejes equivalentes de 8.2 ton), se calcula con la ecuación:

$$N = (Nd * 365 * Fd * Fc) * \frac{(1 + r^n) - 1}{r}$$

Dónde:

N : Tránsito en ejes equivalentes de 8.2 toneladas

Nd : Tránsito equivalente acumulado.

Fd : Factor sentido.

Fc : Factor carril

r : Tasa de crecimiento del tránsito.

n : Periodo de diseño en años.

Tabla 11.

Tránsito Promedio Diario anual.

Año	% Crecimiento			TPD TOTAL	TG (0,15)	TD (0,06)	Td (0,07)	TPDA Diseño
	Livianos	Buses	Pesados					
2023	3,57%	1,78%	1,74%	956	143	57	67	1224
2024	3,57%	1,78%	1,74%	989	148	59	69	1266
2025	3,57%	1,78%	1,74%	1024	154	61	72	1310
2026	3,25%	1,62%	1,58%	1059	159	64	74	1356
2027	3,25%	1,62%	1,58%	1093	164	66	76	1399
2028	3,25%	1,62%	1,58%	1127	169	68	79	1443
2029	3,25%	1,62%	1,58%	1163	174	70	81	1489
2030	3,25%	1,62%	1,58%	1200	180	72	84	1536
2031	3,03%	1,51%	1,46%	1238	186	74	87	1584
2032	3,03%	1,51%	1,46%	1274	191	76	89	1631
2033	3,03%	1,51%	1,46%	1312	197	79	92	1679
2034	3,03%	1,51%	1,46%	1351	203	81	95	1729
2035	3,03%	1,51%	1,46%	1391	209	83	97	1780
2036	2,89%	1,45%	1,38%	1432	215	86	100	1833
2037	2,89%	1,45%	1,38%	1472	221	88	103	1885
2038	2,89%	1,45%	1,38%	1514	227	91	106	1938

2039	2,89%	1,45%	1,38%	1557	234	93	109	1993
2040	2,89%	1,45%	1,38%	1601	240	96	112	2049
2041	2,84%	1,43%	1,34%	1646	247	99	115	2107
2042	2,84%	1,43%	1,34%	1692	254	102	118	2165
2043								

Nota. El tránsito promedio diario anual depende del porcentaje de crecimiento. Elaborado por: Los autores.

Ejes equivalentes W18 (ESAL's)

Tabla 12.

Ejes equivalentes W18.

AÑO	W18		
	Acumulado	W18 Carril Diseño (0,9)	W18 Dirección (0,5)
2023	44064,8155	39658,334	19829,16698
2024	91985,287	82786,7583	41393,37917
2025	144020,328	129618,295	64809,1477
2026	199965,469	179968,922	89984,46122
2027	259928,476	233935,628	116967,8141
2028	324368,312	291931,481	145965,7405
2029	393552,721	354197,449	177098,7243
2030	467764,101	420987,691	210493,8455
2031	544692,733	490223,46	245111,7298
2032	627766,652	564989,987	282494,9933
2033	716295,636	644666,072	322333,0361

2034	810577,212	729519,491	364759,7453
2035	910923,912	819831,521	409915,7605
2036	1012514,14	911262,724	455631,3621
2037	1123467,63	1011120,87	505560,4339
2038	1241070,13	1116963,12	558481,5593
2039	1365661,41	1229095,27	614547,6334
2040	1497597,41	1347837,67	673918,8347
2041	1631722,65	1468550,38	734275,192
2042	1777784,55	1600006,09	800003,0473
2043			

Nota. El número de ejes equivalentes W18 depende del factor carril y dirección. Elaborado por: Los autores.

Datos iniciales para establecer el diseño

Desempeño del pavimento y propiedades de la sub-rasante

Nivel de Confiabilidad

Tabla 13.

Nivel de Confiabilidad.

Clasificación Funcional	Nivel de Confiabilidad Recomendado	
	Urbano	Rural
Interestatal y Obras Vías Libres	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias Principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Nota. El nivel de Confiabilidad es sugerido según la clasificación funcional. Fuente: (Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimentos, 1993, p. 130).

El nivel de confiabilidad recomendado es del 90%.

Factores de Desviación Normal

Tabla 14.

Factores de Desviación Normal.

Confiabilidad	Z_R	Confiabilidad	Z_R
50	0	92	-1,405
60	-0,253	94	-1,555
70	-0,524	95	-1,645
75	-0,674	96	-1,751
80	-0,841	97	-1,881
85	-1,037	98	-2,054
90	-1,282	99	-2,327

Nota. Los factores de desviación normal dependen del nivel de confiabilidad, a mayor nivel de confiabilidad mayor es la desviación normal. Fuente: Guía para el Diseño y la Construcción de Pavimentos.

El factor de desviación normal (Z_r) es -1,282 de una confiabilidad (R) del 90% .

Desviación estándar global “So”

Teniendo en cuenta las variaciones del comportamiento en el pavimento y predicción del TPDA. Para pavimentos flexibles, el S_o está comprendido entre 0,40 y 0,50

Tabla 15.

Valores de Desviación Estándar (S_o), para Pavimentos Rígidos y Flexibles.

Rango	Tipo de Pavimento
0.30 - 0.40	Pavimentos Rígidos
0.40 - 0.50	Pavimentos Flexibles

Nota. Es recomendable una desviación estándar de 0,45 para pavimentos flexibles. Fuente: (Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimentos, 1993, p. 107)

Índice de serviciabilidad “PSI”

En el método AASHTO 93 se recomienda para pavimentos flexibles asignar un PSI inicial de 4,2 y un PSI final = 2.0.

Tabla 16.

Índice de Serviciabilidad de Diseño.

Índice de Serviciabilidad Inicial (Po)	
4,2	Pavimento flexible
4,5	Pavimento Rígido
Índice de Serviciabilidad Final (Pt)	
2.5 o 3.0	Carreteras Principales
2	Carreteras con clasificación menor
1,5	Carreteras relativamente menores, donde las condiciones económicas determinan que gastos iniciales deben ser mantenidos bajos

Nota. Se escoge un índice de serviciabilidad inicial y final. Fuente: (Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimetos, 1993, p. 107)

La variación de la serviciabilidad se muestra en la ecuación:

$$\Delta \text{PSI} = \text{PSI inicial} - \text{PSI final}$$

$$\Delta \text{PSI} = 4,2 - 2 = 2,2$$

Módulo de resiliencia de la sub-rasante “Mr”

La guía AASHTO propone el uso de la conocida correlación con el CBR para determinar el módulo de resiliencia de la sub-rasante “Mr” para un CBR de 7,2% a 20%, ecuación:

$$\text{Mr (Psi)} = 3000 * (\text{CBR})^{0,65} \text{ (ecuación desarrollada en Sudáfrica)}$$

$$\text{Mr (Psi)} = 3000*(8)^{0,65} = 11591,236 \text{ Psi}$$

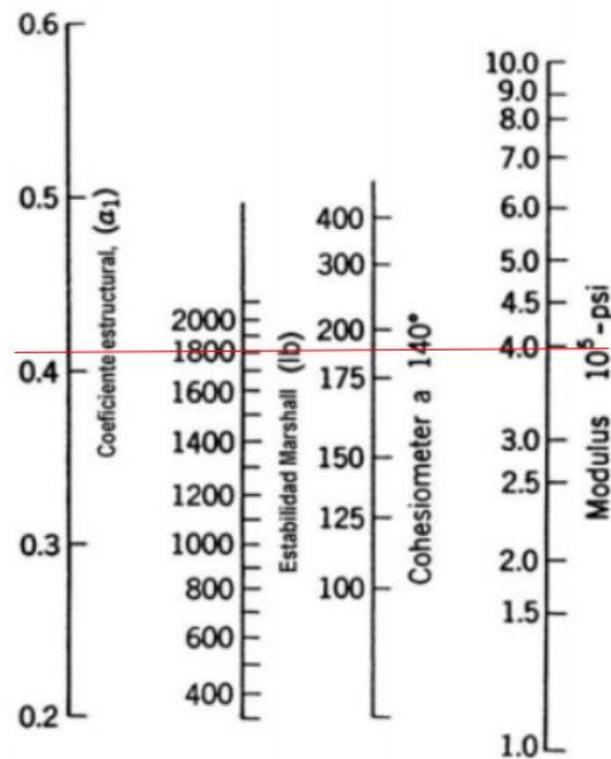
Características de los materiales

Coefficiente estructural de la Carpeta asfáltica (a_1)

Se Determina el coeficiente estructural de la carpeta asfáltica dependiendo de la Estabilidad de Marshall 18000lb, utilizando la siguiente figura.

Figura 68.

Tasas de crecimiento de tráfico pesado.



Nota. El coeficiente estructural y el módulo esta en función de la Estabilidad de Marshall.

Fuente: AASHTO 1993.

Los valores obtenidos son:

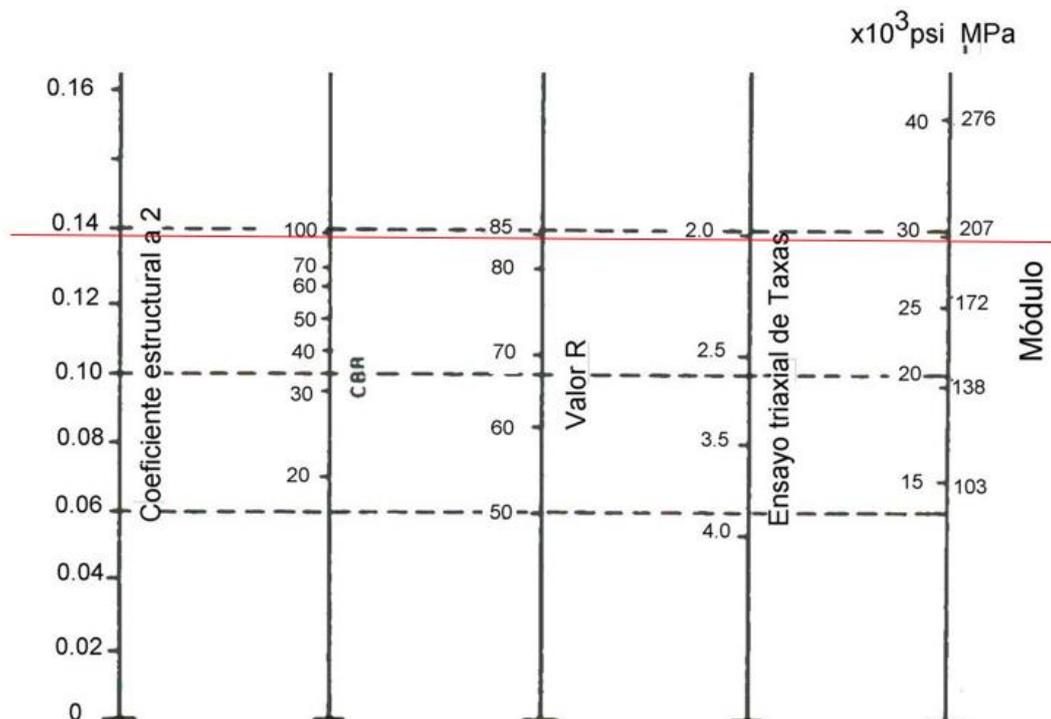
- Módulo de la carpeta asfáltica = 400000 Psi 400 Ksi
- Coeficiente estructural $a_1 = 0,42$

Coeficiente estructural de la base (a_2)

Las especificaciones del MOP indican que la capa base deberá tener un valor de soporte CBR igual o mayor al 80%. Con el valor de CBR = 90% en el siguiente nomograma en la figura 69, se obtiene el módulo y el coeficiente a_2 .

Figura 69.

Tasas de crecimiento de tráfico pesado.



Nota. El coeficiente estructural y el módulo está en función del CBR. Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

Los valores obtenidos son:

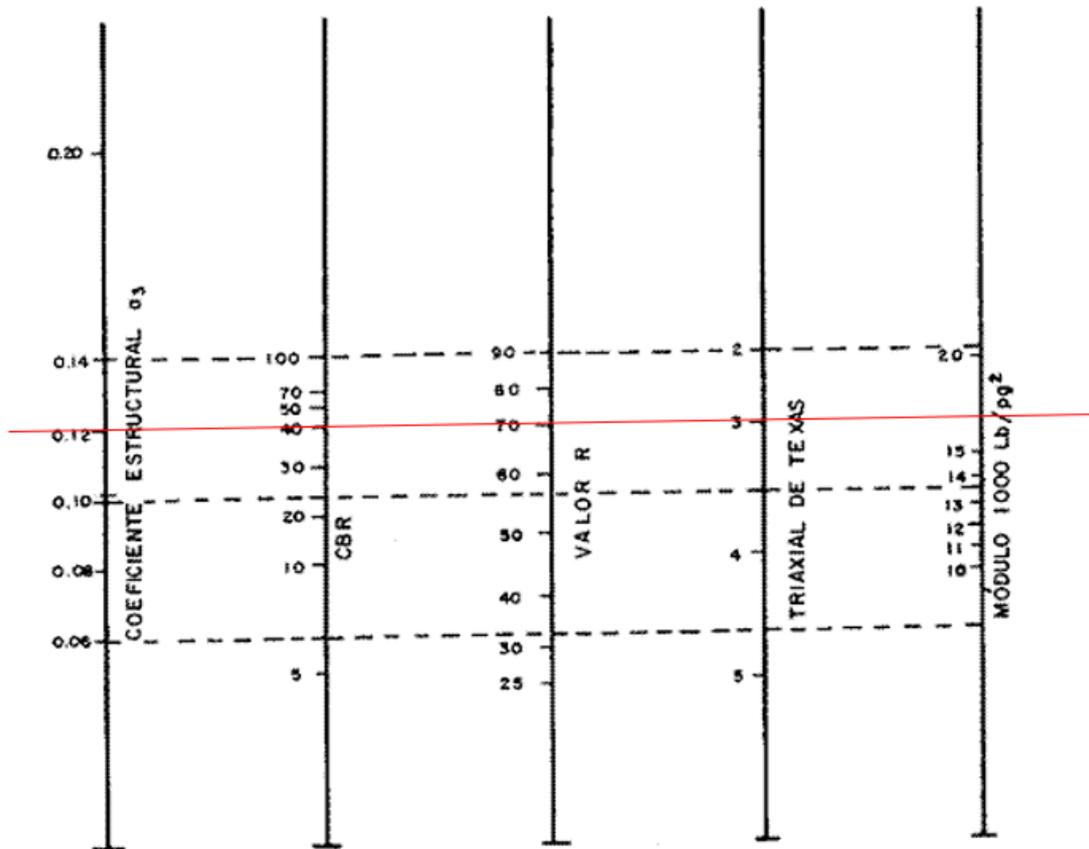
- Módulo de la capa base = 29000 Psi 29 Ksi
- Coeficiente estructural $a_2 = 0.137$

Coefficiente Estructural de la Sub-Base (a_3)

Las especificaciones del MOP para la sub-base indican que el valor de soporte CBR sea igual o mayor a 30%. En nuestro caso se tiene un CBR=40%.

Figura 70.

Tasas de crecimiento de tráfico pesado.



Nota. El coeficiente estructural y el módulo esta en función del CBR. Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

Los valores obtenidos son:

- Módulo de la capa base = 17000 Psi 17 Ksi
- Coeficiente estructural $a_3 = 0,12$

Coefficientes de drenaje de capa (m2, m3)

Tabla 17.

Tiempo de drenaje para capas granulares.

Calidad del Drenaje	Tiempo que tarda el agua en ser Evacuada
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	Agua no drena

Nota. La calidad de drenaje está en función del tiempo que tarda el agua en ser avacuada.

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993

La calidad de drenaje es buena según la tabla 18, cuando tarda un día en ser evacuada

Tabla 18.

Coefficientes de drenaje para pavimentos flexibles.

Capacidad de Drenaje	% de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.			
	Menos del 1 %	1 a 5 %	5 a 25 %	Más del 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
Malo	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muy malo	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Nota. El coeficiente de drenaje está en función de la calidad de drenaje y del porcentaje de

lluvia en todo el año. Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993

Diseño de la Estructura de Pavimento

Cálculo del Número Estructural (SN)

Con la ecuación general de diseño ecuación, se determina un número estructural (SN) que soporte el

W18 proyectado para el diseño.

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

Fuente: AASHTO 1993

Datos para calcular SN

Confiabilidad: R = 90 % se relaciona a $Z_r = -1,282$

Desviación Estándar global: $S_o = 0.45$

Serviciabilidad:

PSI inicial = 4.2

PSI final = 2.0

Módulo de la sub-rasante: $M_r = 11591,236$ Psi

Figura 71.

Cálculo de número estructural software Ecuación AASHTO 93.

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software interface. The window title is 'Ecuación AASHTO 93'. The interface is divided into several sections:

- Tipo de Pavimento:** Radio buttons for 'Pavimento flexible' (selected) and 'Pavimento rígido'.
- Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So):** A dropdown menu showing '90 % Zr=-1.282' and a text box for 'So' with the value '0.45'.
- Serviciabilidad inicial y final:** Text boxes for 'PSI inicial' (4.2) and 'PSI final' (2).
- Módulo resiliente de la subrasante:** Text box for 'Mr' (11591 psi).
- Información adicional para pavimentos rígidos:** Four empty text boxes for 'Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi)', 'Módulo de rotura del concreto - Sc (psi)', 'Coeficiente de transmisión de carga - (J)', and 'Coeficiente de drenaje - (Cd)'.
- Tipo de Análisis:** Radio buttons for 'Calcular SN' (selected) and 'Calcular W18'. The 'Calcular SN' section shows 'W18 = 800003' and 'Número Estructural SN = 2,76'.
- Buttons:** 'Calcular' and 'Salir' buttons at the bottom.

Nota. El número estructural de la subrasante se calcula en el software Ecuación AASHTO 93.

Fuente: Programa Ecuación AASHTO 93.

El número estructural requerido para el diseño es SN= 2,76

Datos para calcular SNbase

Confiabilidad: R = 90 % se relaciona a Zr = -1,282

Desviación Estándar global: So = 0.45

Serviciabilidad:

PSI inicial = 4.2

PSI final = 2.0

Módulo de la Base =29000 Psi

Figura 72.

Cálculo de número estructural software Ecuación AASHTO 93.

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software interface. The window title is 'Ecuación AASHTO 93'. The interface is divided into several sections:

- Tipo de Pavimento:** Radio buttons for 'Pavimento flexible' (selected) and 'Pavimento rígido'.
- Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So):** A dropdown menu showing '90 % Zr=-1.282' and a text box for 'So' with the value '0.45'.
- Serviciabilidad inicial y final:** Text boxes for 'PSI inicial' (4.2) and 'PSI final' (2).
- Módulo resiliente de la subrasante:** A text box for 'Mr' with the value '29000 psi'.
- Información adicional para pavimentos rígidos:** Four empty text boxes for 'Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi)', 'Módulo de rotura del concreto - Sc (psi)', 'Coeficiente de transmisión de carga - (J)', and 'Coeficiente de drenaje - (Cd)'.
- Tipo de Análisis:** Radio buttons for 'Calcular SN' (selected) and 'Calcular W18'. A text box shows 'W18 = 800003'.
- Número Estructural:** A text box shows 'SN = 1.97'.
- Buttons:** 'Calcular' and 'Salir' buttons at the bottom.

Nota. El número estructural calcula en el software Ecuación AASHTO 93. Fuente: Programa Ecuación AASHTO 93.

El número estructural requerido para el diseño es $SN_{base} = 1,97$

Datos para calcular $SN_{sub-base}$

Confiabilidad: $R = 90 \%$ se relaciona a $Z_r = -1,282$

Desviación Estándar global: $So = 0.45$

Serviciabilidad:

PSI inicial = 4.2

PSI final = 2.0

Módulo de la sub-base = 17000 Psi

Figura 73.

Cálculo de número estructural software Ecuación AASHTO 93.

Nota. El número estructural calcula en el software Ecuación AASHTO 93. Fuente: Programa Ecuación AASHTO 93.

El número estructural requerido para el diseño es $SN_{sub-base} = 2,40$

Determinación de espesores por capas

Tabla 19.

Espesores mínimos, en pulgadas, en función de los Ejes Equivalentes.

Tránsito (ESAL's) En Ejes Equivalentes	Carpetas De Concreto Asfáltico	Bases Granulares
Menos de 50,000	1,0 ó T.S.	4,0
50,001 – 150,000	2,0	4,0
150,001 – 500,000	2,5	4,0
500,001 – 2'000,000	3,0	6,0
2'000,001 – 7'000,000	3,5	6,0
Mayor de 7'000,000	4,0	6,0

Nota. El espesor mínimo de carpeta asfáltica y bases granular está en función del número de ESAL's. Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

El Tránsito W18 (ESAL's) en el diseño es de 800003,0473 por lo que el espesor mínimo es de 3 pulgadas para la carpeta asfáltica y 6 pulgadas para bases granulares.

Cálculo del espesor de la carpeta asfáltica (D_1):

El cálculo se realiza mediante la ecuación:

$$SN_1 = a_1 * D_1$$

$$D_1' = \frac{SN_1}{a_1}$$

$$D_1' = \frac{1,97}{0,42} = 4,69in = 11,90 cm$$

Cálculo del espesor de la capa Base granular (D_2):

El cálculo se realiza mediante la ecuación:

$$SN_2 = SN_1 + a_2 * D_2 * m_2$$

$$D_2' = \frac{SN_2 - SN_1'}{a_2 * m_2}$$

$$D_2' = \frac{2,42 - 1,97}{0,137 * 1} = 3,15 in = 8,00 cm$$

Cálculo del espesor de la capa Sub-base granular (D_3):

El cálculo se realiza mediante la ecuación:

$$SN_3 = SN_1 + SN_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

$$D_3' = \frac{SN_3 - (SN_1' - SN_2')}{a_3 * m_3}$$

$$D_2' = \frac{2,76 - (1,97 + 0,43)}{0,12 * 1} = 2,99 \text{ in} = 7,60 \text{ cm}$$

Tabla 20.

Espesores teóricos.

Espesores teóricos			
Capas Pavimento	SN	cm	in
Carpeta Asfáltica	1,97	11,90	4,69
Base Granular	0,43	8,00	3,15
Sub-base granular	0,36	7,60	2,99
Total	2,76	27,5	10,83

Nota. Los espesores de cada capa del pavimento dependen del número estructural. Elaborado por: Los autores.

En la tabla 21 se muestran los espesores propuestos.

Tabla 21.

Espesores propuestos.

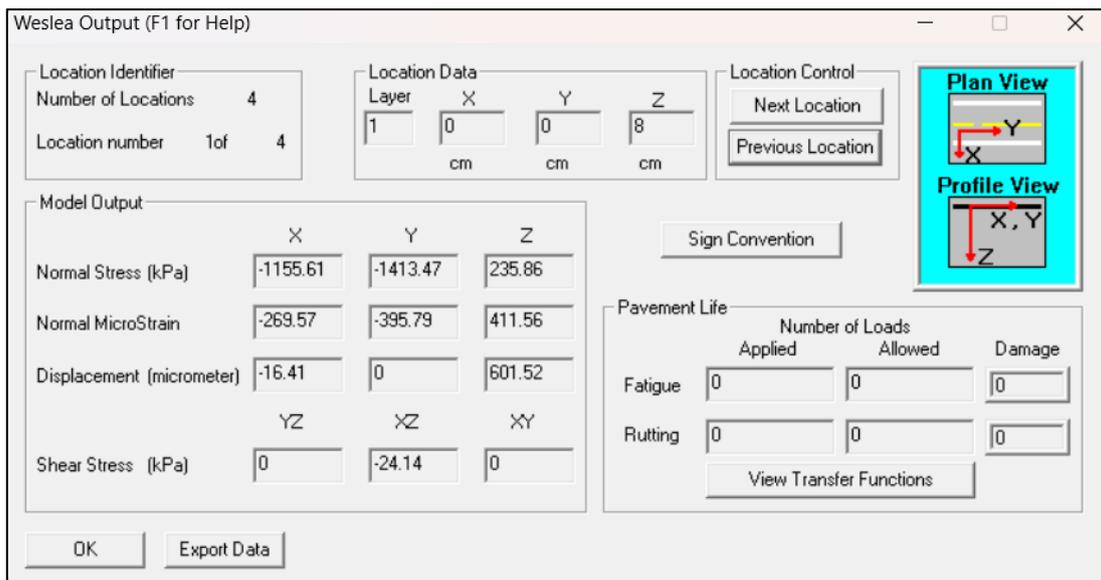
Espesores propuestos			
Capas pavimento	SN	cm	in
Carpeta asfáltica	1,32	8,00	3,15
Base granular	0,81	15,00	5,91
Sub-base granular	0,94	20,00	7,87
Total	3,08	43	16,92

Nota. Los espesores de cada capa del pavimento dependen del número estructural. Elaborado por: Los autores.

Comprobación del daño por efecto de fatiga y ahuellamiento con el Software WESLEA de acuerdo a los espesores obtenidos por el diseño de AASHTO 93

Figura 74.

Resultados punto crítico parte inferior Carpeta Asfáltica.

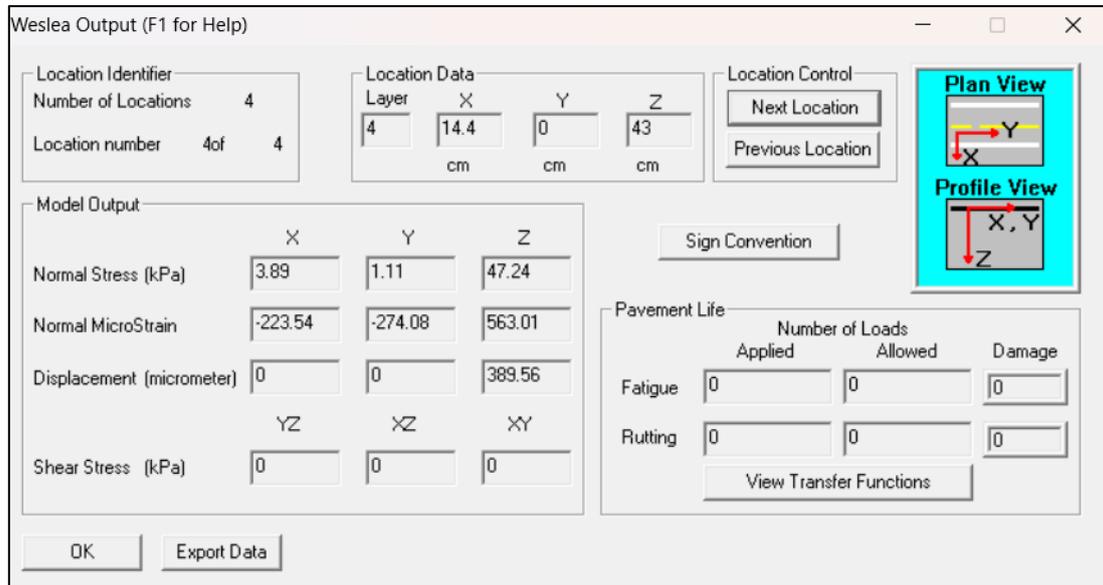


Nota. El punto más crítico de la carpeta asfáltica analiza el daño por fatiga en el pavimento.

Fuente: Software Weslea.

Figura 75.

Resultados punto crítico parte superior sub-rasante.



Nota. El punto más crítico de la sub-rasante analiza el daño por ahuellamiento en el pavimento.

Fuente: Software Weslea.

Fatiga

Se calcula a través de la ecuación:

$$N_f = 2,83 * 10^{-6} \left(\frac{10^6}{\epsilon_t} \right)^{3,148}$$

$$N_f = 2,83 * 10^{-6} \left(\frac{1}{395,79} \right)^{3,148}$$

$$N_f = 145534,91 \text{ (Allowed)}$$

Ahuellamiento

Se calcula con la ecuación:

$$N_d = 1 * 10^{16} \left(\frac{1}{\epsilon_v} \right)^{3,87}$$

$$Nd = 1 * 10^{16} \left(\frac{1}{563,01} \right)^{3,87}$$

Nd = 226726,70 (Allowed)

El daño se calcula a través de la ecuación:

$$\text{Daño} = \frac{\text{Applied}}{\text{Allowed}} * 100$$

Applied: w18=800003,0473

Tabla 22.

Daño del Pavimento.

Años	W18 (ESAL's)	Daño	
		Fatiga	Ahuellamiento
1	19829	13,63%	8,75%
2	41393	28,44%	18,26%
3	64809	44,53%	28,58%
4	89984	61,83%	39,69%
5	116968	80,37%	51,59%
6	145966	100,30%	64,38%
7	177099	121,69%	78,11%
8	210494	144,63%	92,84%
9	245112	168,42%	108,11%
10	282495	194,11%	124,60%
11	322333	221,48%	142,17%
12	364760	250,63%	160,88%
13	409916	281,66%	180,80%
14	455631	313,07%	200,96%
15	505560	347,38%	222,98%
16	558482	383,74%	246,32%
17	614548	422,27%	271,05%
18	673919	463,06%	297,24%
19	734275	504,54%	323,86%
20	800003	549,70%	352,85%

Nota. El daño por fatiga y ahuellamiento depende del número de ESAL's. Elaborado por: Los autores.

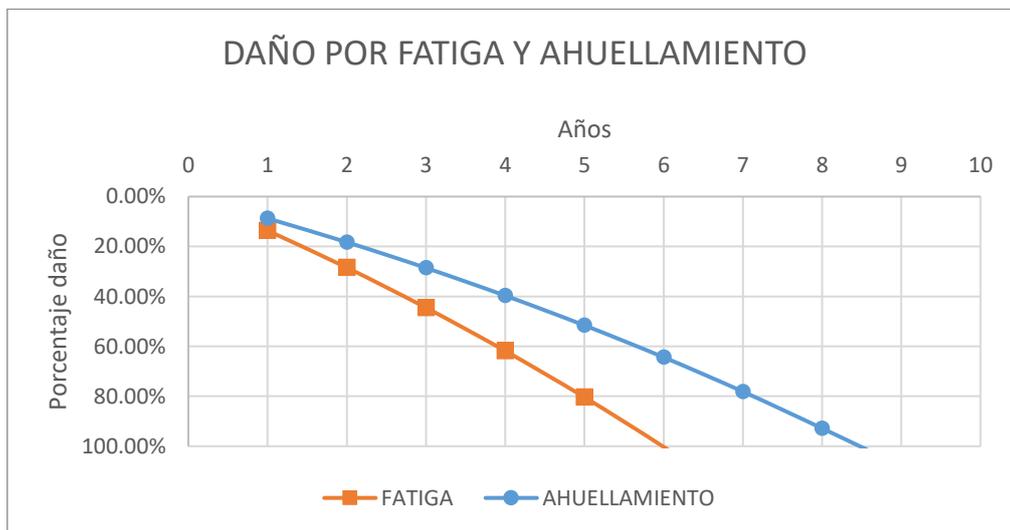
Con espesores obtenidos del diseño de la AASHTO 93 el daño por efecto de fatiga calculado con el Software WESLEA (Método racional) fallará después de transcurrir los 7 años y, el daño por efecto de ahuellamiento después de transcurrir los 8 años.

Por lo que se propone reajustar los espesores para que no falle por efecto de fatiga y ahuellamiento.

El daño por fatiga depende del espesor de la carpeta asfáltica debido a que esta analiza la deformación a tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica.

Figura 76.

Daño del Pavimento.



Nota. El daño por daño por fatiga se presenta unos años antes de producirse ahuellamiento.

Elaborado por: Los autores.

Para evitar el daño por efecto de fatiga y ahuellamiento para período de 20 años los espesores se reajustan.

Tabla 23.

Espesores Reajustados.

Espesores Reajustados		
capas pavimento	cm	in
carpeta asfáltica	15	5,91
base granular	16	6,30
sub-base granular	17	6,69
total	48	18,9

Nota. Los espesores de cada capa del pavimento dependen del período de diseño. Elaborado por: Los autores.

Comprobación con el software “WESLEA”

INPUT STRUCTURE

Transformación de Unidades al Sistema Internacional SI

Módulos de cada capa

Módulo del Asfalto: 400000 Psi =2757,90MPa

Módulo de la Base: 29000 Psi =199,95MPa

Módulo de la Sub-Base: 17000 Psi =117,21MPa

Modulo Resiliente (Sub-rasante): 11591,236 Psi = 79,9MPa

Ingreso de Datos en WESLEA

Figura 77.

Ingreso de datos WESLEA.

	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
Material Type	AC	GB	GB	Soil	Soil
Min Modulus, MPa	551.6	20.7	20.7	20.7	20.7
Layer Modulus, MPa	2757.9	200	117.2	79.9	79.9
Max Modulus, MPa	13789.5	206.8	206.8	206.8	206.8
Poisson's Ratio	0.35	0.4	0.4	0.45	0.45
Min - Max	0.15 - 0.4	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5
Thickness, cm	15.01	16	16.99	2537.46	Infinite
Slip (0 or 1)		1	1	1	1

Nota. La información estructural se obtiene del diseño AASHTO 93. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

INPUT LOADS

Transformación de Unidades al Sistema Internacional SI

Magnitud de carga

Load Magnitude: 8,2 ton = 80,4145 kN

Tire Pressure: 100 Psi= 690kPa= 690kN/m²

Ingreso de datos

Loading Configuration

Colocar "Other" para configurar la distancia para eje rueda doble según la presión del neumático.

Total, Number of load Applications

Aquí se ingresa el número de ESAL's, en este caso 800003,0473

Load Magnitude

Aquí se ingresa la carga repartida para el número de llantas según el eje equivalente.

En el caso de un eje simple doble (8,2ton) la magnitud de la carga se divide para cuatro (número de llantas del eje)

Por tanto:

$$\frac{80,4 \text{ kN}}{4} = 20,1 \text{ kN}$$

Location Data

Load number: 1

X: 0 cm

Y: 0 cm

Load number: 2

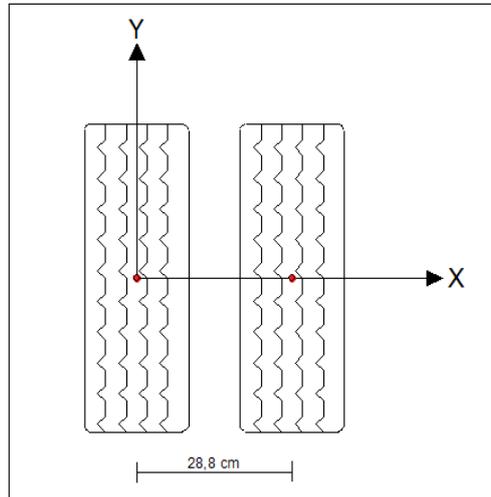
$$Si; a = \sqrt{\frac{20.1 \text{ kN}}{690 \text{ kN/m}^2 * \pi}} = 0,096054 \text{ m} = 9,6054 \text{ cm}$$

X: 3*9,6054cm=28.82 cm

Y: 0 cm

Figura 78.

Ancho del Eje.



Nota. El esquema del ancho del eje es la distancia de centro a centro de los neumáticos.

Elaborado por: Los autores.

Ingreso Datos en WESLEA

Figura 79.

Ingreso Datos en WESLEA.

Loads (F1 for Help)

Loading Configuration

Single Tandem Tridem Steer Other

Total Number of Load Applications: 800003

Number of Loads in Configuration

Number of Loads: 2

Load number: 2 of 2 total loads.

Load Control

Next Load

Previous Load

Location Data

X: 28.8 cm

Y: 0 cm

Load Data

Uniform?

Load Magnitude: 20.1 kN

Tire Pressure: 690.03 kPa

OK Cancel

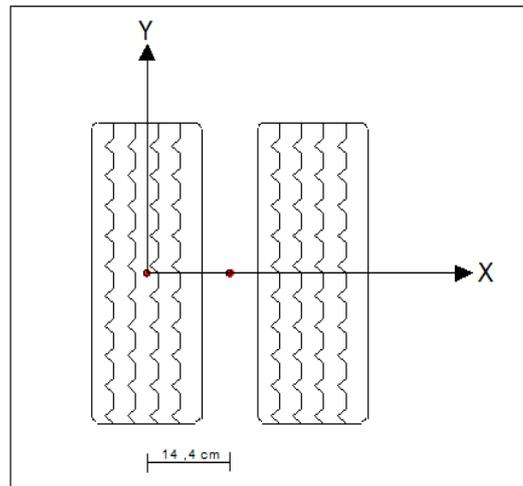
Nota. En esta ventana de cargas se coloca el número de ESAL's, carga, presión de aire y ubicación del ancho de eje. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

EVALUATIONS LOCATIONS

Los Puntos de análisis se ubican en el eje de cada rueda y en el centro del eje de rueda doble, estos estarán ubicados a una altura (z) entre la carpeta asfáltica y la base, y entre la sub-base y la sub-rasante. Por lo que se tendría 4 puntos de análisis.

Figura 80.

Distancia al centro del eje de rueda doble.

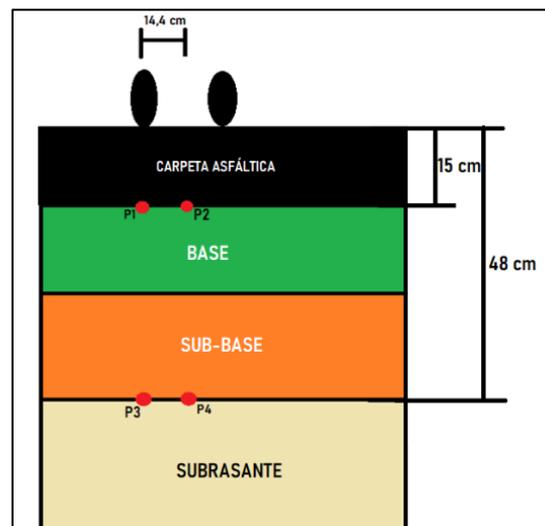


Nota. Es la mitad del ancho del eje. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Puntos de análisis

Figura 81.

Ubicación puntos de análisis



Nota. Los puntos de análisis son cuatro, dos en la parte inferior de la carpeta asfáltica, y dos en la parte superior de la sub-rasante. Elaborado por: Los autores.

Location number: 1

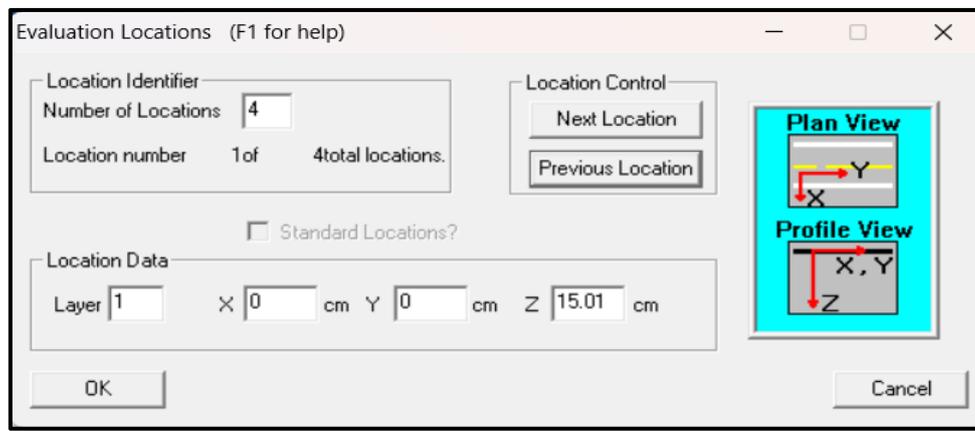
X: 0 cm

Y: 0 cm

Z: 15 cm (Espesor carpeta asfáltica)

Figura 82.

Ubicación 1 de evaluación software WESLEA.



Nota. El punto 1 de análisis se ubica en la parte inferior de la carpeta asfáltica, bajo el neumático. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Location number: 2

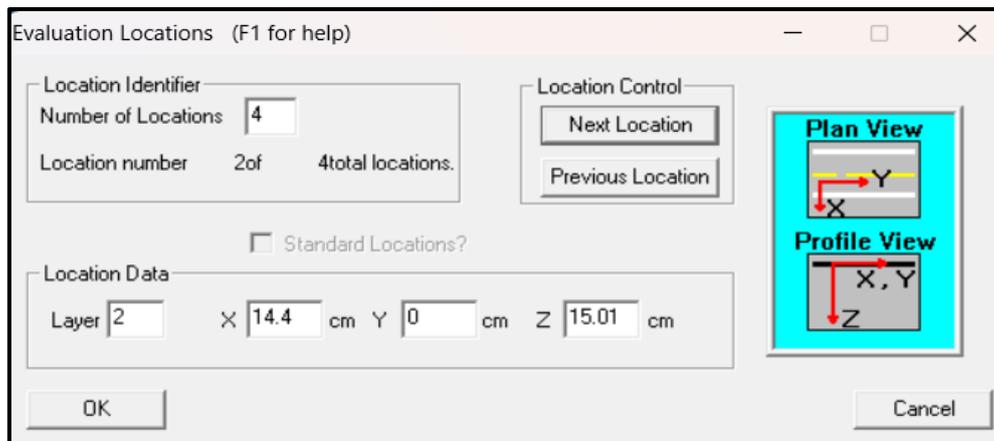
X: $\frac{28}{2} = 14,40 \text{ cm}$ (Distancia al centro del eje de rueda doble)

Y: 0 cm

Z: 15 cm (Espesor carpeta asfáltica)

Figura 83.

Ubicación 2 de evaluación software WESLEA.



Nota. El punto 2 de análisis se ubica en la parte inferior de la carpeta asfáltica, entre los dos neumáticos. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

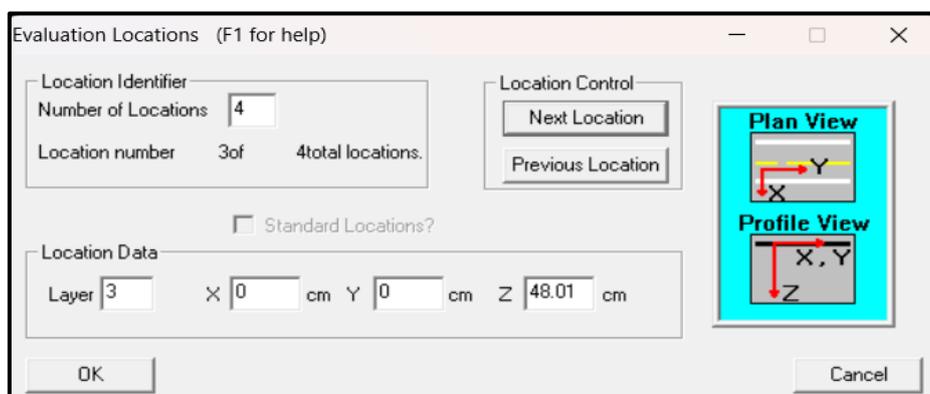
Location number: 3

X: 0 cm; Y: 0 cm

Z: 15cm +16cm +17cm = 48cm (Espesor carpeta asfáltica + Espesor Base + Espesor Sub-Base).

Figura 84.

Ubicación 3 de evaluación software Weslea.



Nota. El punto 3 de análisis se ubica en la parte superior de la sub-rasante, bajo el neumático. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

Location number: 4

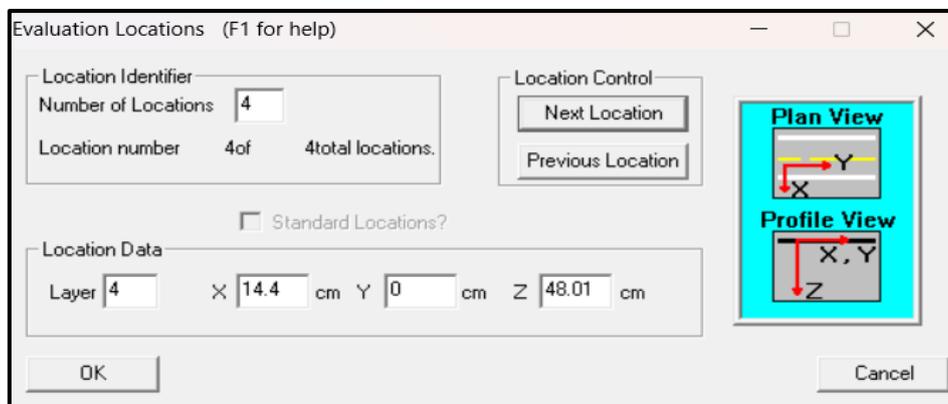
X: $\frac{28}{2} = 14,40 \text{ cm}$ (Distancia al centro del eje de rueda doble)

Y: 0 cm

Z: 15cm +16cm +17cm = 48cm (Espesor carpeta asfáltica + Espesor Base + Espesor Sub-Base).

Figura 85.

Ubicación 4 de evaluación software WESLEA.



Nota. El punto 4 de análisis se ubica en la parte superior de la sub-rasante, entre los dos neumáticos. Elaborado por: Los autores a través del Software Weslea.

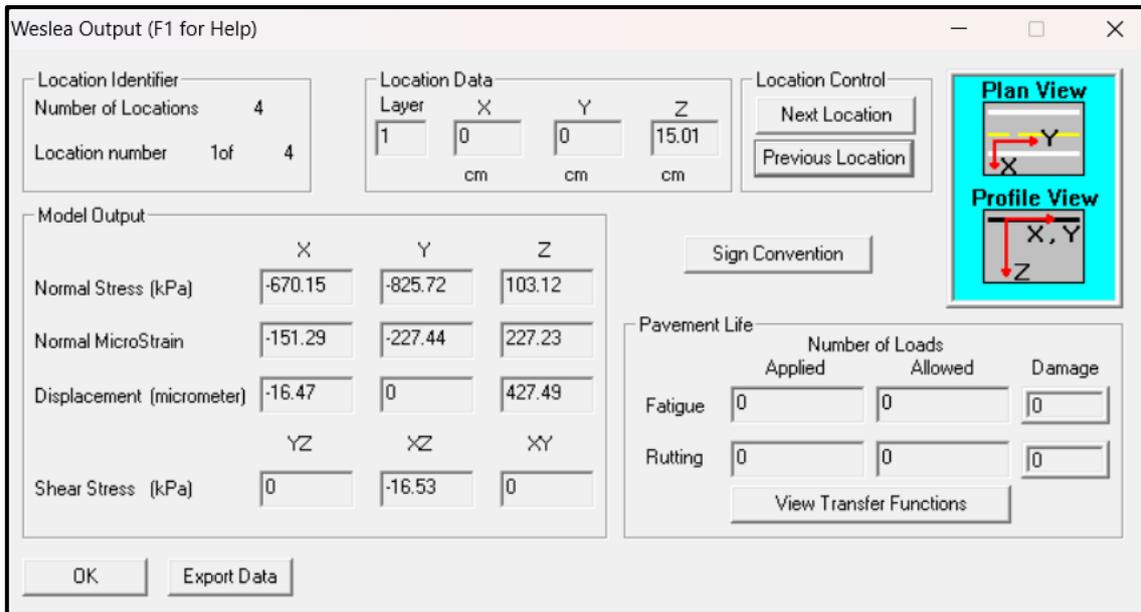
Output

Los resultados se presentan para cada punto de análisis.

Resultados del punto 1 de análisis

Figura 86.

Resultados del punto 1 de análisis.

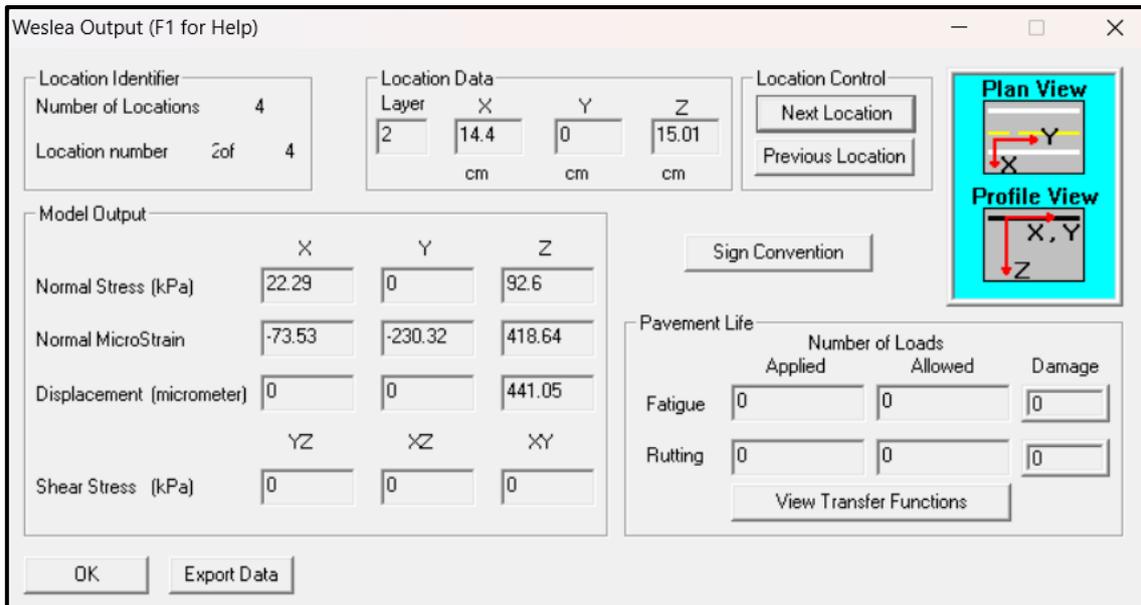


Nota. El punto más crítico de la capa 1 y 2 analiza el daño por fatiga en el pavimento. Fuente: Software Weslea.

Resultados del punto 2 de análisis

Figura 87.

Resultados del punto 2 de análisis.



Nota. El punto más crítico de la capa 1 y 2 analiza el daño por fatiga en el pavimento. Fuente: Software Weslea.

Resultados del punto 3 de análisis

Figura 88.

Resultados del punto 3 de análisis.

The screenshot shows the 'Weslea Output (F1 for Help)' window. It contains several sections:

- Location Identifier:** Number of Locations: 4, Location number: 3 of 4.
- Location Data:** Layer: 3, X: 0 cm, Y: 0 cm, Z: 48.01 cm.
- Location Control:** Next Location, Previous Location.
- Model Output:**

	X	Y	Z
Normal Stress (kPa)	-8	-10.53	28.74
Normal MicroStrain	-130.44	-160.66	308.51
Displacement (micrometer)	-20.4	0	307.82
Shear Stress (kPa)	YZ: 0	XZ: -4.23	XY: 0
- Sign Convention:** A diagram showing a 3D coordinate system with X, Y, and Z axes.
- Pavement Life:**

	Number of Loads Applied	Number of Loads Allowed	Damage
Fatigue	0	0	0
Rutting	0	0	0

Buttons at the bottom include 'OK' and 'Export Data'.

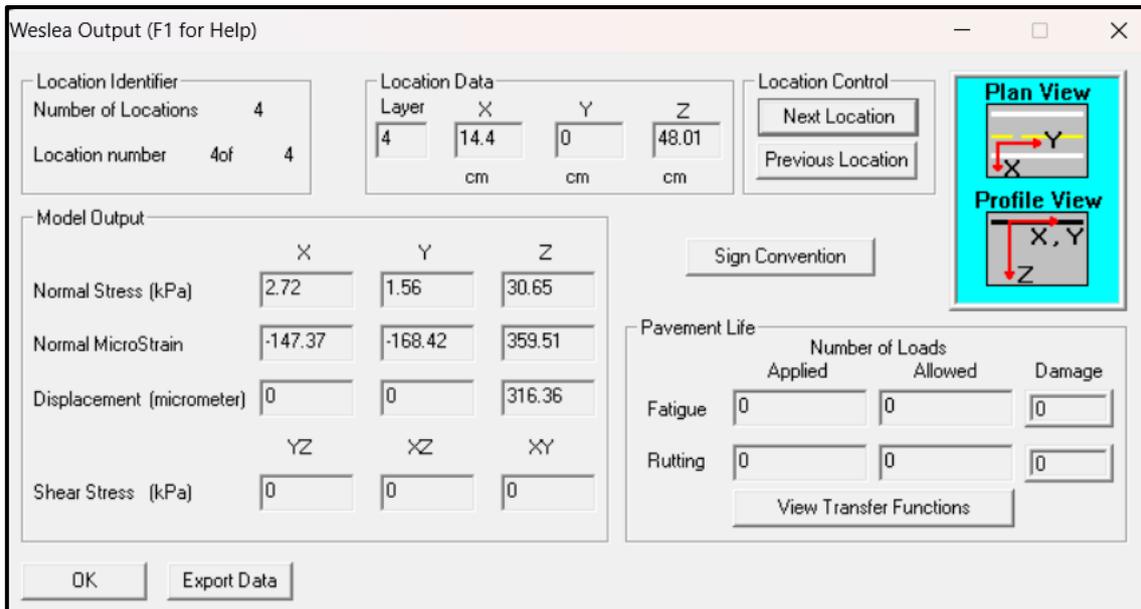
Nota. El punto más crítico de la capa 3 y 4 analiza el daño por ahuellamiento en el pavimento.

Fuente: Software Weslea.

Resultados del punto 4 de análisis

Figura 89.

Resultados del punto 4 de análisis.



Nota. El punto más crítico de la capa 3 y 4 analiza el daño por ahuellamiento en el pavimento.

Fuente: Software Weslea.

La fatiga (Fatigue) y ahuellamiento (Rutting) no arroja el programa WESLEA debido a que no se trabajó con un ancho de eje programado, porque el área de contacto varía de acuerdo a la presión del neumático 100 Psi. Y por lo tanto su ancho de eje no será el mismo.

Para determinar la fatiga y ahuellamiento se deberá calcular manualmente.

Determinación de esfuerzos por el método de multicapas (Jones-Pattie)

Para el cálculo por este método se utiliza Tri-capa, haciendo una reducción de capas.

Primera capa: Carpeta Asfáltica

Segunda capa: Base y sub-base

Tercera capa: Sub-rasante.

Modulo Equivalente: Base y Sub-Base

Se calcula mediante la ecuación:

$$E_{eq} = \left[\frac{h_1 \sqrt[3]{E_1} + h_2 \sqrt[3]{E_2}}{h_1 + h_2} \right]^3$$

$$E_{eq} = \left[\frac{6,299 \text{ in} * \sqrt[3]{29000 \text{ Psi}} + 6,693 \text{ in} * \sqrt[3]{17000 \text{ Psi}}}{6,299 \text{ in} + 6,693 \text{ in}} \right]^3$$

$$E_2 = E_{eq} = 22287,8651 \text{ Psi}$$

Espesor de Capa 2 Base y Sub-Base equivalente

Se calcula mediante la ecuación:

$$D_{base} = 6,299 \text{ in}$$

$$D_{sub-base} = 6,693 \text{ in}$$

$$D_2 = D_{base} + D_{sub-base}$$

$$D_2 = 6,299 \text{ in} + 6,693 \text{ in} = 12,99 \text{ in} = 33 \text{ cm}$$

Funciones para las soluciones gráficas y tabulares para esfuerzos

La relación de módulos de elasticidad de la capa 1 y 2 se calcula mediante la ecuación:

$$k_1 = \frac{E_1}{E_2}$$

$$k_1 = \frac{2757904 \text{ kPa}}{153669,481 \text{ kPa}} = 17,947$$

La relación de módulos de elasticidad de la capa 2 y 3 se calcula mediante la ecuación:

$$k_2 = \frac{E_2}{E_3}$$

$$k_2 = \frac{22287,865 \text{ Psi}}{11591,236 \text{ Psi}} = 1,923$$

La relación de radio de contacto y altura 2 se calcula mediante la ecuación:

$$A = \frac{a}{h_2}$$

a: radio del contacto con el neumático.

El radio de contacto con el neumático se calcula mediante la ecuación:

$$a = \sqrt{\frac{P}{Q * \pi}}$$

$$a = \sqrt{\frac{20.1 \text{ kN}}{690 \text{ kN/m}^2 * \pi}} = 0,096054 \text{ m} = 9,6054 \text{ cm}$$

$$h_2 = 16 \text{ cm} + 17 \text{ cm}$$

$$A = \frac{9,6054 \text{ cm}}{33 \text{ cm}} = 0,2913$$

La relación de alturas se calcula por la ecuación:

$$H = \frac{h_1}{h_2}$$

$$H = \frac{15 \text{ cm}}{33 \text{ cm}} = 0,455$$

Las combinaciones de los cuadros de factores que fueron elaborados por Pattie son los siguientes:

Factor k1

0.2 , 2.0 , 20.0 , 200.0

Factor k2:

0.2 , 2.0 , 20.0 , 200.0

Factor a1(A):

0.1 , 0.2 , 0.4 , 0.8 , 1.6 , 3.2

Factor H:

0.125 , 0.25, 0.5 , 1.0 , 2.0 , 4.0 , 8.0

Por lo que es necesario interpolar los datos para obtener resultados más precisos o escoger el valor más aproximado de los parámetros de entrada.

k1: 17,947 \approx 20

k2: 1,923 \approx 2

a1(A): 0,2913 \approx 0.2

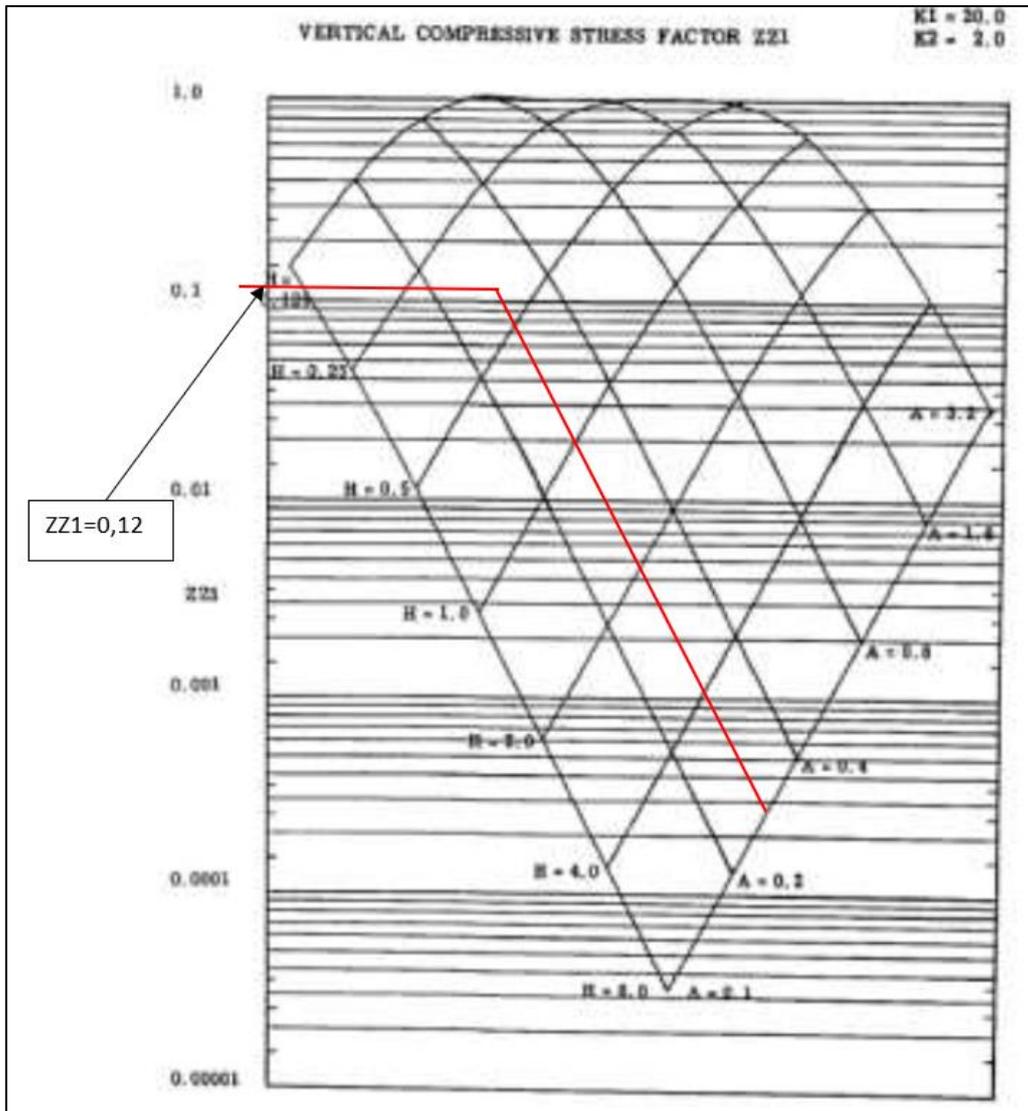
H: 0,455 \approx 0.5

Con estos parámetros se obtiene los valores de: ZZ1, ZZ2, ZZ1-RR1, ZZ2-RR2

Para los factores de ZZ1 y ZZ2, se ubica en el ábaco (K1 y K2) de las figuras 90, 91, 92 y 93 los valores de A y H.

Figura 90.

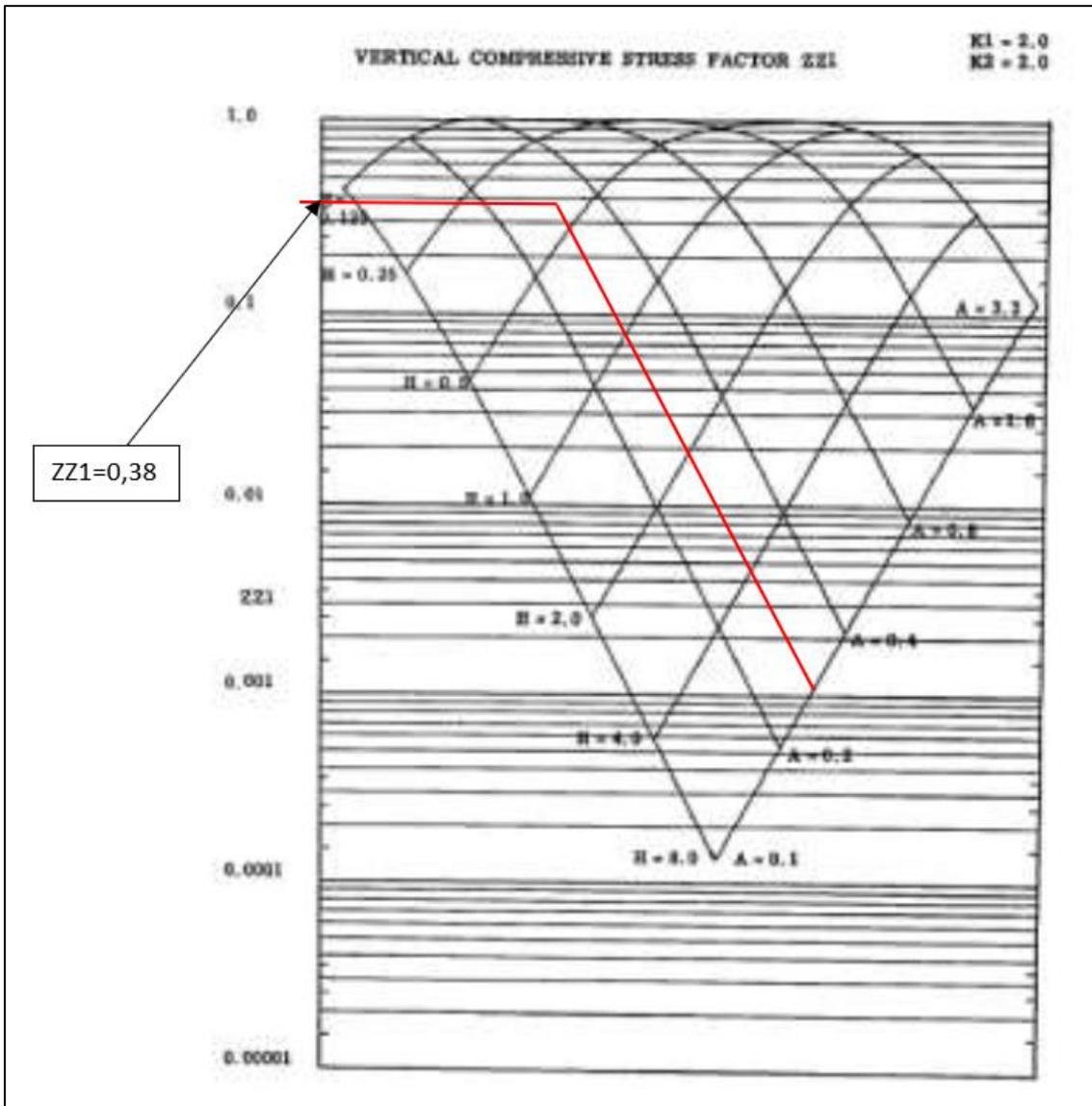
Figura de Pattie para factor ZZ1 ($K1=20, K2=2$).



Nota. Los factores $ZZ1$ dependen de $k1, k2, H$ y $A(a1)$. Fuente: Construcción y diseño de pavimentos.

Figura 91.

Figura de Pattie para factor ZZ1 (K1=2, K2=2).



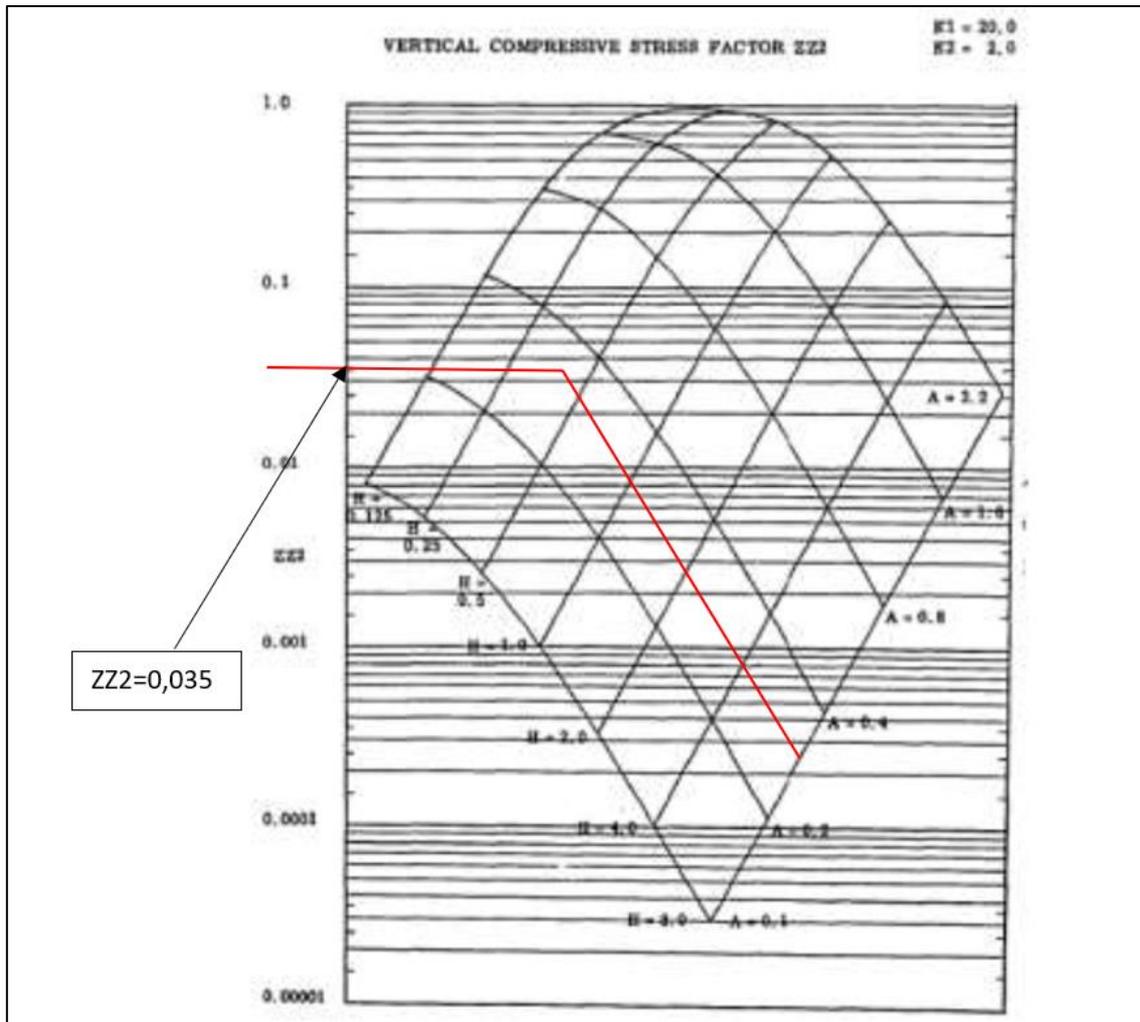
Nota. Los factores ZZ1 dependen de k1, k2, H y A(a1). Fuente: Construcción y diseño de pavimentos.

Interpolación K1: 17,947

$$ZZ1(K1 = 17,947) = 0,38 - \left(\frac{0,38 - 0,12}{2 - 20} \right) * (2 - 17,947) = 0,15$$

Figura 92.

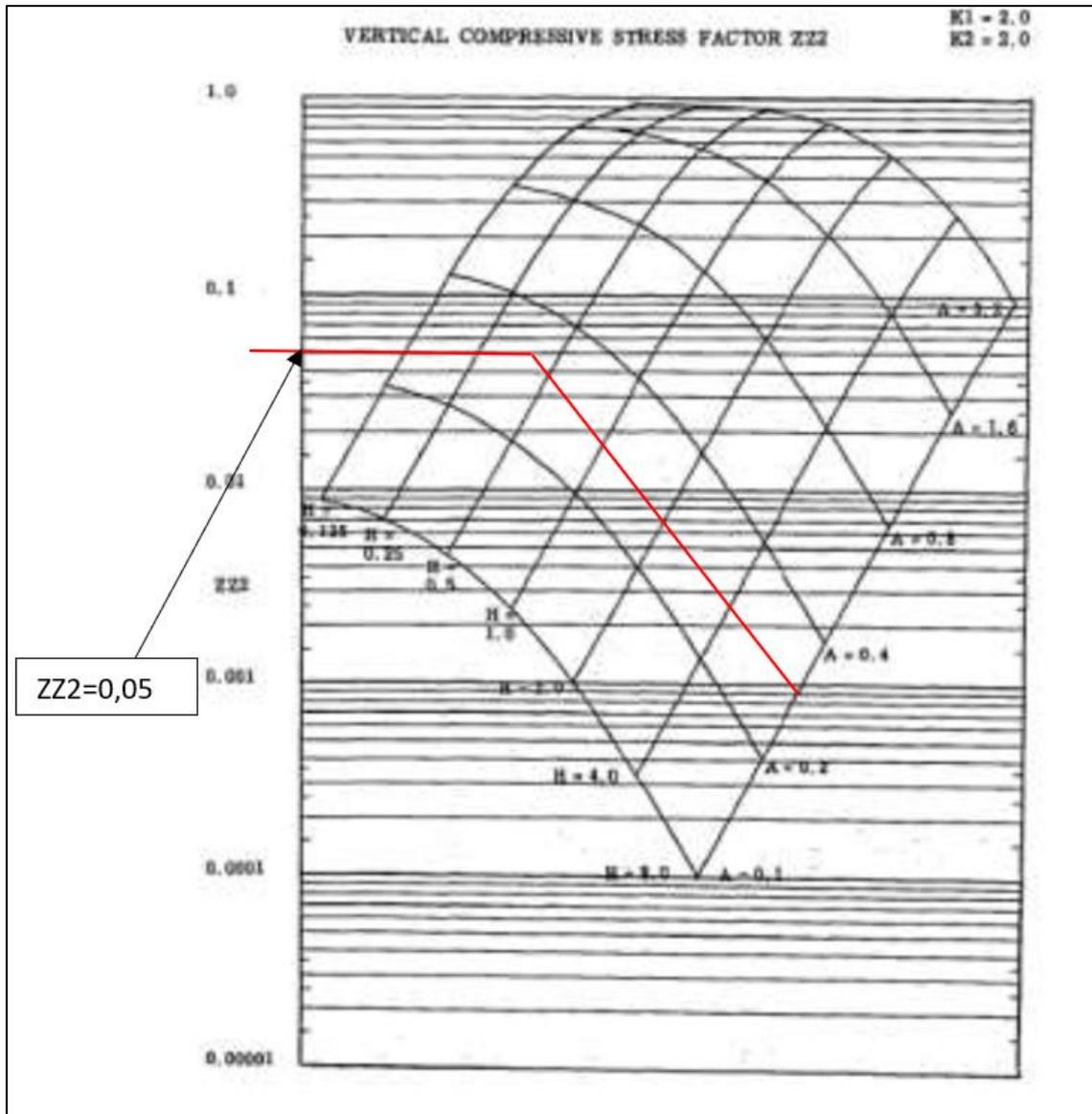
Figura de Pattie para factor ZZ2 (K1=20, K2=2).



Nota. Los factores $ZZ2$ dependen de $k1$, $k2$, H y $A(a1)$. Fuente: Construcción y diseño de pavimentos.

Figura 93.

Figura de Pattie para factor ZZ2 (K1=2, K2=2).



Nota. Los factores $ZZ2$ dependen de $k1$, $k2$, H y $A(a1)$. Fuente: Construcción y diseño de pavimentos.

Interpolación K1: 17,947

$$ZZ2(K1 = 17,947) = 0,05 - \left(\frac{0,05 - 0,035}{2 - 20} \right) * (2 - 17,947) = 0,04$$

Figura 94.

Cuadro de factores de esfuerzo tricapa $H=0,5$.

Cuadro 10 c. Factores de esfuerzo tricapa. $H = 0,5$, $k_1 = 2,0$ a $200,0$, $k_2 = 2,0$ a $200,0$.

a_1	$H = 0,5$ $k_1 = 0,2$			$H = 0,5$ $k_1 = 2,0$			$H = 0,5$ $k_1 = 20,0$			$H = 0,5$ $k_1 = 200,0$		
	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	(ZZ2 - RR3)	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	(ZZ2 - RR3)	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	(ZZ2 - RR3)	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	(ZZ2 - RR3)
	$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$		
0.1	0.01705	0.00206	0.01030	0.08398	0.00181	0.00906	0.16526	0.00098	0.00488	0.22388	0.00033	0.00163
0.2	0.05724	0.00804	0.04020	0.28904	0.00711	0.03554	0.58918	0.00386	0.01929	0.81903	0.00130	0.00648
0.4	0.13089	0.02924	0.14622	0.72313	0.02634	0.13172	1.66749	0.01474	0.07369	2.52558	0.00506	0.02529
0.8	0.15514	0.08369	0.41843	1.03603	0.07992	0.39962	3.23121	0.04967	0.24834	6.11429	0.01844	0.09221
1.6	0.13250	0.13729	0.68647	0.83475	0.13973	0.69863	3.54853	0.11279	0.56395	10.82705	0.05399	0.26993
3.2	0.06976	0.12674	0.63371	0.45119	0.10667	0.53336	1.27334	0.09527	0.47637	9.34212	0.08624	0.43121
	$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$		
0.1	0.01617	0.01074	0.00537	0.08250	0.00878	0.00439	0.17997	0.00440	0.00220	0.26620	0.00128	0.00064
0.2	0.05375	0.04206	0.02103	0.28318	0.03454	0.01727	0.64779	0.01744	0.00872	0.98772	0.00500	0.00254
0.4	0.11770	0.15534	0.07767	0.70119	0.12954	0.06477	1.89817	0.06722	0.03361	3.19580	0.01996	0.00998
0.8	0.11252	0.47045	0.23523	0.96681	0.41187	0.20594	4.09392	0.23476	0.11738	8.71973	0.07434	0.03717
1.6	0.04897	0.90072	0.45036	0.70726	0.85930	0.42965	6.22002	0.62046	0.31023	20.15765	0.23838	0.11919
3.2	0.1380	0.94385	0.47912	0.33878	0.96353	0.48176	5.41828	0.93831	0.46916	34.25229	0.54931	0.27466
	$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$		
0.1	0.01439	0.02415	0.00121	0.08044	0.01778	0.00089	0.19872	0.00911	0.00046	0.31847	0.00257	0.00013
0.2	0.04669	0.09519	0.00476	0.27574	0.07027	0.00351	0.72264	0.03620	0.00181	1.19598	0.01025	0.00051
0.4	0.09018	0.36008	0.01800	0.67174	0.26817	0.01341	2.19520	0.14116	0.00706	1.02732	0.04047	0.00202
0.8	0.01260	1.19151	0.05958	0.86191	0.91168	0.04558	5.24726	0.51585	0.02579	12.00885	0.15452	0.00773
1.6	-0.24336	2.95409	0.14770	0.39588	2.38377	0.11919	10.30212	1.59341	0.07967	32.77028	0.53836	0.02692
3.2	-0.53220	4.86789	0.24339	-0.41078	4.47022	0.22351	16.38520	3.69109	0.18455	77.62943	1.56409	0.07820
	$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$		
0.1	0.01243	0.03682	0.00018	0.07864	0.02515	0.00013	0.21440	0.01355	0.00007	0.37065	0.00387	0.00002
0.2	0.03912	0.14576	0.00073	0.26853	0.09968	0.00050	0.78493	0.05395	0.00027	1.40493	0.01544	0.00008
0.4	0.06006	0.56051	0.00280	0.64303	0.38497	0.00192	2.44430	0.21195	0.00126	4.86215	0.06118	0.00031
0.8	-0.10447	1.96771	0.00984	0.74947	1.36766	0.00684	6.23424	0.79588	0.00398	15.33902	0.23698	0.00118
1.6	-0.67154	5.77689	0.02888	-0.02761	4.08937	0.02045	14.11490	2.67578	0.01338	45.93954	0.86345	0.00432
3.2	-1.86126	13.63423	0.06817	-1.88545	10.25631	0.05128	29.95815	7.61457	0.03807	128.13051	2.80877	0.01404

Nota. Los cuadros para los factores ZZ1-RR1 y ZZ2-RR2 se presentan para cada H. Fuente: Construcción y diseño de pavimentos.

En este caso una interpolación del valor de $a=0,2913$ que está entre los valores 0,2 y 0,4 con los parámetros de $H=5$, $k_1=20$ y $k_2=2$

Como resultado de la interpolación se tiene:

$$ZZ1-RR1 = 1,2186$$

$$ZZ2-RR2 = 0,040166$$

Para mayor exactitud de resultados, se interpola los datos cercanos a estos parámetros de entrada. Utilizando la tabla de la figura 94, y la figura 95:

Figura 95.

Cuadro de factores de esfuerzo tricapa $H=0,25$.

Cuadro 10 b. Factores de esfuerzo tricapa. $H = 0.25$, $k_1 = 2.0$ a 200.0 , $k_2 = 2.0$ a 200.0 .												
a_i	$H = 0.25$ $k_1 = 0.2$			$H = 0.25$ $k_1 = 2.0$			$H = 0.25$ $k_1 = 20.0$			$H = 0.25$ $k_1 = 200.0$		
	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	(ZZ2 - RR3)	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	(ZZ2 - RR3)	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	(ZZ2 - RR3)	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	(ZZ2 - RR3)
	$k_2 = 0.2$			$k_2 = 0.2$			$k_2 = 0.2$			$k_2 = 0.2$		
0.1	0.05598	0.00274	0.01370	0.28658	0.00277	0.01384	0.61450	0.00202	0.01011	0.86644	0.00090	0.00451
0.2	0.12628	0.01060	0.05302	1.72176	0.01075	0.05377	1.76675	0.00793	0.03964	2.71354	0.00357	0.01784
0.4	0.14219	0.03744	0.18722	0.03476	0.03842	0.19211	3.59650	0.02931	0.14653	6.83021	0.01365	0.06824
0.8	0.12300	0.09839	0.49196	0.88833	0.10337	0.51687	4.58845	0.08771	0.43854	13.19664	0.04624	0.23118
1.6	0.10534	0.13917	0.69586	0.66438	0.14102	0.70510	2.31165	0.14039	0.70194	13.79134	0.10591	0.52955
3.2	0.05063	0.11114	0.55569	0.41539	0.09804	0.49020	1.24415	0.07587	0.37934	2.72901	0.08608	0.43037
	$k_2 = 2.0$			$k_2 = 2.0$			$k_2 = 2.0$			$k_2 = 2.0$		
0.1	0.05477	0.01409	0.00704	0.28362	0.01353	0.00677	0.63215	0.00962	0.00481	0.96553	0.00407	0.00203
0.2	0.12136	0.05484	0.02742	0.70225	0.05278	0.02639	1.83766	0.03781	0.01891	3.10763	0.01611	0.00806
0.4	0.12390	0.19780	0.09890	0.96634	0.19178	0.09589	3.86779	0.14159	0.07079	8.37852	0.06221	0.03110
0.8	0.06482	0.56039	0.28019	0.68885	0.55211	0.27605	5.50796	0.44710	0.22355	18.95534	0.21860	0.10930
1.6	-0.00519	0.96218	0.48108	0.17331	0.95080	0.47540	4.24281	0.90115	0.45058	31.18909	0.58553	0.29277
3.2	-0.02216	0.87221	0.43610	-0.05691	0.89390	0.44695	1.97494	0.93254	0.46627	28.98500	0.89191	0.44595
	$k_2 = 20.0$			$k_2 = 20.0$			$k_2 = 20.0$			$k_2 = 20.0$		
0.1	0.05192	0.03116	0.00156	0.27580	0.02728	0.00136	0.65003	0.01930	0.00095	1.08738	0.00861	0.00043
0.2	0.11209	0.12227	0.00611	0.67115	0.10710	0.00536	1.90693	0.07623	0.00381	3.59448	0.03421	0.00171
0.4	0.08622	0.45504	0.02275	0.84462	0.39919	0.01996	4.13976	0.29072	0.01454	10.30923	0.13365	0.00668
0.8	-0.07351	1.44285	0.07214	0.21951	1.26565	0.06328	6.48948	0.98565	0.04928	26.41442	0.49135	0.02457
1.6	-0.40234	3.37001	0.18850	-1.22411	2.94860	0.14743	6.95639	2.55231	0.12762	57.46409	1.53883	0.07692
3.2	-0.71901	5.10060	0.25503	-3.04320	4.89878	0.24494	6.05854	4.76234	0.23812	99.29034	3.60964	0.18048
	$k_2 = 200.0$			$k_2 = 200.0$			$k_2 = 200.0$			$k_2 = 200.0$		
0.1	0.04956	0.04704	0.00024	0.26776	0.03814	0.00019	0.65732	0.02711	0.00014	1.19099	0.01311	0.00007
0.2	0.10066	0.18557	0.00093	0.63873	0.15040	0.00075	1.93764	0.10741	0.00054	4.00968	0.05223	0.00026
0.4	-0.04248	0.70524	0.00353	0.71620	0.57046	0.00285	4.26004	0.41459	0.00207	11.96405	0.20551	0.00103
0.8	-0.24071	2.40585	0.01203	-0.28250	1.92636	0.00963	6.94871	1.46947	0.00735	32.97364	0.77584	0.00388
1.6	-1.00743	6.82481	0.03412	-3.09856	5.35936	0.02680	8.55770	4.36521	0.02183	82.77997	2.63962	0.01320
3.2	-2.54264	15.45931	0.07730	-9.18214	12.64318	0.06322	10.63614	10.93570	0.05468	189.37439	7.60287	0.03801

Nota. Los cuadros para los factores ZZ1-RR1 y ZZ2-RR2 se presentan para cada H. Fuente: Construcción y diseño de pavimentos.

Interpolación ZZ1-RR1

En:

$$k_1=20, k_2=2, H=0,5$$

$$ZZ1-RR1(A=0,2)=0,64779$$

$$ZZ1-RR1(A=0,4)=1,89817$$

$$ZZ1 - RR1(A = 0,29131) = 0,64779 + \left(\frac{1,89817 - 0,64779}{0,4 - 0,2} \right) * (0,29131 - 0,2)$$

$$ZZ1 - RR1(A = 0,29131) = 1,2186$$

En:

$$k_1 = 20, k_2 = 2, H = 0,25$$

$$ZZ1-RR1(A=0,2)=1,83766$$

$$ZZ1-RR1(A=0,4)=3,86779$$

$$ZZ1 - RR1(A = 0,29131) = 2,76448$$

En:

$$k_1 = 20, k_2 = 2$$

$$ZZ1-RR1(H=0,5, A=0,2913)=1,21863$$

$$ZZ1-RR1(H=0,25, A=0,2913)=2,7644866$$

$$ZZ1-RR1(H=0,4545, A=0,2913)=1,499697$$

En:

$$k_1 = 20, k_2 = 0,2, H = 0,5$$

$$ZZ1-RR1(A=0,2)=0,58918$$

$$ZZ1-RR1(A=0,4)=3,23121$$

$$ZZ1-RR1(A=0,29131)=0,9912402$$

En:

$$k_1 = 20, k_2 = 2, H = 0,25$$

$$ZZ1-RR1(A=0,2)=1,76675$$

$$ZZ1-RR1(A=0,4)=3,5965$$

$$ZZ1-RR1(A=0,29131)=2,602096$$

En:

$k_1 = 20, k_2 = 0,2$

$ZZ1-RR1(H=0,5, A=0,2913)=0,9912402$

$ZZ1-RR1(H=0,25, A=0,2913)=2,602096$

$ZZ1-RR1(H=0,4545, A=0,2913)=1,2841231$

En:

$k_1 = 20$

$ZZ1-RR1(k_2=2, H=0,45455,A=0,2913)=1,499697$

$ZZ1-RR1(k_2=0,2, H=0,45455,A=0,2913)=1,2841231$

$ZZ1-RR1(k_2=1,923, H=0,45455,A=0,2913)=1,490454$

En:

$k_1 = 2, k_2 = 2, H = 0,5$

$ZZ1-RR1(A=0,2)=0,28318$

$ZZ1-RR1(A=0,4)=0,70119$

$ZZ1 - RR1(A = 0,29131) = 0,4740164$

En:

$k_1 = 2, k_2 = 2, H = 0,25$

$ZZ1-RR1(A=0,2)=0,70225$

$ZZ1-RR1(A=0,4)=0,96634$

$ZZ1 - RR1(A = 0,29131) = 0,8228165$

En:

$k_1 = 2, k_2 = 2$

$ZZ1-RR1(H=0,5, A=0,2913)=0,4740164$

$ZZ1-RR1(H=0,25, A=0,2913)=0,8228165$

$ZZ1-RR1(H=0,4545, A=0,2913)=0,5374346$

En:

$k_1 = 2, k_2 = 0,2, H = 0,5$

$ZZ1-RR1(A=0,2)=0,72313$

$ZZ1-RR1(A=0,4)=0,28904$

$ZZ1-RR1(A=0,29131)=0,4872175$

En:

$k_1 = 2, k_2 = 2, H = 0,25$

$ZZ1-RR1(A=0,2)=0,03476$

$ZZ1-RR1(A=0,4)=1,72176$

$ZZ1-RR1(A=0,29131)=0,9515845$

En:

$k_1 = 2, k_2 = 0,2$

$ZZ1-RR1(H=0,5, A=0,2913)=0,4872175$

$ZZ1-RR1(H=0,25, A=0,2913)=0,9515845$

$ZZ1-RR1(H=0,4545, A=0,2913)=0,5716479$

En:

$$k_1 = 2$$

$$ZZ1-RR1(k_2=2, H=0,45455, A=0,2913)=0,5374346$$

$$ZZ1-RR1(k=0,2, H=0,45455, A=0,2913)=0,5716479$$

$$ZZ1-RR1(k=1,923, H=0,45455, A=0,2913)=0,5389016$$

Para:

$$ZZ1-RR1(k_1=17,946986, k_2=1,923, H=0,45455, A=0,2913)=1,3819$$

Interpolación ZZ2-RR2

En:

$$k_1 = 20, k_2 = 2, H = 0,5$$

$$ZZ2-RR2(A=0,2)=0,01744$$

$$ZZ2-RR2(A=0,4)=0,06722$$

$$ZZ2 - RR2(A = 0,29131) = 0,0401663$$

En:

$$k_1 = 20, k_2 = 2, H = 0,25$$

$$ZZ2-RR2(A=0,2)=0,03781$$

$$ZZ2-RR2(A=0,4)=0,14159$$

$$ZZ2 - RR2(A = 0,29131) = 0,0851893$$

En:

$$k_1 = 20, k_2 = 2$$

$$ZZ2-RR2(H=0,5, A=0,2913)=0,0401663$$

$$ZZ2-RR2(H=0,25, A=0,2913)=0,0851893$$

$$ZZ2-RR2(H=0,4545, A=0,2913)=0,0483523$$

En:

$$k1= 20, k2=0,2, H=0,5$$

$$ZZ2-RR2(A=0,2)=0,00386$$

$$ZZ2-RR2(A=0,4)=0,01474$$

$$ZZ2-RR2(A=0,29131)=0,0088271$$

En:

$$k1= 20, k2=2, H=0,25$$

$$ZZ2-RR2(A=0,2)=0,00793$$

$$ZZ2-RR2(A=0,4)=0,02931$$

$$ZZ2-RR2(A=0,29131)=0,0176907$$

En:

$$k1= 20, k2=0,2$$

$$ZZ2-RR2(H=0,5, A=0,2913)=0,0088271$$

$$ZZ2-RR2(H=0,25, A=0,2913)=0,0176907$$

$$ZZ2-RR2(H=0,4545, A=0,2913)=0,0104387$$

En:

$$k1= 20$$

$$ZZ2-RR2(k2=2, H=0,45455,A=0,2913)=0,0483523$$

$$ZZ2-RR2(k2=0,2, H=0,45455,A=0,2913)=0,0104387$$

$$ZZ2-RR2(k2=1,923, H=0,45455,A=0,2913)=0,0467267$$

En:

$$k1= 2, k2=2, H=0,5$$

$$ZZ2-RR2(A=0,2)=0,03454$$

$$ZZ2-RR2(A=0,4)=0,12954$$

$$ZZ2 - RR2(A = 0,29131) = 0,0779109$$

En:

$$k1= 2, k2=2, H=0,25$$

$$ZZ2-RR2(A=0,2)=0,05278$$

$$ZZ2-RR2(A=0,4)=0,19178$$

$$ZZ2 - RR2(A = 0,29131) = 0,1162384$$

En:

$$k1= 2, k2=2$$

$$ZZ2-RR2(H=0,5, A=0,2913)=0,0779109$$

$$ZZ2-RR2(H=0,25, A=0,2913)=0,1162384$$

$$ZZ2-RR2(H=0,4545, A=0,2913)=0,0848795$$

En:

$$k1= 2, k2=0,2, H=0,5$$

$$ZZ2-RR2(A=0,2)=0,00711$$

$$ZZ2-RR2(A=0,4)=0,02634$$

$$ZZ2-RR2(A=0,29131)=0,0158892$$

En:

$$k1= 2, k2=2, H=0,25$$

$$ZZ2-RR2(A=0,2)=0,01075$$

$$ZZ2-RR2(A=0,4)=0,03842$$

$$ZZ2-RR2(A=0,29131)=0,0233823$$

En:

$$k1= 2, k2=0,2$$

$$ZZ2-RR2(H=0,5, A=0,2913)=0,0158892$$

$$ZZ2-RR2(H=0,25, A=0,2913)=0,0233823$$

$$ZZ2-RR2(H=0,4545, A=0,2913)=0,0172516$$

En:

$$k1= 2$$

$$ZZ2-RR2(k2=2, H=0,45455,A=0,2913)=0,0848795$$

$$ZZ2-RR2(k=0,2, H=0,45455,A=0,2913)=0,0172516$$

$$ZZ2-RR2(k=1,923, H=0,45455,A=0,2913)=0,0819798$$

Para:

$$ZZ2-RR2(k1=17,946986,k2=1,923, H=0,45455,A=0,2913)=0,0507475$$

Cálculo de Esfuerzos

Para la determinación de esfuerzos verticales en los puntos 1 y 3 (puntos críticos de análisis) se calcula con las ecuaciones:

$$\sigma_{z1} = q * ZZ1$$

$$\sigma_{z2} = q * ZZ2$$

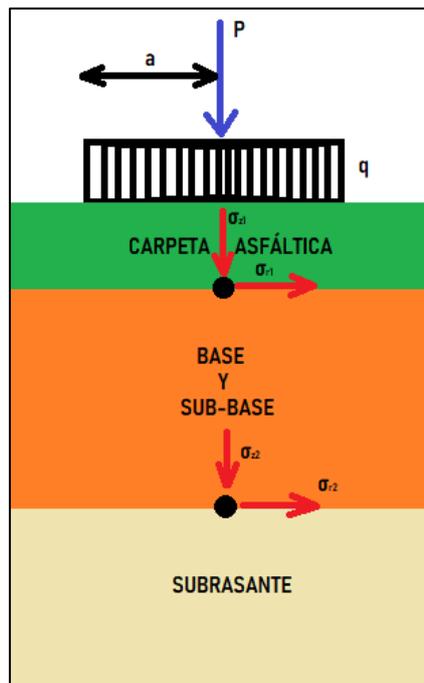
Para la determinación de esfuerzos horizontales en los puntos 1 y 3 (puntos críticos de análisis) se calcula con las ecuaciones siguientes, los puntos de calculo se muestran en la figura 96:

$$\sigma_{z1} - \sigma_{r1} = q * (ZZ1 - RR1)$$

$$\sigma_{z2} - \sigma_{r2} = q * (ZZ2 - RR2)$$

Figura 96.

Esfuerzos en los puntos críticos.



Nota. Ilustración de los esfuerzos verticales y horizontales Elaborado por: Los autores.

$$\sigma_{z1} = q * ZZ1$$

$$\sigma_{z1} = 100 \text{ Psi} * 0,15 = 15 \text{ Psi}$$

$$\sigma_{z2} = q * ZZ2$$

$$\sigma_{z2} = 100 \text{ Psi} * 0,04 = 4 \text{ Psi}$$

$$\sigma_{r1} = \sigma_{z1} - (q * ZZ1 - RR1)$$

$$\sigma_{r1} = 15 \text{ Psi} - (100 \text{ Psi} * 1,3819) = -123,19 \text{ Psi}$$

$$\sigma_{r2} = \sigma_{z2} - (q * ZZ2 - RR2)$$

$$\sigma_{r2} = 4 \text{ Psi} - (100 \text{ Psi} * 0,0507475) = -1,07475 \text{ Psi}$$

Determinación de fatiga y ahuellamiento

Para que no produzca daño por fatiga y ahuellamiento el Damage (daño) tiene que ser menor al 100%.

Fatiga

Allowed : Nf

ϵ_t : Deformación a tensión máxima (ϵ_x, ϵ_y) en el fondo de la carpeta asfáltica.

$$N_f = 2,83 * 10^{-6} \left(\frac{10^6}{\epsilon_t} \right)^{3,148}$$

$$N_f = 2,83 * 10^{-6} \left(\frac{1}{230,32} \right)^{3,148}$$

$$N_f = 800140,7619$$

Applied: $w_{18} = 800003,0473$

El daño se calcula por la ecuación:

$$Df = \frac{\text{Applied}}{\text{Allowed}} * 100$$

$$Df = \frac{800003,0473}{800140,7619} * 100$$

$$Df = 99,98\%$$

Ahuellamiento

ϵ_v : Deformación a compresión máxima (ϵ_z) en la parte superior de la sub – rasante.

$$Nd = 1 * 10^{16} \left(\frac{1}{\epsilon_v} \right)^{3,87}$$

$$Nd = 1 * 10^{16} \left(\frac{1}{359,51} \right)^{3,87}$$

$$Nd = 1286466,633$$

El daño se calcula por la ecuación 30.

$$Dd = \frac{\text{Applied}}{\text{Allowed}} * 100$$

$$Dd = \frac{800003,0473}{1286466,633} * 100$$

$$Dd = 62,18\%$$

Tabla 24.

Resultados fatiga y ahuellamiento.

	Damage (%)	
Fatigue (Fatiga)	99,98	OK
Rutting (Ahuellamiento)	62,18	OK

Nota. Resultados del porcentaje de daño. Elaborado por: Los autores.

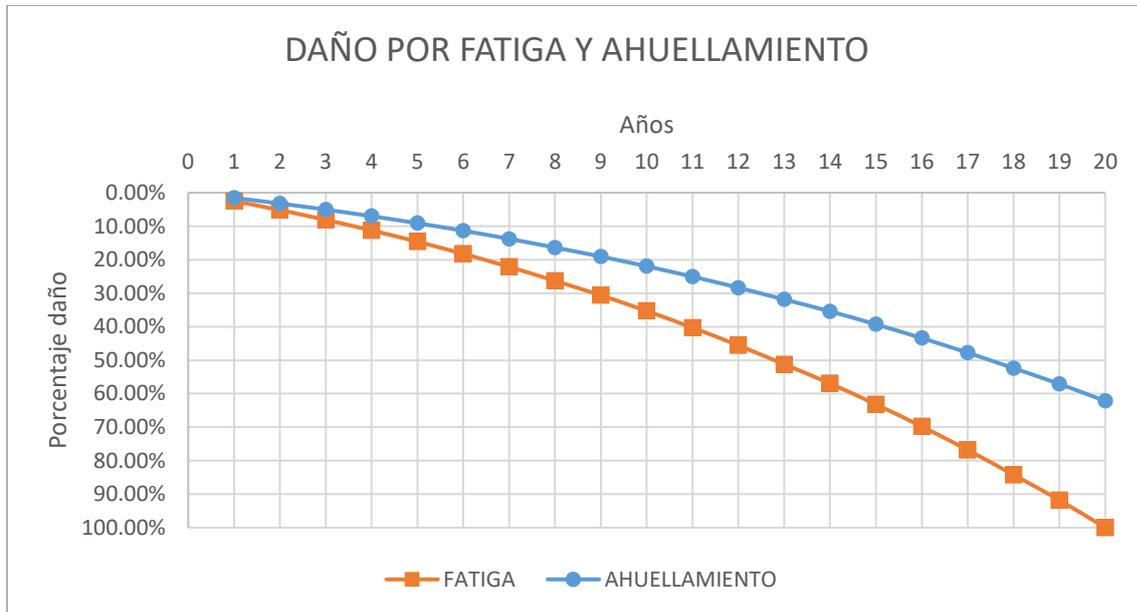
Tabla 25.*Porcentaje de daño por fatiga y ahuellamiento.*

Años	W18 (ESAL's)	Daño	
		Fatiga	Ahuellamiento
1	19829	2,48%	1,54%
2	41393	5,17%	3,22%
3	64809	8,10%	5,04%
4	89984	11,25%	6,99%
5	116968	14,62%	9,09%
6	145966	18,24%	11,35%
7	177099	22,13%	13,77%
8	210494	26,31%	16,36%
9	245112	30,63%	19,05%
10	282495	35,31%	21,96%
11	322333	40,28%	25,06%
12	364760	45,59%	28,35%
13	409916	51,23%	31,86%
14	455631	56,94%	35,42%
15	505560	63,18%	39,30%
16	558482	69,80%	43,41%
17	614548	76,80%	47,77%
18	673919	84,23%	52,39%
19	734275	91,77%	57,08%
20	800003	99,98%	62,19%

Nota. El daño por fatiga y ahuellamiento depende del número de ESAL's. Elaborado por: Los autores.

Figura 97.

Porcentaje de daño por fatiga y ahuellamiento.



Nota. El daño por daño por fatiga se presenta unos años antes de producirse ahuellamiento.

Elaborado por: Los autores.

Comparación Resultados Software WESLEA vs. Método Manual de Multicapas (Jones-Pattie)

Punto de análisis: Carpeta Asfáltica

Tabla 26.

Comparación de resultados del Software WESLEA vs. Método Jones en el punto de análisis: Carpeta Asfáltica.

Esfuerzos	Software WESLEA		Método (Jones-Patie)
	kPa	Psi	Psi
Esfuerzos verticales	σ_z	103,12	14,9562856
	σ_y	-825,72	-119,760514
Esfuerzos horizontales	σ_x	-670,15	-97,1970018
			σ_r -123,19

Nota. La diferencia de resultados es insignificante. Elaborado por: Los autores.

Punto de análisis: Sub-rasante

Tabla 27.

Comparación de resultados del Software WESLEA vs. Método Jones en el punto de análisis: Sub-rasante.

Esfuerzos	Software WESLEA		Método (Jones-Pattie)	
		kPa	Psi	Psi
Esfuerzos verticales	σ_z	28,74	4,16838295	σ_z 4
	σ_y	-10,53	-1,52724678	
Esfuerzos horizontales	σ_x	-8	-1,16030145	σ_r -1,07475

Nota. La diferencia de resultados es insignificante. Elaborado por: Los autores.

CONCLUSIONES

Se logró desarrollar una propuesta de una guía de manejo del Software “WESLEA”, esta guía proporciona una descripción detallada y didáctica de las características de software, por lo que es de fácil comprensión y uso, incluso para los que nunca han tenido antes una experiencia utilizando este software.

Con la existencia de esta guía, los usuarios de este software al seguir los pasos indicados en esta, podrán realizar sus trabajos de manera rápida y eficiente, lo que les permitirá ahorrar tiempo en sus actividades.

La guía de manejo del Software WESLEA será una herramienta muy importante, ya que proporcionará a los usuarios las instrucciones necesarias para el uso de las funciones del Software de una manera eficaz, mejorando su experiencia en el uso del mismo, ya que esta posee una metodología ágil y práctica sobre el uso del software WESLEA.

Con este software se puede comprobar si los espesores obtenidos por el diseño AASHTO 93 no producirán fatiga y ahuellamiento por lo que se puede concluir que los espesores obtenidos en el diseño AASHTO 93 tuvieron que ser modificados para que no se produzca daño por fatiga ni ahuellamiento.

En el cálculo manual de los esfuerzos los resultados varían por consecuencia de que los cuadros y graficos de Pattie son muy complejas (no lineales), hacer una interpolación de los datos de las funciones en las tablas llevó a una buena aproximación de resultados.

RECOMENDACIONES

Seguir los pasos detallados en la guía en el orden que se encuentra y no omitir ninguno de los pasos. Esto permitirá comprender de una manera mejor el funcionamiento del software y aprovechar las funciones que este ofrece.

Ingresar datos en el WESLEA correctamente, y en parte del cálculo manual por sistema de multicapas está en hacer varias interpolaciones para lograr resultados aproximados a los que arroja el software WESLEA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anónimo. (S.f). *GENERALIDADES Y DEFINICIONES SOBRE LOS PAVIMENTOS*. Obtenido de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2944/capitulo2.pdf>
- Aristizabal, L., Hoyos, J., Gil, O., Gómez, M., & Gómez, D. (2014). *DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE POR LOS MÉTODOS AASTHO Y RACIONAL*. Obtenido de <https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/16959/DISE%C3%91O%20DE%20UN%20PAVIMENTO%20FLEXIBLE.pdf?sequence=1>
- Condolo, E. (2022). *2.6. Volúmenes Y Proyección DE Tráfico*. Obtenido de <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-de-guayaquil/contratacion-publica/26-volumenes-y-proyeccion-de-trafico/16986682>
- CONSTRUMÁTICA. (29 de Noviembre de 2021). *Ensayo CBR*. Obtenido de https://www.construmatica.com/construpedia/Ensayo_CBR
- Cruz, J., & Escobar, C. (2019). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOFTWARE MULTICAPA ELÁSTICO PARA*. Obtenido de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/f22da4ae-a2b9-47bb-bd0e-b6861ff93ab9/content>
- Ferrovial. (2023). *Partes de una carretera*. Obtenido de <https://www.ferrovial.com/es/recursos/partes-de-una-carretera/>
- FUNDACIÓN LABORAL DE LA CONSTRUCCIÓN. (2006). *DICCIONARIO, DE LA CONSTRUCCIÓN*. Obtenido de <https://www.diccionariodelaconstruccion.com/procesos-productivos-obra-civil/firmes-y-pavimentos/capacidad-portante>
- Giordani, C., & Leone, D. (S.f). *PAVIMENTOS*. Obtenido de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Pavimentos.pdf
- GOBIERNO AUTONOMO PROVINCIAL DE ORELLANA. (S.f). *PLANIFICACION JEFATURA DE PROYECTOS*. Obtenido de https://www.compraspublicas.gob.ec/ProcesoContratacion/compras/PC/bajarArchivo.cpe?Archivo=PqvOubNYUwZpSyac463mus-leqhOYE6rS9-_q8ZvOM8,#:~:text=Estructura%20del%20Pavimento%3A%20Combinaci%C3%B3n%20de,los%20esfuerzos%20en%20la%20PLATAFORMA.
- HARDWARE. (2023). *HARDWARE*. Obtenido de <https://sites.google.com/prod/view/laramblahardware/p%C3%A1gina-principal>
- Lara, J. (S.f). *AJUSTE ECUACION DE PREDICCIÓN WITCZAK MODELO NCHRP 1-37A DEL MODULO DINAMICO E DE MEZCLAS ASFALTICAS*. Obtenido de [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/30244/Jose_Joaquin_Lara_Ruiz_2021.pdf?sequence=2&isAllowed=y#:~:text=El%20m%C3%B3dulo%20din%C3%A1mico%20\(%20CE,de%20la%20AASHTO%20%5B%5D.](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/30244/Jose_Joaquin_Lara_Ruiz_2021.pdf?sequence=2&isAllowed=y#:~:text=El%20m%C3%B3dulo%20din%C3%A1mico%20(%20CE,de%20la%20AASHTO%20%5B%5D.)
- Mendez, P. (2020). *Teorías Esfuerzos y Deformaciones*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/479967282/Teorias-Esfuerzos-y-Defornaciones-pdf#>
- Ministerio de Economía y Finanzas. (Febrero de 2015). *Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión*

pública de carreteras. Obtenido de https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/normas/normasv/2015/RD003-2015/Pautas_Pavimentos.pdf

Ministerio de Obras Públicas. (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Obtenido de https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf

Mocondino, J. (11 de Marzo de 2020). *¿Qué son los pavimento y cómo se clasifican?* Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-son-los-pavimento-y-c%C3%B3mo-se-clasifican-jhonn-jairo-mocondino-r-/?originalSubdomain=es>

ONROAD. (2023). *Tipos de pavimentos*. Obtenido de <https://www.onroad.to/teorico/clases-autoescuela/carretera/via/via-pavimentada/tipos-pavimentos>

Sanchez, D. (2001). *TECNOLOGIA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO*. Bogota: Bhandar Editores.

Scipion, E. (1999). *Diseño de carreteras*. Obtenido de <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2011/08/manual-de-diseno-de-carreteras.pdf>

Universidad EAFIT. (2006). *Comportamiento dinámico de mezclas asfálticas*. Obtenido de <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/download/795/703/2323>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Áridos o Agregados: Nombre genérico para distintos conjuntos de partículas minerales, de diferentes tamaños, que proceden de la fragmentación natural o artificial de las Rocas.

Asfalto: Betún sólido, semisólido o líquido, de color entre negro o pardo oscuro, encontrado en depósitos naturales u obtenido artificialmente como un residuo del petróleo. (Ministerio de Obras Públicas, 2002)

Capacidad portante (o soportante): Aptitud de un suelo o roca, en desmonte; relleno o capa de firme para soportar las cargas del tránsito.

Capa de rodadura o superficie: Capa superior de la calzada, de material especificado, designada para dar comodidad al tránsito.

Carpeta: Capa de concreto asfáltico, de un espesor determinado, que se coloca para que sirva de capa de rodadura.

CBR: ensayo que mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para sub-rasante, sub base y base de pavimentos. Se efectúa bajo condiciones controladas de humedad y densidad. (CONSTRUMÁTICA, 2021)

Daño: Afectación producida en alguna de las capas del pavimento debido a factores externos como cargas o factores climáticos.

Estructura del Pavimento: Combinación de capas de Sub-base, Base y de Superficie o rodadura colocadas sobre una Sub-rasante, para soportar las cargas del tránsito y distribuir los esfuerzos en la plataforma. (GOBIERNO AUTONOMO PROVINCIAL DE ORELLANA, S.f)

Fatiga: daños ocasionados por la circulación del vehículo que generan grietas en la parte inferior de la carpeta asfáltica y con el tiempo

Input: entrada de datos en un software.

Módulo Resiliente: medida de la capacidad de una capa de pavimento de almacenar o absorber energía sin que este experimente deformación permanente.

Módulo dinámico de la mezcla asfáltica: valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y el de la deformación unitaria máxima, obtenido en un ensayo a compresión (uniaxial o triaxial), a flexión y tracción indirecta, utilizando cargas en forma cóncava. (Lara, S.f)

Output: salida de datos de un software.

Pavimento: Nombre genérico para toda la "estructura" de un pavimento (Firme). No obstante, se lo utiliza también para designar solo la capa de rodadura, especialmente cuando ella está constituida por una carpeta.

Rasante: Línea de gradiente a nivel de la superficie de rodadura del camino.

Software: Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas. (HARDWARE, 2023)

Sub-base: Capas, de espesor definido, de materiales que cumplen determinadas especificaciones, las cuales se colocan sobre una sub-rasante aprobada, para soportar la Capa de Base.

Sub-rasante: Superficie superior de la obra básica, preparada como fundación de la estructura de pavimento y de los espaldones.

TPDA: es la unidad de medida en el tráfico de una carretera que representa el volumen del tráfico promedio diario anual. Se determina a partir de las observaciones puntuales del tráfico y de los factores de variación. (Condolo, 2022)

Vía: Área debidamente acondicionada para el paso de peatones, cabalgaduras o vehículos.