

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**VALIDACIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL MÉTODO
EMPÍRICO MECANICISTA AASHTO 93 PARA LA
DETERMINACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO
APLICANDO EL MÉTODO MECANICISTA SHELL**

**TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADA POR:

Bach. COBEÑAS HUARHUA, ANTHONY ABRAHAN

Bach. JARA OCAÑA, LUIS ALBERTO

Asesor: Mg. Ing. ARÉVALO LAY, VÍCTOR ELEUTERIO

LIMA-PERÚ

2021

DEDICATORIA

A mi familia, sobre todo a mi madre Norma Huarhua por siempre ser la luz que ilumina mi camino y a las personas que nunca dejaron de confiar en mí.

Anthony Cobeñas Huarhua

El presente trabajo de investigación está dedicado a toda mi familia, en especial a mi madre Laura Jara y a mi hermana Dyana Figueroa, por todo su apoyo incondicional durante mi formación como ingeniero civil.

Luis Jara Ocaña

AGRADECIMIENTO

Agradezco plenamente a mi madre y a toda mi familia por ayudarme a cumplir esta gran meta de vida.

A nuestros asesores, por la paciencia y la vocación de impartir sus conocimientos para la elaboración de esta investigación.

Así mismo, a la Universidad Ricardo Palma por brindarnos un entorno competente durante nuestra etapa de formación como ingenieros.

Anthony Cobeñas y Luis Jara

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	13
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1 Descripción y formulación del problema general y específicos	15
1.1.1 Problema General.....	16
1.1.2 Problemas Específicos.....	16
1.2 Objetivo general y específico	17
1.2.1 Objetivo general	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Delimitación de la investigación: temporal, espacial y temática	17
1.3.1 Temporal	17
1.3.2 Espacial	17
1.3.3 Temática.....	17
1.4 Justificación del estudio	18
1.4.1 Justificación temática	18
1.4.2 Justificación social	18
1.4.3 Justificación económica	18
1.4.4 Justificación metodológica.....	18
1.5 Importancia del estudio	18
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	20
2.1 Antecedentes del estudio de investigación	20
2.2 Investigaciones relacionadas con el tema	21
2.2.1 Investigaciones internacionales.....	21
2.2.2 Investigaciones nacionales	24
2.3 Bases teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio	29
2.3.1 Pavimento.....	29
2.3.2 Metodologías de diseño de pavimentos flexibles.....	36
2.3.3 Método empírico – mecanicista AASHTO 93.....	42
2.3.4 Método mecanicista o racional - SHELL.....	46

2.3.5 Software Bisar	53
2.3.6 Tráfico vial	54
2.3.7 Suelos	90
2.4 Definición de términos básicos	96
2.5 Marco Normativo	97
2.5.1 Manual de Ensayo de Materiales – MTC.....	97
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS	101
3.1 Hipótesis	101
3.1.1 Hipótesis general	101
3.1.2 Hipótesis secundarias	101
3.2 Variables	101
3.2.1 Definición conceptual de variables	101
3.2.2 Operacionalización de variables.....	101
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	103
4.1 Tipo y nivel	103
4.2 Diseño de la investigación	103
4.3 Población y muestra	103
4.3.1 Población de estudio.....	103
4.3.2 Diseño muestral.....	103
4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	104
4.4.1 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	104
4.4.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos	104
4.4.3 Procedimientos para la recolección de datos.....	104
4.5 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información	105
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	106
5.1 Descripción del Proyecto	106
5.1.1 Ubicación y acceso.....	106
5.1.2 Pavimentos	107
5.1.3 Diseño geométrico.....	108
5.1.4 Diseño de pavimentos	110
5.2 Resultados del estudio de tráfico	112
5.2.1 Clasificación vehicular	112

5.2.2 Factor Camión.....	113
5.3 Resultados del estudio de suelos	119
5.3.1 Sectorización de suelos	124
5.4 Método AASHTO	132
5.5 Método Mecanicista SHELL	138
5.5.1 Tránsito.....	138
5.5.2 Temperatura	139
5.5.3 Propiedades de la base, sub base y sub resante	140
5.5.4 Características de la mezcla asfáltica	141
5.6 Aplicación del software Bisar	146
5.7 Análisis de resultados	154
5.8 Contratación de hipótesis	158
5.8.1 Hipótesis secundaria 1	158
5.8.2 Hipótesis secundaria 2.....	159
5.8.3 Hipótesis secundaria 3.....	160
CONCLUSIONES	162
RECOMENDACIONES	163
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	165
ANEXOS.....	168
Anexo 1: Matriz de consistencia.....	168
Anexo 2: Matriz operacional	170
Anexo 3: Gráficos de aplicación del Método mecanicista Shell	172
Anexo 4: Software Bisar 3.0.....	182

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Elementos estructurales de los pavimentos flexibles	31
Tabla 2: Elementos estructurales de los pavimentos rígidos	32
Tabla 3: Elementos estructurales de los pavimentos articulados.....	34
Tabla 4: Cuadro de comparación de los Métodos Empíricos y Mecanicistas	53
Tabla 5: Módulo de Poisson referencial	54
Tabla 6: Factores de Distribución Direccional de Carril	57
Tabla 7: Factores de Crecimiento Acumulado (Fca) para el Cálculo de Números de Repeticiones EE	58
Tabla 8: Configuración de Ejes	59
Tabla 9: Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE) Para Pavimentos Flexibles	60
Tabla 10: Factor de Ajuste por Presión de Neumático (Fp) para Ejes Equivalentes (EE)	62
Tabla 11: Definición de cada elemento de Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes de 8.2tn	63
Tabla 12: Número de Repeticiones Acumuladas de Ejes Equivalentes de 8.2 tn en el Carril de Diseño Para Pavimentos Flexibles.....	64
Tabla 13: Clasificación vehicular por categorías.....	66
Tabla 14: Pesos y medidas máximas permitidas I	67
Tabla 15: Pesos y medidas máximas permitidas II.....	68
Tabla 16: Pesos y medidas máximas permitidas III	69
Tabla 17: Datos básicos de los vehículos tipo M.....	70
Tabla 18: Factores de equivalencia de carga por tipo de vehículo	71
Tabla 19: Factor de ejes equivalentes por tipo de vehículo de la Panamericana Norte	71
Tabla 20: Clasificación vehicular de la Federal Highway Administration (FHWA).....	72
Tabla 21: Computo de valor de vehículos pesados según ejemplo guía AASHTO 93	74
Tabla 22: Resumen de ejemplos de factores de equivalencia por eje y factor vehículo Camión para pavimento flexible	75

Tabla 23: Distribución de camiones en vías rurales según el Instituto del Asfalto (2000).....	75
Tabla 24: Distribución de camiones en vías urbanas según el Instituto del Asfalto (2000).....	76
Tabla 25: Factor Camión en vías rurales según el Instituto del Asfalto (2000).....	77
Tabla 26: Factor Camión en vías urbanas según el Instituto del Asfalto (2000).....	77
Tabla 27: Pesos máximos autorizados por configuración de ejes vehiculares	78
Tabla 28: Vehículos Adoptados en la Clasificación I del DNIT	79
Tabla 29: Vehículos Adoptados en la Clasificación II del DNIT.....	80
Tabla 30: Factores de equivalencia de carga AASHTO	81
Tabla 31: Factores de equivalencia de carga USACE	81
Tabla 32: Factores de equivalencia de carga USACE	82
Tabla 33: Resumen de los factores de vehículo (Carga máxima).....	82
Tabla 34: Tipos de vehículos de carga comercial.....	83
Tabla 35: Carga de referencia adoptadas por INVIAS para el diseño de pavimentos asfálticos.....	84
Tabla 36: Factores vehiculares de deterioro promedios según tipo de vehículo	84
Tabla 37: Variabilidad de los factores vehiculares de deterioro según tipo de vehículo en distintos tramos de la red vial nacional de Colombia (año 2003).....	85
Tabla 38: Factor Camión en algunas carreteras colombianas por cada dirección.....	85
Tabla 39: Factor Camión a nivel nacional de Colombia	86
Tabla 40: Vehículos dominantes en cada clase AUSTROADS	86
Tabla 41: Distribución de la carga de tráfico utilizada en el desarrollo de gráficos de diseño de ejemplo.....	87
Tabla 42: Rango de valores de Factor camión según Austroads	88
Tabla 43: Clasificación de vehículos para conteos de tráfico.....	89
Tabla 44: Clasificación de vehículos comerciales	89
Tabla 45: Factor equivalente de vehículos (VEF) por tipo de vehículo	90
Tabla 46: Número de calicatas para exploración de Suelos	91
Tabla 47: Número de Ensayos MR y CBR.....	93

Tabla 48: Clasificación por su Orografía.....	108
Tabla 49: Características geométricas de la vía.....	110
Tabla 50: Sectores definitivos.....	111
Tabla 51: Espesores calculado para una proyección de 20 años	111
Tabla 52: Cumplimiento del diseño respecto del Número Estructural	112
Tabla 53: Comparación de estudio de clasificación vehicular	112
Tabla 54: Clasificación vehicular	113
Tabla 55: Comparación del valor factor camión	114
Tabla 56: Cálculo de EAL según Expediente Técnico	116
Tabla 57: Cálculo de EAL según Manual de AASHTO.....	117
Tabla 58: Cálculo de EAL según Manual Pavimentado de Bajo volumen de Tránsito	117
Tabla 59: Cálculo de EAL según Manual de Colombia	117
Tabla 60: Cálculo de EAL según Manual de Austroads.....	117
Tabla 61: Cálculo de EAL según Manual de South África	118
Tabla 62: Resumen de valores de EAL por cada manual	118
Tabla 63: Valor resultante del ensayo de Proctor Modificado	119
Tabla 64: Resultados del ensayo de refracción sísmica.....	120
Tabla 65: Resultados de la clasificación de suelos SUCS y la clasificación de suelos AASHTO	122
Tabla 66: Porcentajes de tipos de suelos según la clasificación AASHTO.....	123
Tabla 67: Categorías de subrasante en función del CBR.....	123
Tabla 68: Resultados de los ensayos de suelos respecto del CBR.....	124
Tabla 69: Sectorización por tipo de material	125
Tabla 70: Sectorización de tramos homogéneos por CBR	128
Tabla 71: Conversión del Ed o Mr a CBR (%).....	128
Tabla 72: Resultado de la sectorización de tramos de diseño por CBR	129
Tabla 73: Método de las Diferencias Acumuladas	129
Tabla 74: Resumen del CBR promedio de los tramos de diseño.....	131
Tabla 75: Módulo Resiliente obtenido por correlación con CBR.....	132
Tabla 76: Valores de CBR y Mr de diseño	133
Tabla 77: Valores de confiabilidad recomendados según la función de la Vía	133

Tabla 78: Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) según rango de tráfico	134
Tabla 79: Coeficiente Estadístico de la Desviación Estándar Normal (Z_r) Para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) Según el Nivel de Confiabilidad seleccionado y el Rango de Tráfico	135
Tabla 80: Diferencial de Serviciabilidad (Δ PSI) Según Rango de Tráfico	136
Tabla 81: Parámetros de diseño	136
Tabla 82: Número estructural requerido SN por cada manual	137
Tabla 83: Coeficientes estructurales de las capas del pavimento	137
Tabla 84: Número estructural SN	138
Tabla 85: Resumen de Temperaturas medias mensuales en C° del registro del SENAMHI	139
Tabla 86: Factor de ponderación mensual y promedio	140
Tabla 87: Valores de penetración a distintas temperaturas	142
Tabla 88: Temperaturas según el espesor de la mezcla TMEZ	143
Tabla 89: Variación de temperaturas ΔT	143
Tabla 90: Stiffness o modulo dinámico del asfalto	144
Tabla 91: Dosificación en porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica	144
Tabla 92: Módulo dinámico de la mezcla asfáltica	145
Tabla 93: Código de la mezcla asfáltica	145
Tabla 94: Deformaciones máximas admisibles	145
Tabla 95: Código estructural de fatiga	146
Tabla 96: Código resultante de la mezcla asfáltica	146
Tabla 97: Módulo Resiliente de la carpeta asfáltica	147
Tabla 98: Módulo Resiliente de las capas granulares	147
Tabla 99: Módulo resiliente compuesto de las capas granulares	147
Tabla 100: Deformación Unitaria por tracción y por compresión resultantes del Bisar	148
Tabla 101: Deformación Unitaria por tracción y por compresión resultantes del Bisar	148
Tabla 102: Resumen de resultados de Ejes Equivalentes según su deformación	149
Tabla 103: Comparación del ESAL de diseño con los resultados del software Bisar	149

Tabla 104: Comparación del ESAL de diseño con los resultados del software Bisar	149
Tabla 105: Primera propuesta de espesores y resultado de deformaciones del pavimento.....	150
Tabla 106: Deformaciones unitarias resultantes del programa bisar	150
Tabla 107: Comparación de deformaciones unitarias halladas con fórmulas y con el software Bisar.....	150
Tabla 108: EE8.2 resultantes de la conversión de deformaciones unitarias del software Bisar	151
Tabla 109: Comparación de EE8.2 resultantes en tracción	151
Tabla 110: Comparación de EE8.2 resultantes en compresión	151
Tabla 111: Segunda propuesta de espesores y resultado de deformaciones del pavimento.....	152
Tabla 112: Deformaciones unitarias resultantes de la segunda optimización	152
Tabla 113: Conversión de deformaciones en compresión a ejes equivalentes de 8.2 ton.....	152
Tabla 114: Segunda comparación de EE8.2 resultantes en tracción	153
Tabla 115: Segunda comparación de EE8.2 resultantes en compresión.....	153
Tabla 116: Desempeño del pavimento según los métodos empírico mecanicista AASHTO 93 y mecanicista Shell	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Corte típico de un pavimento flexible	30
Figura 2: Corte típico de un pavimento rígido.....	32
Figura 3: Corte típico de un pavimento semirrígido.....	33
Figura 4: Grafico para el cálculo de espesores de pavimentos flexibles – Método CBR.....	38
Figura 5: Sistema multicapa elástico para el análisis de pavimentos.	40
Figura 6: Campo de esfuerzos (p, q) en la capa de base de un pavimento flexible con espesor de capa asfáltica de 6 cm; p es la presión media, y q es el esfuerzo desviador.....	41
Figura 7: Estructura de un pavimento flexible.....	46
Figura 8: Curva de ponderación de temperatura.....	49
Figura 9: Características de fatiga F1 y F2	51
Figura 10: Características de fatiga F1 y F2	52
Figura 11: Acceso por carretera - Acceso Lima-San Juan de Lurigancho	106
Figura 12: Acceso por carretera - Acceso Lima-Comas.....	107
Figura 13: Vista panorámica de la vía Pasamayito en la actualidad.....	108
Figura 14: Tipo de vehículo de diseño "B2"	109
Figura 15: Comparación de Factor camión.....	114
Figura 16: Comparación de Factor camión para vehículo B2	115
Figura 17: Comparación de Factor camión para vehículo C2	115
Figura 18: Comparación de Factor camión para vehículo C3	116
Figura 19: Cuadro resumen de EAL según cada manual.....	118
Figura 20: Perfil en sección del primer sector de suelos homogéneos	126
Figura 21: Perfil en sección del segundo sector de suelos homogéneos	127
Figura 22: Perfil en sección del segundo sector de suelos homogéneos	127
Figura 23: Gráfico resultante de los valores de diferencias acumuladas en su progresiva correspondiente	130
Figura 24: Progresiva y valor de CBR del alineamiento por sectores de diseño.....	131
Figura 25: Ecuación resultante del ensayo de penetración al cemento asfáltico	142

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	44
Ecuación 2.....	45
Ecuación 3.....	47
Ecuación 4.....	47
Ecuación 5.....	50
Ecuación 6.....	50
Ecuación 7.....	57
Ecuación 8.....	59
Ecuación 9.....	63
Ecuación 10.....	83
Ecuación 11.....	95
Ecuación 12.....	95
Ecuación 13.....	95
Ecuación 14.....	95

RESUMEN

En la presente tesis se planteó aplicar el método mecanicista SHELL para validar al método empírico – mecanicista AASHTO 93, donde su objetivo principal es determinar la estructura del pavimento del expediente técnico “Pasamayito”, a través de los parámetros de estas metodologías. Para ello se hizo uso de manuales nacionales e internacionales, para obtener varios modelos de análisis, y del software BISAR 3.0, para validar los modelos en función de los ejes equivalentes admisibles.

Para analizar los distintos modelos se procedió a uniformizar las terminologías de los tipos de vehículos B2, C2 y C3, así como un cuadro comparativo de los valores de Factor Camión para cada modelo, posteriormente se utilizó el modelo del expediente técnico, el modelo de Estados Unidos, el modelo de Bajo Volumen de Tránsito y el modelo de Australia.

Se obtuvieron los parámetros del método AASHTO 93 para analizar los espesores de las capas a través del Número Estructural, estos fueron: número acumulado de ejes equivalentes, módulo resiliente, confiabilidad, coeficiente estadístico de desviación estándar normal, desviación estándar combinada, variación de serviciabilidad y el número estructural propuesto. Asimismo, se pudo realizar una comparación entre el diseño de la estructura de pavimento de los 4 modelos mencionados en el párrafo anterior.

También se obtuvieron los parámetros del método SHELL para hallar el número de ejes equivalentes admisibles, estos fueron: el tránsito, la temperatura, las propiedades de la subrasante, subbase y base, características de la mezcla asfáltica; esta última se obtuvo de la cantera Yerbabuena, elegida en el expediente. Además, se utilizó los espesores hallados por el método AASHTO para el análisis en el software BISAR.

Finalmente, se consiguió alcanzar resultados favorables, donde se observa que al reducir los espesores con el criterio de tráfico de otros manuales influye en los ejes equivalentes admisibles para la estructura del pavimento, mejorando el desempeño en compresión, en comparación, 111.8% para el modelo A, 247.7% para el modelo B, 235.7% para el modelo C y más de 300% para el modelo D.

Palabras claves: Método AASHTO 93, método SHELL, pavimentos flexibles, número estructural, ejes equivalentes admisibles, estructura del pavimento.

ABSTRACT

In this thesis, it was proposed to apply the SHELL mechanistic method to validate the empirical-mechanistic method AASHTO 93, where its main objective is to determine the pavement structure of the technical file “Pasamayito”, through the parameters of these methodologies. For this, national and international manuals were used to obtain various analysis models, and the BISAR 3.0 software to validate the models based on the admissible equivalent axes.

To analyze the different models, we proceeded to standardize the terminologies of the types of vehicles B2, C2 and C3, as well as a comparative table of the Truck Factor values for each model, later the model of the technical file, the States model was used. United, the Low Traffic Volume model and the Australian model.

The parameters of the AASHTO 93 method were obtained to analyze the thickness of the layers through the Structural Number, these were: accumulated number of equivalent axes, resilient modulus, reliability, statistical coefficient of normal standard deviation, combined standard deviation, serviceability variation and the proposed structural number. Likewise, a comparison could be made between the design of the pavement structure of the 4 models mentioned in the previous paragraph.

The parameters of the SHELL method were also obtained to find the number of admissible equivalent axes, these were: the traffic, the temperature, the properties of the subgrade, subbase and base, characteristics of the asphalt mixture; the latter was obtained from the Yerbabuena quarry, chosen in the file. In addition, the thicknesses found by the AASHTO method were used for the analysis in the BISAR software.

Finally, it was possible to achieve favorable results, where it is observed that reducing the thickness with the traffic criteria of other manuals influences the equivalent axes admissible for the pavement structure, improving the compression performance, in comparison, 111.8% for the model A, 247.7% for model B, 235.7% for model C and more than 300% for model D.

Keywords: AASHTO 93 method, SHELL method, flexible pavements, structural number, allowable equivalent axes, pavement structure.

INTRODUCCIÓN

El Perú es un país con incontables vías de transporte donde estas son imprescindibles para el desarrollo y crecimiento de la población, por lo tanto, es importante evaluar la aplicación de metodologías mecanicistas para examinar el comportamiento y las deformaciones de la estructura del pavimento, donde los principales parámetros que influyen en el análisis de diseño son las cargas del tráfico, las condiciones ambientales y las características del suelo.

Para realizar el análisis planteado el método mecanicista SHELL genera un diseño de pavimento en términos de deformaciones y ejes equivalentes admisibles a través del software Bisar. Este programa utiliza espesores de las capas del pavimento, por lo que se utilizó el diseño estructural de la vía Pasamayito realizado a través del diseño más utilizado en nuestro país, el método empírico mecanicista AASHTO 93, basado en el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos y Pavimentos. En consecuencia, el tráfico es una de los parámetros más importantes para el diseño de pavimentos en ambas metodologías, por lo que se optó a utilizar, para este parámetro, manuales nacionales e internacionales para su análisis y verificación de los resultados de la estructura de pavimento.

En el capítulo I se desarrolla la descripción y formulación del problema, se formuló el problema, se plantearon los objetivos, tomando como objetivo general validar el método diseño empírico mecanicista AASHTO 93 con el método mecanicista Shell para determinar la estructura del pavimento de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas – San Juan de Lurigancho, Lima, año 2021, se delimitó la investigación y se describió la justificación e importancia de la investigación.

En el capítulo II se encuentra los antecedentes del estudio, investigaciones relacionadas al tema, bases teóricas vinculadas a las variables de estudio y, por último, se definen los términos básicos de la investigación.

En el capítulo III se planteó la hipótesis general y las hipótesis secundarias, así como la definición y operacionalización de las variables dependiente e independiente.

En el capítulo IV se presentó la metodología de la investigación, que comprende el tipo, método, diseño de la investigación, población y muestra, así como técnicas de recolección, procesamiento y análisis de información.

En el capítulo V se presentó la descripción del proyecto, los resultados del estudio de tráfico y de suelos, el método AASHTO y el método SHELL, realizando la contrastación de las hipótesis planteadas mediante lo obtenido en el desarrollo de la investigación. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación de los resultados obtenidos, la bibliografía utilizada y los anexos correspondientes.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción y formulación del problema general y específicos

Actualmente en la vía de la ruta vecinal LM-712, ubicada en los distritos de Comas y San Juan de Lurigancho, no cuenta con vías en óptimas condiciones para la transitabilidad de vehículos, tanto ligeros como pesados, con un flujo vehicular regular, esto influye directamente a los usuarios y la población. Por consiguiente, en los últimos años se ha incrementado el flujo vehicular de la vía ocasionando el deterioro en la estructura vial de este tramo que cumple la función de conexión desde la prolongación de la Av. Revolución (Pasamayito) hasta la Av. Miguel Grau de los distritos mencionados respectivamente.

Sabiendo que es muy relevante la condición de las vías de transporte terrestre, tanto las vías urbanas como las rurales, ya que por estos medios se dan distintas actividades socio – económicas, influyendo directamente en la sociedad; por ello la importancia de que estas vías puedan encontrarse en excelente o aceptables condiciones para su uso. Dado que se da en nuestra realidad, las entidades nacionales y las instituciones se ven en la labor de realizar un análisis para la implementación de métodos recientemente realizados en otros países, donde se hayan obtenido beneficios positivos en cuanto a su efectividad y economía permitiendo el desarrollo competente de las actividades sociales.

Se ha evidenciado un avance constructivo en los últimos años en el Perú y el mundo en los diferentes proyectos de infraestructura vial. Para las distintas vías terrestres en nuestra localidad, donde presenta una variedad de tipos de suelos y temperaturas climáticas, las exigencias han ido en incremento buscando abordar el problema del diseño de pavimentos flexibles desde un enfoque económico, diseño estructural y funcionalidad de la vía. Esto ha permitido el estudio de nuevas metodologías de diseño con el fin de contar con una estructura de pavimento que se adapte a los parámetros requeridos en sus respectivas zonas de estudio logrando un desempeño adecuado.

En el Perú entre los distintos métodos que se han venido utilizando en los últimos años el más común sigue siendo el método empírico mecanicista AASHTO 93, el cual está desarrollado en función a las cargas de tráfico, al comportamiento del pavimento y características de la subrasante donde nos permite obtener un espesor de pavimento que trabaje con una aceptable serviciabilidad. Desde esta perspectiva nacen

metodologías mecanicistas que tienen un enfoque puramente científico permitiendo el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante los parámetros climatológicos, de tráfico vehicular y las características de los materiales del pavimento, donde las propiedades de los materiales son conocidos y hallados en campo o en laboratorio. Por su puesto que ya se manejan conceptos mecanicistas como el Módulo de Resiliencia, pero solo como parámetro de cálculo que se correlaciona con el Valor Relativo de Soporte (VRS), y no como una propiedad fundamental del material. Estas alternativas de metodología mecanicista, como Alize, Shell, Chevron Oil, Kenlayer, Depav, donde plantean a la estructura del pavimento como un sistema multicapa linealmente elástico, determinando una combinación de espesores capaz de satisfacer los límites de esfuerzos y deformaciones durante el periodo de diseño del pavimento.

Para la presente investigación realizará la evaluación del método empírico – mecanicista AASHTO 93 con el método mecanicista Shell en la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas y San Juan de Lurigancho de la Provincia de Lima – Departamento de Lima.

Revisando los parámetros del estudio de tráfico y del estudio de suelos, se busca determinar la estructura del pavimento desde un enfoque en el cual facilite la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por ende, aumentar en gran medida la confiabilidad de los diseños, utilizando una alternativa de diseño de pavimento flexible, el método de diseño mecanicista SHELL.

1.1.1 Problema General

¿En qué medida se valida el método empírico mecanicista AASHTO 93 con el método mecanicista Shell para determinar la estructura del pavimento de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima?

1.1.2 Problemas Específicos

- a) ¿Cuáles son las consideraciones del estudio de tráfico en la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima?
- b) ¿Cuáles son las consideraciones del estudio de suelos en la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima?

- c) ¿Cómo se valida el método empírico mecanicista AASHTO 93 aplicando el modelo mecanicista de Shell?

1.2 Objetivo general y específico

1.2.1 Objetivo general

Validar el método diseño empírico mecanicista AASHTO 93 con el método mecanicista Shell para determinar la estructura del pavimento de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas – San Juan de Lurigancho, Lima, año 2021.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Revisar las consideraciones del estudio de tráfico para determinar la estructura del pavimento en los modelos empírico y mecanicista de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima
- b) Revisar las consideraciones del estudio de suelos para determinar la estructura del pavimento en los modelos empírico y mecanicista, de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima
- c) Aplicar el método empírico mecanicista AASHTO 93 y el método mecanicista Shell para validar la estructura del pavimento en la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima

1.3 Delimitación de la investigación: temporal, espacial y temática

1.3.1 Temporal

La investigación presenta material bibliográfico desde 2016 hasta la actualidad. También existe una limitación en cuanto a la bibliografía nacional por su escasez de material.

1.3.2 Espacial

Esta investigación se limitará en dos distritos de Lima, Comas y San Juan de Lurigancho, departamento de Lima, Perú.

1.3.3 Temática

La presente investigación se enfocará en evaluar el diseño de pavimento realizado en una ruta vecinal pero no habrá una verificación experimental de la

estructura de pavimento. Se realizará una investigación profunda en aspectos técnicos.

1.4 Justificación del estudio

1.4.1 Justificación temática

En la actualidad se siguen diseñando distintas vías terrestres en el Perú con pavimento flexible mediante el método AASHTO 93, por ello hay una necesidad de hacer una validación de este método utilizado con métodos recientemente realizados en otros países.

1.4.2 Justificación social

De acuerdo con investigaciones sobre la relación entre los métodos AASHTO 93 y SHELL, se logra asegurar con mayor precisión la vida útil del pavimento, produciendo a lo largo del tiempo una mejora a la población de los distritos de Comas y San Juan de Lurigancho.

1.4.3 Justificación económica

Esta investigación optimizará el pavimento ya diseñado, logrando reducir el tamaño de los espesores de las capas; por lo cual habrá una reducción en los costos de los materiales.

1.4.4 Justificación metodológica

La justificación metodológica se da para una determinación óptima de la estructura del pavimento a través de los resultados de la evaluación de los métodos de diseños de pavimentos flexibles. Los parámetros de diseño de los métodos se complementarán para obtener el comportamiento de la estructura del pavimento en términos de esfuerzos y deformaciones, de esta manera evaluaremos si el método aplicado AASHTO 93 presenta sobredimensionamientos en los espesores de las capas estructurales del pavimento para un rediseño.

1.5 Importancia del estudio

La investigación presenta una importancia significativa para los proyectos e investigaciones en Lima y el Perú, ya que al ser complementarios los parámetros de diseño de AASHTO 93 y los parámetros de diseño de SHELL, se podrá

evaluar de manera más eficiente el espesor de las distintas capas estructurales del pavimento. Esta relación de diseños determinará la estructura del pavimento más óptima, produciendo a lo largo del tiempo una mejora a la población.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio de investigación

Los pavimentos se originan frente a la necesidad del ser humano de trasladarse de un lugar a otro usando caminos que conserven características geométricas y estructurales que proporcionen seguridad y confort en toda su longitud; para que, de esta manera pudiesen mantener el flujo del tránsito vehicular y el tráfico al que estarían sometidos, esto está evidenciado por caminos con más de seis mil años de antigüedad ubicados en la zona del Cáucaso y el Golfo Pérsico.

Desde tiempos remotos el modo de trasladarse ha evolucionado de tal manera que, frente a los movimientos de intercambios comerciales o traslado masivo de personas, se pasó de la utilización de animales de carga al uso de mecanismos que se basan en el uso de la rueda como elemento de contacto con la superficie del pavimento, pero que según su configuración y la carga trasladada causan efectos de desgaste y deformación de los componentes de un pavimento. Por lo que, el Imperio Romano desarrolló sistemas viales que le permitieron movilizarse de manera segura y rápida. Así mismo, a lo largo del tiempo se desarrollaron diversos métodos de diseño de estos pavimentos basándose inicialmente en métodos empíricos mediante la ejecución de tramos de pruebas bajo sistemas de carga controlada, siendo construido por primera vez usando pavimento flexible en 1955 en Maryland y utilizando el asfalto como protección de la capa superficial de rodadura en el año de 1958 por primera vez en los Estados Unidos de América, tal y como se describe a continuación:

Como consecuencia de la Ley de Ayuda Federal para Carreteras de junio de 1956, en EE.UU. se produjo un gran plan de desarrollo del sistema de carreteras de esa nación, parte de este plan fue un ambicioso programa de investigación científica con ensayos a escala real, orientado a desarrollar con ensayos una metodología empírica que permita diseñar estructuras de pavimentos que tengan un comportamiento previsible y confiable durante todo su ciclo de vida. El programa fue exitoso: en 1961 la Asociación Americana de Carreteras publicó la Guía Preliminar de Pavimentos Rígidos y Flexibles (“AASHO Interim Guide for the Design of Rigid and Flexible Pavements”) y en 1972 la Asociación publica una Segunda versión de esta Guía Preliminar. En 1986 con la publicación de una nueva versión la guía deja de tener un carácter provisional; luego en 1993 después de la realización de investigaciones y ensayos adicionales AASHTO publica la última versión de esta guía. (Manual de

Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección: Suelos y Pavimentos, 2014, pp 9-10)

Frente a la necesidad de dotar de mayor vida útil frente a mayores exigencias de flujos de tránsito vehicular y al desarrollo de los vehículos motorizados, se estudiaron más a fondo los componentes de la estructura de los pavimentos logrando identificar de manera más científica y ordenada, los parámetros de diseño de pavimentos a tomar en cuenta para poder alcanzar la vida útil a la que se proyecta. Se consideraron aspectos sobre la calidad de los materiales de construcción que componen la estructura de los pavimentos, así como, aspectos climáticos, pasando de métodos empíricos mecanicistas a métodos considerados mecanicistas, ya que consideran las deformaciones unitarias causadas por el paso de los vehículos sobre las capas que conforman los pavimentos, brindando cada vez mejores resultados de desempeño debido al estudio de los aspectos que se han demostrado tienen alta incidencia en el cumplimiento de la vida útil de los pavimentos.

2.2 Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1 Investigaciones internacionales

Camargo, T. (2020). Realizó “La comparación de métodos de diseño y patologías en el pavimento flexible”. Tesis de pregrado de la Universidad Santo Tomás de Aquino. El investigador realizó el análisis de los métodos de diseño (AASHTO, RACIONAL) en la fase investigativa, para la identificación de patologías en el pavimento flexible y sus posibles causas y efectos. Por lo cual definió las variables de entrada en el diseño del pavimento flexible. Realizó la recopilación de información para la comparación entre los métodos de diseño en mención. El investigador del documento en mención identificó las patologías que comúnmente están presentes en el pavimento flexible, así como sus causas y los efectos que estas patologías producen.

Finalmente, el autor determinó que los métodos de diseño requieren de diferentes variables o parámetros que generan variaciones en el dimensionamiento necesario para el diseño de la estructura de pavimento flexible. Acerca del método de AASHTO, el autor consideró los parámetros más influyentes en el diseño del pavimento flexible relacionando las variables de serviciabilidad, confiabilidad, desviación estándar, drenaje y de tránsito, mientras que el método racional combina conceptos de resistencia a la fatiga, y

coeficiente de poisson que se relacionan con el método SHELL. Determinó también las patologías más comunes en el pavimento flexible tales como, fisuras, hundimientos, ahuellamientos, baches, exudación y piel de cocodrilo. Concluyendo finalmente que según la calidad de la información se debería de aplicar el método más adecuado para el diseño del pavimento flexible, mediante la determinación más aproximada de los parámetros de diseño que influyen en gran medida en los espesores de la estructura del pavimento.

Para el presente estudio, es importante rescatar el hecho de relacionar los parámetros de diseño del pavimento flexible bajo estos dos métodos ya que resultan ser complementarios para determinar qué tan afectado estará bajo ciertas circunstancias a las que será sometida como la demanda de tránsito y la calidad de los materiales granulares y como esto se manifiesta como limitación en la obtención de los parámetros adecuados ya que muchas veces se presentan las patologías del pavimento flexible de manera prematura.

Garzón, C. (2020). Indicó mediante su investigación “Evaluación de la metodología ASSHTO y SHELL para el diseño de pavimento de la vía “CARACOLÍ” que conecta a “La carretera del amor” En Villavicencio – Meta”. Tesis de pregrado de la Universidad Santo Tomas. Que consideró todas las etapas realizadas durante la ejecución del proyecto en mención, donde describió respectivamente la descripción de cada una de las etapas de manera secuencial, teniendo en cuenta que es una investigación del tipo mixta.

Por consiguiente, el autor evaluó las metodologías AASHTO y SHELL por medio del análisis comparativo para el diseño del pavimento de la vía “Caracolí” que conecta a “La Carretera del amor” en el Municipio de Villavicencio – Meta. De esta manera, determinó los factores del clima y el medio ambiente del área en estudio que afectan a la estructura del pavimento. Por otra parte, identificó las propiedades de los suelos de la vía en estudio, teniendo en cuenta la normativa INVIAS 2013. En ello, calculó el módulo resiliente de la subrasante por medio de una correlación con CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California). En este caso el investigador propuso el uso de material propio de la zona para su implementación como base o como subbase en la estructura del pavimento cumpliendo con la metodología de estabilización granulométrica. De esta manera calculó los costos directos que implican la construcción de estructuras de pavimento flexible diseñadas para el

tramo en estudio con precios del INVIAS y una cantera zonal o cercana al proyecto.

Finalmente, concluyó que la temperatura media anual ponderada para el diseño del pavimento en la ciudad de Villavicencio es de 26.10° C. Con lo cual se debería tener especial cuidado ya que podría padecer de susceptibilidad térmica y afectar negativamente el nivel de serviciabilidad de la vía en mención. Además de esto el investigador manifestó que en su país la condición más crítica es la deformación permanente principalmente a causa de las altas temperaturas medio ambientales, de acuerdo al método de diseño SHELL, dejando en segundo plano a la deformación por fatiga. Por otra parte, la precipitación media anual de diseño registró un valor de 4361.41 mm/año, por lo que al superar los 1200 mm/año se deben realizar ensayos de CR sumergidos.

Finalmente, observamos que la tesis de referencia que estamos analizando determina la importancia de los parámetros de diseño de ambos métodos en especial los parámetros de diseño del método Shell lo cuales no considera el método AASHTO 93, pero que, sin embargo, juega un papel muy importante según la realidad propia de la zona. Por lo que, resulta imprescindible la aplicación y consideración correcta de los parámetros más incidentes según la zona en estudio en el diseño del pavimento flexible para garantizar el cumplimiento de su vida útil.

Vargas, N. (2018). Realizó “La comparación del diseño calculado mediante método ASSHTO 1993 de tramo de la vía paso nacional por Zipaquirá, con respecto a métodos modernos de diseño del manual INVIAS 2016 para medios y altos volúmenes de tránsito”. En su tesis de pregrado de la Universidad Militar Nueva Granada. Su investigación verificó la incidencia del diseño de pavimentos flexibles mediante la metodología AASHTO 1993 con respecto a métodos de diseño de pavimentos flexibles modernos planteados en la guía de diseño INVIAS 2016 – el concepto de curva maestra de la mezcla asfáltica, con base en los resultados de ensayo de módulos dinámicos para una mezcla convencional MDC19 (INVIAS – Art450-2013), para la vía paso nacional por Zipaquirá del PR 25+0200 al PR28+0200.

Asimismo, el autor efectuó un análisis previo de las características de la zona, realizando un reconocimiento de las condiciones conocidas del segmento vial. Determinó también el tránsito para una estación de la serie histórica de INVIAS,

mediante el procedimiento de cálculo de proyección con nivel de confianza. Por ende, revisó el diseño de pavimento flexible mediante cálculos de tránsito por espectro de cargas. Para calcular las deformaciones unitarias a tracción en la base de la carpeta asfáltica E_t y de comprensión en la subrasante E_z utilizó el programa BISAR.

Finalmente, con los resultados que obtuvo el investigador, se determinó que la calidad del pavimento, específicamente de su estructura como ruta vial, tiene la finalidad principal de brindar a sus usuarios un servicio acorde a la demanda de tránsito, es decir, mantener estables los factores tales como comodidad y durabilidad. Realizaron también, la prueba de la estructura mensual, donde, se observó la diferencia de los materiales y sus propiedades con respecto a diversos factores como temperatura, o en todo caso velocidad de vehicular, Dado que las condiciones climáticas indican la necesidad de un análisis que pueda determinar si los actuales diseños tenían concordancia en su aplicación en zonas de alturas sobre el nivel del mar, por lo cual debe verse a la metodología AASHTO 1993 como una buena herramienta para pre dimensionar pero no para finalizar un diseño. Por concluir, el investigador señala que “ Los sistemas de gestión vial son esenciales desde el momento del diseño y construcción de los pavimentos, ya que estos van acordes al tiempo estimado del servicio, así como recrean el curso de la optimización de los recursos, siendo una herramienta que debe de ir de la mano con la innovación o bien sea con el uso de métodos de diseño cada vez más cercanos al contexto real de uso, que permitan identificar las intervenciones adecuadas para entregar el mejor servicio al usuario al costo más favorable”.

De esta investigación se relaciona la necesidad de aplicar métodos más adecuados que contemplen los parámetros o condiciones que contribuyan a su deterioro para poder controlar o soportar de manera eficiente las solicitudes de cargas de servicio y de esta manera mantener el nivel de serviciabilidad dentro de los márgenes establecidos. Siendo el método SHELL el complemento ideal para el método AASHTO 93.

2.2.2 Investigaciones nacionales

Mendoza Torres, E. (2019). Determinó la relación existente entre el método empírico - mecanicista AASHTO 93 y el método mecanicista SHELL para la

determinación de la vida útil del pavimento. En su tesis de pregrado titulada “Relación entre los métodos de diseño de pavimentos flexibles empírico MECANICISTA AASHTO 93 y SHELL para determinar la vida útil del pavimento”. Universidad Ricardo Palma. Siendo su investigación de tipo inductivo ya que parte de plantear los resultados obtenidos como premisas para la comprobación de su hipótesis de desarrollar nuevos métodos de diseño debido a las limitaciones presentes en los métodos tradicionales. Esto aplicado a las carreteras asfaltadas del Perú, teniendo como muestra la carretera de la Vía Evitamiento Juliaca del km 00+000.000 al km 18+661.924 y el Ramal Sur del km 00+000.000 al km 14+374.849.

En tanto la determinación de la relación existente entre el método empírico – mecanicista AASHTO 93 y el método SHELL para determinar la vida útil del pavimento resultaría de gran ayuda para la optimización de las capas que componen la estructura del pavimento, en especial las capas granulares como Base y Subbase. Además, identificó los parámetros de diseño del método empírico-mecanicista AASHTO 93 con el cual calculó el Número Estructural del Pavimento. Así mismo, identificó los parámetros de diseño del método SHELL con el cual calculó el valor de las deformaciones del pavimento. Una vez identificados, el investigador analizó la relación entre los parámetros de ambos métodos para determinar si son complementarios.

Finalmente, el autor de la presente tesis concluyo que los parámetros de diseño del método AASHTO 93 son el tráfico, parámetros estadísticos, parámetros de serviciabilidad, calidad y drenaje y propiedades de las capas del pavimento, de esta manera determino el valor de la capacidad de carga requerida identificado como número estructural. Así mismo, para el método SHELL los parámetros que obtuvo fueron parámetros de tráfico, temperatura, características de los materiales de las capas del pavimento y modelo aplicado de carga, lo cual dio como resultado las deformaciones unitarias en tracción y compresión bajo la capa asfáltica y sobre la subrasante del pavimento en mención. De esta manera, precisó que ambos métodos son complementarios ya que el método SHELL considera parámetros que el método AASHTO 93 no considera, con lo que antepuso el método SHELL ante el método AASHTO 93 y logró obtener el valor de la vida útil del pavimento en base al modelamiento del deterioro por deformaciones del pavimento.

Para la presente investigación aplicada a una población y muestra de la misma naturaleza, rescatamos dicha determinación de la relación de parámetros que existe entre los métodos AASHTO 93 y SHELL para finalmente optimizar el espesor de las capas granulares de los pavimentos flexibles.

Quispe, L. (2021). Realizó el “Diseño vial con los métodos AASHTO-93 y SHELL para mejorar la transitabilidad en el Distrito de Tambo – Huancayo, 2020”. Universidad Cesar Vallejo.

El autor de la tesis en mención, planteó la elaboración del diseño vial con los métodos AASHTO-93 y SHELL, con el cual, sería posible mejorar la transitabilidad en el Distrito de Tambo – Huancayo, 2020. Así mismo, realizó el levantamiento topográfico correspondiente de la zona para la determinación del estado del terreno, posteriormente a ello, realizó el estudio de mecánica de suelo correspondientes, debido a lo antes mencionado procedió a diseñar el pavimento flexible en consideraciones con los métodos convencionales.

De esta manera el autor concluye que, la superficie topográfica de la zona en estudio mostró un desnivel no mayor a 2 m de inicio a fin. Posteriormente a ello se determinó que el tipo de suelo de la zona en estudio corresponde a gravas arenosas en la clasificación SUCS. Finalmente, el autor diseño el pavimento flexible por medio de los métodos AASHTO 93, obteniendo resultados de 2” para la carpeta asfáltica, 8” para la base, 8” para la sub base; así mismo, diseñó el pavimento flexible bajo la metodología SHELL, donde obtuvo un espesor para la carpeta de rodadura de 5 cm, 20 cm de capa granular con CBR > 80%, 17.5 cm para CBR > 40% y de 15 cm para CBR > 20%. Con lo cual obtuvo una diferencia de 2.5 cm de mejoramiento del terreno.

De lo mencionado anteriormente, podemos rescatar la compatibilidad entre ambos métodos, nuevamente por la complementación del método SHELL ante el método AASHTO 93, para lograr la optimización del espesor de las capas de rodadura y una mejor performance para asegurar el nivel de serviciabilidad en el periodo de vida útil proyectada para el pavimento flexible.

Cárdenas, J. (2018). Estableció la “Influencia de tráfico vehicular con respecto a las deflexiones de los pavimentos flexibles en zona urbana de la ciudad de Huancayo, Junín – 2017”. Tesis de postgrado, Universidad Ricardo Palma. La metodología es de tipo inductiva, ya que parte de los parámetros particulares del pavimento flexible de la red vial de Huancayo para determinar la relación de los

parámetros de diseño y luego utilizarlos para estandarizar en otras redes viales del Perú.

En primera instancia, el autor de la tesis en mención, determinó la relación del tráfico vehicular con las deflexiones que presentan los pavimentos flexibles ante cargas de tránsito vehicular, con el fin de establecer un modelo lineal múltiple y con un nivel de significancia menor a 0.05 en la red de vialidad urbana en la ciudad de Huancayo, Junín – 2017. Con lo que comprobó la relación del Índice Medio Diario (IMD) con las deflexiones presentes en los pavimentos flexibles ante cargas vehiculares en la red de vialidad urbana del lugar en mención. Así mismo, demostró la relación existente entre la configuración de ejes neumáticos y presión de inflado de los vehículos que conforman el tráfico real en la vía con las deflexiones en los pavimentos flexibles de la misma red vehicular en mención.

De los estudios que realizó el autor de la tesis en mención, concluye que la vía de estudio presentó un IMD de 2000 a 4500 vehículos en el rango de tráfico vehicular bajo en el primer tramo. El segundo y tercer tramo presentaron tráfico vehicular medio y tráfico vehicular alto respectivamente.

Es importante tener en cuenta la relación existente entre diferentes parámetros que influyen directamente en el diseño de pavimentos flexibles; tales como, el tráfico y las deformaciones unitarias de tracción y compresión debajo de la capa asfáltica y sobre la sub rasante donde se emplazarán estos tipos de proyectos viales.

Escobar, L; Huincho, J. (2017). Realizaron el “Diseño de pavimento flexible, bajo influencia de parámetros de diseño debido al deterioro del pavimento en Santa Rosa – Sachapite, Huancavelica – 2017”. Como tesis de pregrado, en la Universidad Nacional de Huancavelica, Facultad de Ingeniería, Escuela profesional de ingeniería civil. Siendo una investigación aplicada, de nivel explicativo y desarrollada mediante el método científico. Teniendo en cuenta los pavimentos flexibles como población y resultando una muestra de 12 km de carretera para su estudio en la vía Santa Rosa – Sachapite.

El autor de la tesis en mención determinó a influencia de los parámetros de diseño del pavimento flexible a consecuencia del deterioro del pavimento en la zona de estudio antes mencionada. Para ello, determinó los parámetros elementales para la determinación de la estructura del pavimento, tal como el

parámetro de tráfico conocido como Índice Medio Diario (IMD). Así mismo, el parámetro de suelo conocido como CBR que representa la resistencia al esfuerzo de corte del suelo. Para posteriormente determinar la vida útil del pavimento flexible a diseñar, con lo que evitó el deterioro prematuro de la vía. Finalmente concluyó, que la vía cuenta con un IMD mayor al planteado inicialmente para su diseño, por lo que, esto involucra la realización de un nuevo diseño para el mejoramiento de la vía. Esto influye directamente a la capacidad de soportar el volumen de tránsito actual, que fue dos veces más del valor estudiado inicialmente, trayendo como consecuencia el aumento de los espesores de las capas del pavimento flexible de la vía en mención. En el caso del parámetro de suelo, se mantiene constante con un valor de CBR de diseño de 7.2 %. Ante esto se logró optimizar la carpeta asfáltica, y se evidenció la necesidad de aumentar el espesor de la capa granular conocida como Base, manteniéndose constante la capa granular conocida como sub base. De este modo el autor predijo según estos parámetros de diseño, en qué momento y bajo qué circunstancias se manifestarían las fallas en el pavimento.

Rescatamos de la investigación en mención, el hecho de actualizar los estudios necesarios para obtener los parámetros de diseño reales, y de esta manera aplicar los métodos complementarios de diseño que influyen en la optimización de las capas que conforman la estructura del pavimento flexible, de tal manera, que este mantenga su nivel de serviciabilidad adecuadamente durante su periodo de diseño.

Martínez, D. (2015). Realizó la investigación sobre el “Impacto del control de pesos por eje de vehículos pesados sobre la estructura de los pavimentos”, tesis de pre grado para optar por el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Ricardo Palma; dicha investigación consta de cinco fases las cuales se desarrollan iniciando con la recopilación de información para seleccionar rutas representativas del país, continua con el análisis de la información realizando encuestas de pesaje vehicular, así mismo analiza la información para finalmente procesar los resultados.

Los objetivos de su investigación son principalmente la evaluación del impacto real de la sobre carga por eje de vehículo pesado, para preservar las carreteras del Perú. Realizó el pesaje de vehículos en una ruta representativa, para poder calcular el factor camión real de la zona de estudio, así mismo, comparar los

resultados con los valores de cargas permisibles en el país, analizar la diferencia y determinar el daño causa por el efecto de daño de los vehículos pesados.

Concluyendo finalmente que la incidencia del cálculo real del factor camión en el diseño de la estructura del pavimento flexible se da de manera directa, ya que este depende del peso real por eje de vehículo clasificados según su configuración y tipo de vehículo, ya que muchas veces se excede de los valores máximos permitidos por la normativa vigente, causando distorsión en el diseño, ya que, el factor de equivalencia de carga y por ende el factor camión se incrementan de manera exponencial conforme aumenta la carga por eje, al darse esta situación el pavimento se deteriora prematuramente, y al contrario si la información tomada en campo realizando encuestas de pesaje resulta menor a la normativa vigente, se dará el caso del sobre diseño de la estructura del pavimento flexible.

Por ello, cabe resaltar la importancia de adoptar valores tomados en campo en base a muestras representativas de vehículos para calcular el factor camión real de la zona, ya que este incide directamente en el diseño de la estructura del pavimento flexible.

2.3 Bases teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio

2.3.1 Pavimento

El pavimento es el conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidos entre el nivel superior de la sub rasante y la superficie de rodamiento o tránsito, cuya principal función es la de proporcionar una superficie de transitabilidad uniforme, resistente a las diferentes acciones del tránsito, del intemperismo y otros agentes perjudiciales; transmitir adecuadamente a la sub rasante los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por los diferentes tipos de tráfico. Las características de los pavimentos son:

- Tener resistencia para soportar la carga del tránsito, del ambiente atmosférico y del agua.
- Tener un buen nivel de adherencia para los vehículos, aunque haya humedad.
- Tener una textura superficial apta para la velocidad pronosticada de tráfico de los vehículos.

- Resistir al desgaste generado por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Poseer el color apropiado y brindar una apropiada seguridad al tránsito.
- Ser duradero y económico.

- Tipos de pavimentos

Existen distintos tipos de pavimentos que se pueden utilizar según el tipo y la magnitud del volumen de carga.

a) Pavimento flexible.

Tiene como superficie de rodadura una carpeta bituminosa. Las capas inferiores reciben las cargas del tráfico, lo cual se reparte entre estas capas mediante las partículas de los materiales, entretanto la carpeta bituminosa se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores sin que su estructura se rompa. La Figura 1 muestra el corte típico de un pavimento flexible y la Tabla 1 presenta los elementos estructurales del pavimento flexible.

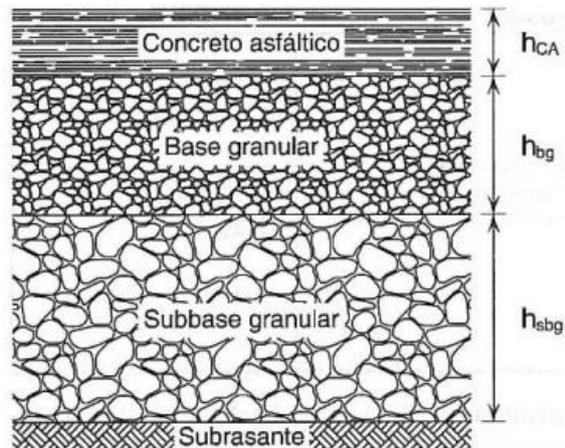


Figura 1: Corte típico de un pavimento flexible

Fuente: “Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras” por Higuera (2011, p.17).

Tabla 1: Elementos estructurales de los pavimentos flexibles

ELEMENTO	TIPOS	FUNCIONES	MATERIALES BÁSICOS DE CONSTRUCCIÓN
Subrasante	<ol style="list-style-type: none"> 1. Según sección <ul style="list-style-type: none"> • Subrasante en corte • Subrasante en terraplén • Subrasante mixta 2. Según el material <ul style="list-style-type: none"> • Subrasante en roca • Subrasante en suelo arenoso • Subrasante en suelo limoso • Subrasante en suelo plástico 	<ul style="list-style-type: none"> • Servir de fundación al pavimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Roca • Suelos • Agua
Bases y subbases	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bases granulares simples <ul style="list-style-type: none"> • Gradación abierta • Gradación densa • Gradación intermedia • Uniforme 2. Bases de suelo estabilizada <ul style="list-style-type: none"> • Suelo - cemento • Suelo - cal • Suelo - asfalto • Suelo - aditivo químico 3. Bases asfálticas <ul style="list-style-type: none"> • Granular estabilizada con asfalto • Macadam asfáltico • Concreto asfáltico 	<ul style="list-style-type: none"> • Función económica • Capa de transición • Disminución de deformaciones • Resistencia • Drenaje • Amortiguar cambios de volumen de la subrasnte • Facilitar la construcción • Servir de rodadura provisional 	<ul style="list-style-type: none"> • Agregados • Agua • Suelo • Cemento • Asfalto • Otros
Riego de imprimación	<ol style="list-style-type: none"> 1. Imprimación 	<ul style="list-style-type: none"> • Ligar • Impermeabilizar 	<ul style="list-style-type: none"> • Asfalto líquido • Emulsiones asfálticas
Carpeta asfáltica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tratamientos superficiales <ul style="list-style-type: none"> • Simple • Doble • Triple • Cuádruple 2. Macadam asfáltico 3. Concreto asfáltico <ul style="list-style-type: none"> • Mezcla en vía • Mezcla en planta en frío o en caliente • Macadam asfáltico • Concreto asfáltico 	<ul style="list-style-type: none"> • Proveer una superficie de rodadura suave, segura y • Impermeabilizar la estructura • Mejorar la capacidad estructural - resistencia • Limpieza 	<ul style="list-style-type: none"> • Agregados • Asfalto • Otros

Fuente: “Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras” por Higuera (2011, p.16).

b) Pavimento rígido.

Está constituido por una superficie de rodadura que fundamentalmente es una losa de concreto apoyada sobre una capa de diversos materiales o la subrasante. Para este pavimento, las deformaciones que se da en las capas inferiores no pueden plegarse a la capa superior sin que ocurra una falla estructural. Debido a su elevada rigidez del concreto hidráulico y su alto coeficiente de elasticidad, hacen que la distribución de esfuerzos se genere sobre la capa superior, obteniéndose que las cargas y esfuerzos que se distribuirán en la capa subyacente sean considerablemente menores. En la Figura 2 se muestra un corte

típico de pavimento rígido, en la Tabla 2 se presentan los elementos estructurales del pavimento rígido.

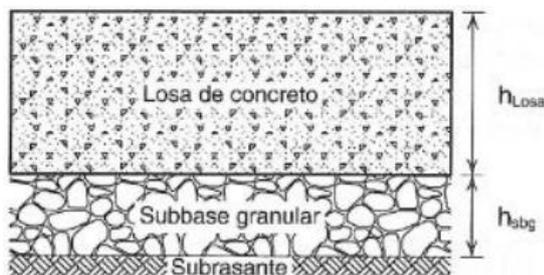


Figura 2: Corte típico de un pavimento rígido

Fuente: “Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras” por Higuera (2011, p.19).

Tabla 2: Elementos estructurales de los pavimentos rígidos

ELEMENTO	TIPOS	FUNCIONES	MATERIALES BÁSICOS DE CONSTRUCCIÓN
Subrasante	<ol style="list-style-type: none"> Según sección <ul style="list-style-type: none"> Subrasante en corte Subrasante en terraplén Subrasante mixta Según el material <ul style="list-style-type: none"> Subrasante en roca Subrasante en suelo arenoso Subrasante en suelo limoso Subrasante en suelo plástico 	<ul style="list-style-type: none"> Servir de fundación al pavimento 	<ul style="list-style-type: none"> Roca Suelos Agua
Bases y subbases	<ol style="list-style-type: none"> Bases granulares simples <ul style="list-style-type: none"> Gradación abierta Gradación densa Gradación intermedia Uniforme Bases de suelo estabilizada <ul style="list-style-type: none"> Suelo - cemento Suelo - cal Suelo - asfalto Suelo - aditivo químico Bases asfálticas 	<ul style="list-style-type: none"> Capa de transición Dar capacidad al pavimento Amortiguar cambios de volumen de la subrasnte Facilitar el drenaje Facilitar la construcción Servir de rodadura provisional Prevenir el fenómeno de bombeo 	<ul style="list-style-type: none"> Agregados Agua Suelo Cemento Asfalto Otros
Elemento antifriccionante	<ul style="list-style-type: none"> Riegos asfálticos Tela de polietileno Otros 	<ul style="list-style-type: none"> Reducir fricción entre la base y la losa 	<ul style="list-style-type: none"> Asfalto líquido Polietileno Otros
Losas	<ul style="list-style-type: none"> De concreto simple De concreto reforzado De concreto preesforzado 	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia estructural Superficie de rodadura Impermeabilización 	<ul style="list-style-type: none"> Concreto Acero de refuerzo
Carpeta asfáltica	<ol style="list-style-type: none"> Según su función <ul style="list-style-type: none"> De construcción - contracción De expansión y alabeo Según su posición <ul style="list-style-type: none"> Longitudinal Transversal Según su forma <ul style="list-style-type: none"> Al tope, caras planas Con luz Según refuerzo <ul style="list-style-type: none"> Sin pasadores Con pasadores (transferencia) 	<ul style="list-style-type: none"> Facilitar la construcción Controlar el agrietamiento por expansión, contracción o alabeo de las losas 	<ul style="list-style-type: none"> Llenante Sellantes Acero

Fuente: “Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras” por Higuera (2011, p.18).

c) Pavimento semirrígido

Este pavimento tiene una gran similitud con la estructura de un pavimento flexible, manteniendo rigidizada artificialmente una de sus capas, ya sea por la utilización de un aditivo como el asfalto, la emulsión, el cemento, cal y químicos. Se hace con la finalidad de alterar o reformar las propiedades mecánicas de los materiales que no satisfagan los detalles técnicos diseñados en la estructura del pavimento. La Figura 3 muestra el corte típico de un pavimento semirrígido.

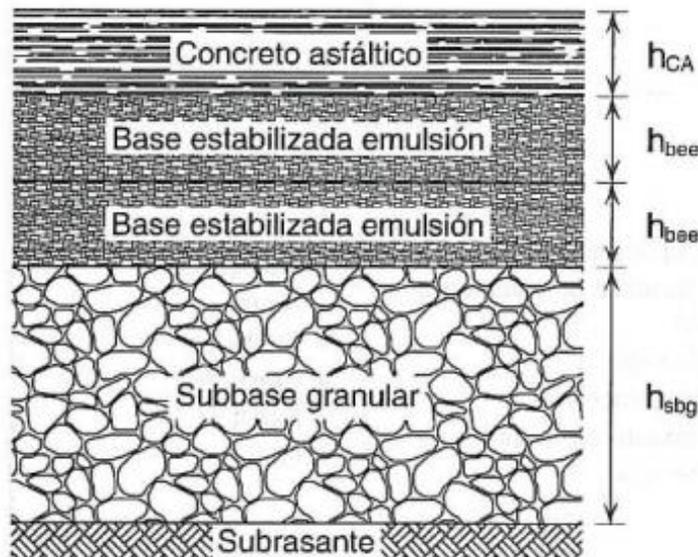


Figura 3: Corte típico de un pavimento semirrígido

Fuente: “Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras” por Higuera (2011, p.19).

d) Pavimento articulado

La composición de la capa de rodadura o capa superior son bloques de concreto prefabricado, denominados adoquines, estos presentan las mismas características como sus dimensiones. Generalmente están colocadas encima de arena, esta debe ser una capa delgada, al mismo tiempo va apoyada encima de una capa granular o, por otro lado, se coloca seguido de la subrasante. La Tabla 3 muestra los elementos estructurales del pavimento articulado.

Tabla 3: Elementos estructurales de los pavimentos articulados

ELEMENTO	TIPOS	FUNCIONES	MATERIALES BÁSICOS DE CONSTRUCCIÓN
Subrasante	1. Según sección <ul style="list-style-type: none"> • Subrasante en corte • Subrasante en terraplén • Subrasante mixta 2. Según el material <ul style="list-style-type: none"> • Subrasante en roca • Subrasante en suelo arenoso • Subrasante en suelo limoso • Subrasante en suelo plástico 	<ul style="list-style-type: none"> • Servir de fundación al pavimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Roca • Suelos • Agua
Bases y/o subbases	1. Bases granulares simples <ul style="list-style-type: none"> • Gradación abierta • Gradación densa • Gradación intermedia • Uniforme 2. Bases de suelo estabilizada <ul style="list-style-type: none"> • Suelo - cemento • Suelo - cal • Suelo - asfalto • Suelo - aditivo químico 3. Bases asfálticas <ul style="list-style-type: none"> • Granular estabilizada con asfalto • Macadam asfáltico • Concreto asfáltico 	<ul style="list-style-type: none"> • Dar capacidad al pavimento • Amortiguar cambios de volumen de la subrasnte • Facilitar el drenaje • Facilitar la construcción • Servir de rodadura provisional • Prevenir el fenómeno de bombeo 	<ul style="list-style-type: none"> • Agregados • Agua • Suelo • Cemento • Asfalto • Otros
Elementos de superficie	1. Según su función 2. De construcción - contracción 3. De expansión y alabeo 4. Según su posición 5. Longitudinal	<ul style="list-style-type: none"> • Proveer una superficie suave y segura • estructural • Impermeabilizar • Limpieza • Otro 	<ul style="list-style-type: none"> • Piedra • Madera • Ladrillo • Concreto • Otros

Fuente: “Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras” por Higuera (2011, p.20).

- Funciones de las capas de los pavimentos flexibles
 - a) Subrasante
 - Sirve de soporte a las capas del pavimento.
 - b) Subbase
 - En primera instancia, disminuye económicamente el pavimento ya que disminuye el espesor de la base.
 - Soporta y disipa los esfuerzos transmitidos por la base.
 - Impide la introducción de materiales a la base y retiene el agua que se filtra por capilaridad proveniente de la subrasante.
 - Protege la base de los cambios de volumen de la subrasante ocasionadas por condiciones de humedad o temperatura.
 - c) Base
 - Económicamente, tiene una función semejante a la que tiene la subbase.

- Absorbe las presiones generadas por el tráfico.
 - Brinda resistencia al pavimento transmitiendo los esfuerzos generados por el tráfico a las capas inferiores
- d) Carpeta asfáltica
- Proporciona uniformidad y estabilidad en el tránsito en la superficie.
 - Contiene una textura y color adecuada.
 - Resiste las consecuencias abrasivas del tráfico.
 - Debe ser impermeable con el agua.
 - Disipa los esfuerzos horizontales ocasionados por el tránsito evitando agrietamientos.

- Factores que influyen en el diseño de un pavimento.

Los principales factores, según Higuera, para el diseño de la estructura de un pavimento son:

- Estructurales
 - Suelo de fundación.
 - Las capas del pavimento con un espesor determinado.
- El tráfico
 - El tipo de vehículo.
 - Carga aplicada.
 - Repeticiones por carga.
 - Cargas por eje.
 - Velocidad de desplazamiento.
 - Presión de inflado y área de contacto de las llantas.
- Clima y condiciones meteorológicas
 - Precipitación pluvial.
 - Variación de temperatura.
- Costos
 - Costos de construcción.
 - Costo de mantenimiento.
- Nivel de servicio
 - Seguridad/comodidad.
 - Capacidad de servicio.
 - Durabilidad del pavimento.

2.3.2 Metodologías de diseño de pavimentos flexibles.

Un pavimento debe ser diseñado de tal manera que las cargas impuestas por el tránsito no generen deformaciones permanentes excesivas. En el caso de los pavimentos flexibles, estas deformaciones se producen en cada una de las capas. Los métodos de diseño de pavimentos como Shell (1978), AI (The Asphalt Institute, 1982), AASHTO (American Association of State Highway Officials, 1986, 1993), DMRB (Design Manual for Roads and Bridges, 1994), TRL (Transportation Research Laboratory, 1993), AUSTROADS (1992), Invías (Instituto Nacional de Vías, 1998), IDU y UA (Instituto de Desarrollo Urbano & Universidad de los Andes, 2002) y el método mecánico – empírico MEPDG (2004) suponen que las deformaciones permanentes ocurren principalmente en la subrasante. Sin embargo, en vías en las que se construyen capas asfálticas delgadas o de baja rigidez (p. e., vías de bajo tráfico), las capas granulares soportan el esfuerzo aplicado casi en su totalidad, y la magnitud de dichos esfuerzos puede llegar a generar valores elevados de deformación permanente. Por lo tanto, las metodologías de diseño deben tener en cuenta las deformaciones que se producen en estas capas, y los modelos para predecir dichas deformaciones bajo diversas trayectorias de carga cíclica y condiciones del medio ambiente (Rondón & Reyes, 2015, p.397).

- Métodos de diseño empíricos

Para pavimentos flexibles, sus diseños son generalmente de carácter empírico o mecánico – empíricos. En el caso de los métodos empíricos existe una correlación con el análisis y mediciones para observar el comportamiento del pavimento in situ y los agentes que causan el deterioro de la estructura del pavimento. Los factores más importantes son las cargas impuestas por el tránsito, las condiciones ambientales (principalmente temperatura y precipitación) a las cuales se encuentra sometida la estructura, el tipo de suelo o terreno de fundación (subrasante) y la calidad de los materiales empleados. Todos estos factores son controlados y medidos durante las fases de estudio para correlacionarlos con los mecanismos de degradación y así poder crear el método de diseño.

Los principales mecanismos de degradación que se intentan controlar en las metodologías empíricas (y también en las mecanicistas) son dos: fatiga y exceso de deformación permanente. La fatiga ocurre en las capas ligadas y, para el caso de estructuras flexible se presenta cuando se acumulan y generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la carpa asfáltica. Este tipo de deformación es asociado a la respuesta resiliente (elástica) que presenta la estructura cuando se mueven las cargas vehiculares. La deformación permanente es la deformación compresión residual que se va acumulando debido al paso de los vehículos, la cual puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento.

En el caso de las estructuras flexibles, la deformación permanente total es la suma de la deformación producida en cada una de las capas del pavimento, pero actualmente los métodos empíricos suponen que tal deformación se genera principalmente en la capa subrasante. Esta hipótesis se base en que la subrasante es la capa más susceptible a la deformación debido a su más baja rigidez en comparación con las otras capas del pavimento y a su mayor probabilidad de presentar altos contenidos de agua, lo cual disminuirá su capacidad portante. Es decir, las metodologías empíricas no tienen en cuenta que las capas granulares juegan un papel importante en la generación de la deformación permanente cuando se dimensionan estructuras flexibles para vías de bajo tráfico. En este tipo de pavimentos las capas asfálticas no tienen una función estructural (por lo general se construyen capas asfálticas delgadas y de baja rigidez), y las capas granulares (base y subbase) soportan casi en su totalidad las cargas rodantes. (Rondón & Reyes, 2015, pp.398-399).

a) Método CBR

T.E.Stanton y O.J.Porter pertenecientes al Departamento de Carreteras del Estado de California –Estados Unidos; en 1929 establecieron este método para evitar las fallas al corte de las diferentes capas del pavimento, expuestas en los diferentes diseños planteados hasta la fecha.

Por consiguiente, el método CBR propone los siguientes ensayos: determinación de la densidad y humedad, determinación de las propiedades expansivas del material y determinación de la resistencia a la penetración.

El método de CBR se basa en la práctica y experiencia adquirida mediante una gran variedad de ensayos de laboratorios y en campo, es un método empírico y fue de los más recomendados en esos años tanto en América como en Europa. Se han elaborado gráficos y ábacos por diferentes entidades viales para determinar con facilidad el espesor de diseño de los pavimentos flexibles, en función al CBR. El primer gráfico fue elaborado por el departamento de Carreteras de California (1942) en el cual se puede apreciar dos curvas, para ligero y mediano tránsito como se ve en la Figura 4.

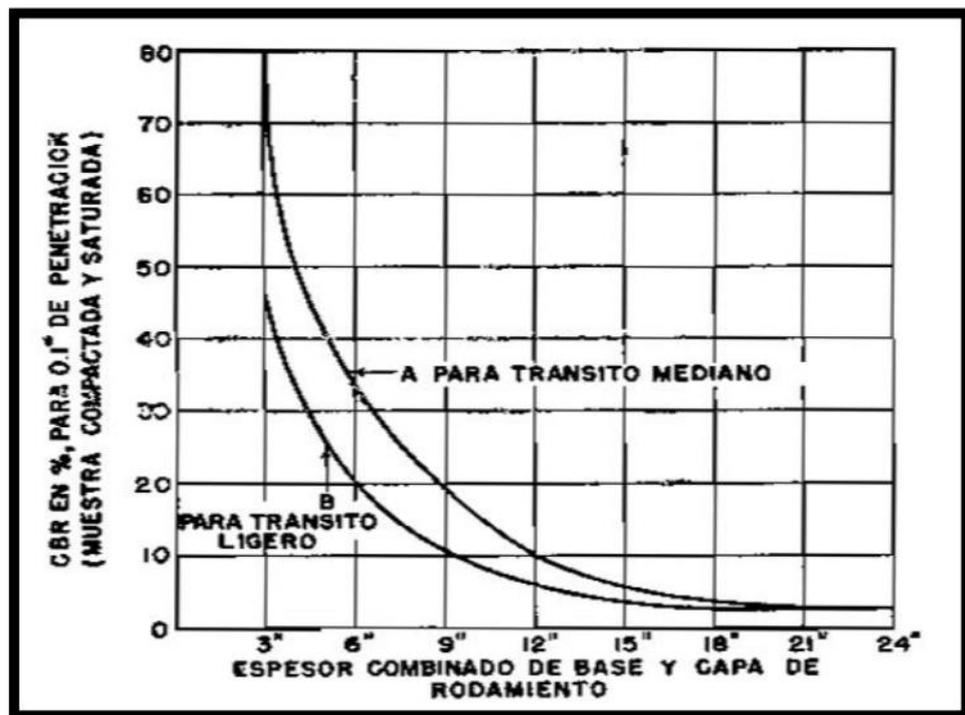


Figura 4: Grafico para el cálculo de espesores de pavimentos flexibles – Método CBR

Fuente: Carreteras, Calles y Aeropistas; Ing. Raúl Valle Rodas (1968)

b) Método de AASHTO

El comité de AASHTO en 1972 hizo “Guía provisional AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos y flexibles”, la cual fue modificada y ajustada 1986 agregando a su diseño factores ambientales, drenaje, aspectos económicos, etc. Posteriormente en el año 1993 el método AASHTO empezó a introducir conceptos mecanicistas a su diseño para adecuarlo a diferentes condiciones y parámetros que no se consideraron en un inicio como el módulo resiliente.

- Métodos de diseño mecanicistas o racionales

A diferencia de los métodos empíricos, los analíticos tienen en cuenta cómo el estado de esfuerzo y deformación que experimentan las capas que conforman la estructura del pavimento influyen en el comportamiento de este. Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones, emplean programas de computador disponibles desde la década de los sesenta. En estos programas se introducen la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales (por lo general el módulo resiliente y la relación de Poisson) y el espesor de las capas del pavimento con el fin de obtener los estados de esfuerzo y de deformación. Una vez calculados estos estados, se comparan con aquellos que admiten 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.

Algunos de los programas son ALIZE (LPX, *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), ELSYM5 (*Chevron Oil*), BISAR (Shell), KENLAYER (*University of Kentucky*) y DEPAV (Universidad del Cauca). Los valores admisibles de deformación a tracción y compresión en la fibra inferior de la capa asfáltica y en la superficie de subrasante, respectivamente, se obtienen por medio de diversas ecuaciones desarrolladas en instituciones de investigación como TRL, AASHTO y AI.

A pesar de ser una metodología diferente a la empírica, la analítica presenta connotaciones similares. Por ejemplo, el criterio de diseño en los métodos analíticos es el mismo: el pavimento falla por acumulación de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica debido a ciclos de carga y descarga (causando fatiga) y por exceso de deformación vertical en la superficie de la capa de subrasante (es decir, no tienen en cuenta el efecto que puede tener la acumulación de la deformación en las capas de base y subbase granulares no tratadas). La principal desventaja de esta metodología radica en que el cálculo de los estados de esfuerzo y de deformación se realiza por lo general suponiendo que el pavimento flexible es un sistema multicapa elástico lineal compuesto por tres capas: la subrasante, la capa granular no tratada y la capa asfáltica, como se aprecia en la Figura 16. En este tipo de sistemas, de manera simplista, se argumenta que para cada ciclo individual de carga la deformación permanente es muy baja comparada con la deformación resiliente. Los parámetros elásticos

pueden ser calculados por medio de ensayos de laboratorio o de retrocálculos de ensayos *in situ* (empleando por ejemplo *Falling Weight Deflectometers - FWD*). Por un lado, las ecuaciones elásticas lineales no tienen en cuenta que el comportamiento de las mezclas asfálticas es viscoso (dependiendo de la velocidad de aplicación de carga y la temperatura) y que, en el caso de los materiales granulares no tratados de base y subbase, su comportamiento es inelástico (deformaciones resilientes y permanentes) y no lineal (rigidez dependiente de nivel de esfuerzo aplicado) para los niveles de esfuerzos que experimentan en un pavimento flexible. Además, de acuerdo con el tipo de material de subrasante, el comportamiento del suelo puede depender de la velocidad de carga (viscoso), como en el caso de muchas arcillas, como se aprecia en la Figura 5 (Rondón & Reyes, 2015, pp.405-407).

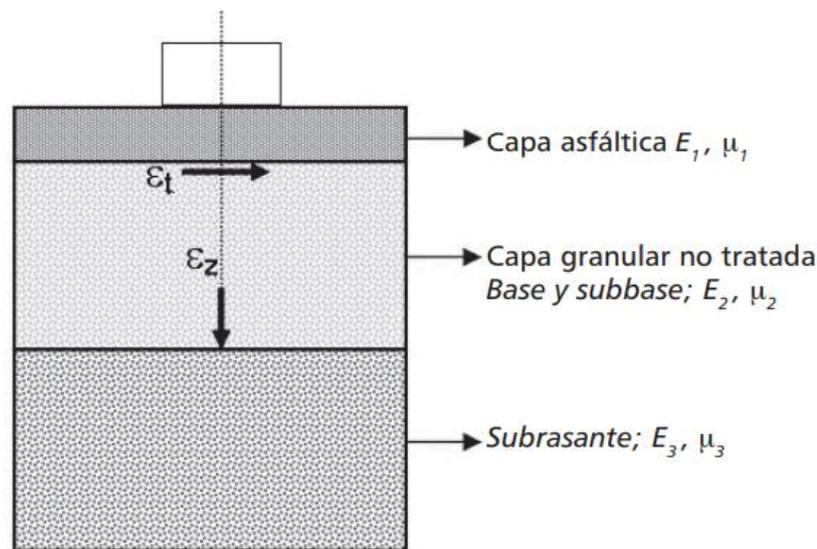


Figura 5: Sistema multicapa elástico para el análisis de pavimentos.

Fuente: “Pavimentos: Material, Construcción y Diseño” por Rondón & Reyes (2015, p.375).

Otras desventajas de las metodologías analíticas son:

- Suponen que los materiales que componen cada una de las capas del pavimento son isotrópicos y homogéneos.
- Los programas analíticos no tienen en cuenta las diferentes geometrías que pueden presentar las estructuras de pavimento (p.e., suponen una extensión infinita de las capas en sentido horizontal) y la carga es estática en las simulaciones.

- En la mayoría de los casos los programas de computador no tienen en cuenta el efecto del medio ambiente sobre las propiedades mecánicas de los materiales utilizados.
- Cuando se emplean ecuaciones elásticas se generan valores no reales de esfuerzos de tensión en las capas granulares (estáticamente no posibles) (figura 6). Esto ocurre especialmente en pavimentos con capas asfálticas delgadas (Khedr, 1985; Elliott & David, 1989; Brown, 1996; Balay et al., 1997; Gomes, 2000).

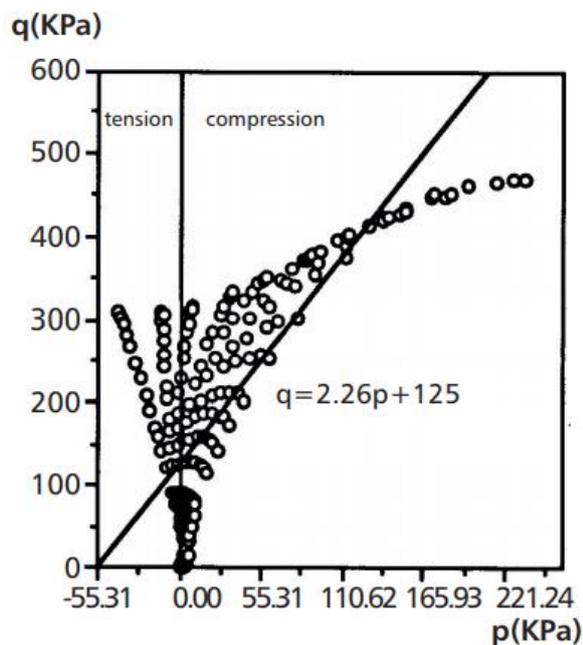


Figura 6: Campo de esfuerzos (p, q) en la capa de base de un pavimento flexible con espesor de capa asfáltica de 6 cm; p es la presión media, y q es el esfuerzo desviador.

Fuente: “Pavimentos: Material, Construcción y Diseño” por Rondón & Reyes (2015, p.376).

Las metodologías de diseño de pavimentos flexibles han ido mejorando en el tiempo, esto debido a que, se evidencian las carencias o puntos débiles por medio de fallas prematuras o tiempo de vida útil del pavimento menor al previsto, elevando los costos de mantenimiento, o desperdiciando recursos para su construcción sin lograr los resultados esperados. Es por ello, que diversos investigadores y/o instituciones continúen investigando a profundidad aquellos

factores o características que inciden considerablemente en el diseño de la estructura del pavimento flexible.

Cabe resaltar que el método adoptado proveniente de una realidad distinta en cuestiones de geografía, clima, etc., debe ser homologado con la realidad a la que se va a aplicar.

A continuación, se muestra un resumen que compara las principales características de los métodos de diseño empíricos con los métodos de diseño mecanicistas

2.3.3 Método empírico – mecanicista AASHTO 93.

El procedimiento de diseño de AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) está basado en los resultados de los ensayos de carretera AASHTO llevados a cabo en Ottawa (Illinois), a finales de los años 50 y a comienzos de los 60. El comité de Diseño de la AASHO publicó, primero, una guía de diseño provisional en 1961 y 1962. Luego, en 1972, se publica una guía interina de diseño.

En 1981, el capítulo 3 de la guía interina de 1972 es revisado. En 1984-85, el subcomité de diseño de pavimento y el equipo de consultores revisaron y expandieron la guía bajo el proyecto NCHRP 20-7/24 y publicaron en 1986 la primera edición de la guía de diseño para estructuras de pavimentos. Esta guía introdujo varios conceptos nuevos, entre ellos, el de la confiabilidad. Fue publicada en dos volúmenes: el primero donde se presentan los procedimientos de diseño y el segundo que proporciona la documentación e información sustentadora. La segunda edición fue publicada en 1993 (AASHTO, 1993) y una guía suplementaria en 1988 (AASHTO, 1998). En estas ediciones solamente se modificó el primer volumen.

Las ecuaciones de desempeño empírico obtenidas del ensayo de carreteras AASHTO todavía son usadas como modelos básicos en la actual guía. Al tratarse de un método empírico, tiene una serie de limitaciones que fueron tomadas en consideración en el desarrollo del método MEPG. Así mismo, se puso en evidencia que las ecuaciones de AASHTO no presentaban de manera adecuada el desempeño de pavimento.

Se deben tener en cuenta que las ecuaciones originales fueron desarrolladas bajo determinados escenarios climáticos y con un conjunto específico de materiales

de pavimento y suelo de subrasante. El clima en el lugar de ensayo es templado con un promedio anual de precipitación de 864 mm. La profundidad promedio de congelamiento es aproximadamente 711 mm. Los suelos de subrasante consisten en A-6 y A-7-6 que son suelos mal drenados, con valores de CBR en un rango de 2 a 4.

El Ministerio de Transporte y Comunicaciones del Perú (MTC) publicó su primer manual de diseño de pavimentos para las vías nacionales en el año 2014 y una versión posterior el año 2015. Este manual se basa fundamentalmente en el método AASHTO 93. Es importante notar que el manual del MTC establece criterios para la selección de los parámetros de diseño en función del tráfico (Menéndez, 2016, p.84).

- Procedimiento de diseño

El objetivo es determinar los espesores de las capas de pavimento diferentes para satisfacer los objetivos de diseño D1, D2 y D3. Suponiendo que el tramo de pavimento se compone de la superficie, base y subbase, se requiere el diseño de tres capas: D1, D2 y D3. En la Figura 18 vemos que el procedimiento de diseño se puede dividir en los pasos a continuación:

- 1) Calcular el tráfico para el periodo de diseño (W18).
- 2) Determinar la confiabilidad R y la desviación estándar total So.
- 3) Establecer el módulo de resiliencia efectivo de la Subrasante Mr.
- 4) Determinar la pérdida de serviciabilidad de diseño.
- 5) Obtener el número estructural SN (ábaco o fórmula).
- 6) Establecer los espesores que satisfagan SN (Menéndez, 2016, pp.84-85).

a) Periodo de diseño

El periodo de diseño a ser empleado para el diseño de pavimentos flexibles será hasta 10 años para caminos de bajo volumen de tránsito, periodo de diseños por dos etapas de 10 años y periodo de diseño en una etapa de 20 años. El ingeniero de diseño de pavimentos puede ajustar el periodo de diseño según las condiciones específicas del proyecto y lo requerido por la entidad (Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos, 2014, p.131).

b) Parámetros de diseño.

El Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos (2014) para el diseño de la estructura de un pavimento flexible presenta la siguiente ecuación básica:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_O + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07 \quad \text{Ecuación 1}$$

A partir de esta ecuación se desprenden las siguientes definiciones:

- a. W_{18} , es un Número Acumulado de Ejes Simples Equivalentes a 18000 libras (80 Kn) para el periodo de diseño, corresponde al Número de Repeticiones de EE de 8.2 toneladas; el cual se establece con la información del estudio de tráfico.
- b. Módulo de Resiliencia (MR), es una medida de rigidez del suelo de subrasante, el cual, para su cálculo, deberá determinarse mediante el ensayo de resiliencia determinado de acuerdo a las recomendaciones del AASHTO (p. 132).
- c. Confiabilidad (%R), el método AASHTO incorpora el criterio de la confiabilidad que representa la probabilidad que una determinada estructura se comporte, durante su periodo de diseño, de acuerdo con lo previsto. Esta probabilidad está en función de la variabilidad de los factores que influyen sobre la estructura del pavimento y su comportamiento; sin embargo, calidad de la construcción, condiciones climáticas extraordinarias, crecimiento excepcional del tráfico pesado mayor a lo previsto y otros factores, pueden reducir la vida útil prevista de un pavimento. De acuerdo a la guía AASHTO es suficientemente aproximado considerar que el comportamiento del pavimento con el tráfico, sigue una ley de distribución normal, en consecuencia pueden aplicarse conceptos estadísticos para lograr una confiabilidad determinada; por ejemplo, 90% o 95%, significa que solamente un 10% o 5% del tramo pavimentado, se encontrará con un índice de serviciabilidad inferior al previsto; es decir que el modelo de comportamiento está basado en criterios de serviciabilidad y no en un determinado mecanismo de falla. En consecuencia, a mayor nivel de confiabilidad se incrementará el espesor de la estructura del pavimento a

diseñar. La confiabilidad no es un parámetro de ingreso en la ecuación de diseño, para ello debe usarse el coeficiente estadístico conocido como Desviación Normal Estándar (Z_r) (pp.132 – 133).

- d. Coeficiente Estadístico de Desviación Estándar Normal (Z_r), este coeficiente representa el valor de la Confiabilidad seleccionada, para un conjunto de datos en una distribución normal (p.134).
- e. Desviación Estándar Combinada (S_o), es un valor que toma en cuenta la variabilidad esperada de la predicción del tránsito y de los otros factores que afectan el comportamiento del pavimento; como, por ejemplo, la construcción, medio ambiente, incertidumbre del modelo. La Guía AASHTO recomienda adoptar para los pavimentos flexibles, valores de S_o comprendidos entre 0.40 y 0.50, en el presente Manual se adopta para los diseños recomendados el valor de 0.45 (p.136).
- f. Índice de Serviciabilidad Presente (PSI), es la comodidad de circulación ofrecida al usuario. Su valor varía de 0 a 5. Un valor de 5 refleja la mejor comodidad teórica (difícil de alcanzar) y por el contrario un valor de 0 refleja el peor. Cuando la condición de la vía decrece por deterioro, el PSI también decrece (pp.136 - 137).
- g. Número Estructural Propuesto (SNR) Los datos obtenidos y procesados se aplican a la ecuación de diseño AASHTO y se obtiene el Número Estructural, que representa el espesor total del pavimento a colocar y debe ser transformado al espesor efectivo de cada una de las capas que lo constituirán, o sea de la capa de rodadura, de base y de subbase, mediante el uso de los coeficientes estructurales, esta conversión se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$SN = a_1 \times d_1 + a_2 \times d_2 \times m_2 + a_3 \times d_3 \times m_3 \quad \text{Ecuación 2}$$

Según AASHTO la ecuación SN no tiene una solución única, es decir hay muchas combinaciones de espesores de cada capa que dan una solución satisfactoria. El ingeniero proyectista, debe realizar un análisis de comportamiento de las alternativas de estructuras de pavimento seleccionadas, de tal manera que permita decidir por la alternativa que presente los mejores

valores de niveles de servicio, funcionales y estructurales, menores a los admisibles, en relación al tránsito que debe soportar la calzada (p.140).

2.3.4 Método mecanicista o racional - SHELL.

Según Montejo (2006), este método, de tipo racional, considera la estructura del pavimento (capa asfáltica, capas granulares y subrasante), como un sistema multicapa linealmente elástico, en el cual los materiales se encuentran caracterizados por su módulo de Young (E) y su relación de Poisson (μ). Los materiales de la estructura se consideran homogéneos e isotrópicos y se supone que las capas tienen extensión infinita en sentido horizontal. El tránsito se expresa en términos de ejes simples equivalentes de 8.2 toneladas, aplicadas por medio de sistemas de rueda doble con un área de contacto circular con diámetro de 210 mm (p.360).

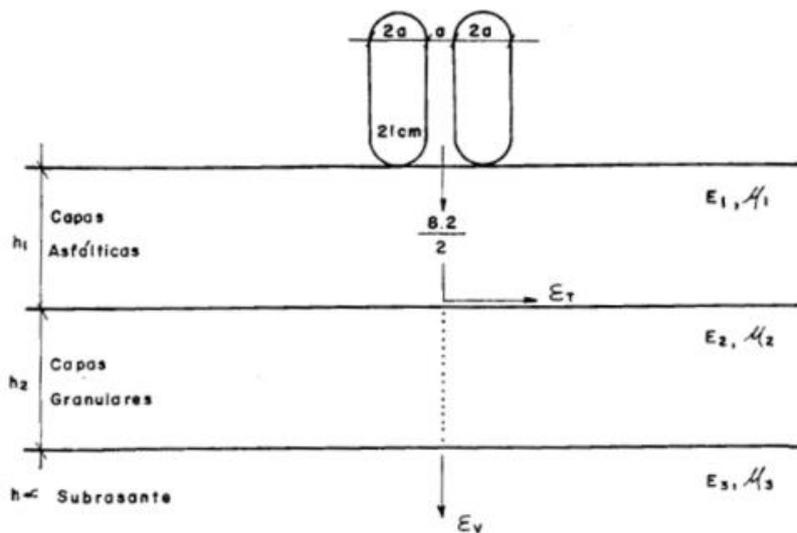


Figura 7: Estructura de un pavimento flexible

Fuente: “Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, Estudios Básicos y Diseño” por Montejo (2006, p.361).

El método considera que el pavimento puede fallar por uno de dos motivos:

1. Que la deformación horizontal por tracción (ϵ_T) en la fibra inferior de las capas asfálticas, al flexionar ellas bajo la acción de las cargas, supere cierto límite admisible. En este caso se producirá el agrietamiento de dichas capas.

2. Que la deformación vertical (ϵ_v) por compresión de la subrasante supere el límite admitido por ella, caso en el cual se produce su deformación permanente y consecuentemente la del pavimento. El procedimiento básico de diseño, supone al pavimento como una estructura tricapa, tal como la que muestra la Figura 7. La capa inferior, que es infinita en el sentido vertical, representa la subrasante. La capa intermedia, representa las capas granulares de base y subbase o, en pavimentos de estructura compuesta, las capas ligadas con cemento, con cal o construidas con escorias, materiales éstos que el método considera cementados. Por último, la capa superior del modelo representa todas las capas que se encuentren ligadas con asfalto. Se considera, además, que existe fricción completa entre una capa y otra (p. 360).

- Criterio de diseño

El método de diseño consiste en elegir la combinación de espesores y características de los materiales (ϵ y μ) de las diversas capas del pavimento, de modo que las deformaciones, horizontal por tracción (ϵ_t) y vertical por compresión (ϵ_v), permanezcan dentro de los límites admisibles durante el periodo de diseño del pavimento. Los valores admisibles de las deformaciones ϵ_t y ϵ_v , se han hallado a través de investigaciones de campo y laboratorio, encontrándose que la ϵ_t es inversamente proporcional al tránsito (N). Relación que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon_t = a[1/N]^b \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- ϵ_t : Deformación por tracción en las capas asfálticas.
- N: Número de repeticiones de carga.
- a, b: Coeficientes determinados por experiencias de campo y laboratorio.

Igualmente, la ϵ_v es inversamente proporcional al tránsito (N) y se expresa así:

$$\epsilon_v = c[1/N]^d \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- ϵ_v : Deformación vertical por compresión.
- N: Número de repeticiones de carga
- c, d: Coeficientes determinados por experiencias de campo y laboratorio (pp. 360 – 362).

A partir de estos conceptos y usando un complejo programa de cálculo de esfuerzos y deformaciones en sistemas elásticos multicapa, la Shell ha preparado un programa de cómputo llamado BISAR. Mediante el cual, conociendo las características de los materiales y asumiendo espesores de las diversas capas del pavimento, se puede computar la magnitud de las deformaciones ϵ_t y ϵ_v .

- Parámetros de diseño

Para Montejo (2006) los parámetros que se deben evaluar para el diseño son los siguientes:

1. El tránsito.
2. La temperatura.
3. Las propiedades de la subrasante, subbase y base.
4. Características de la mezcla asfáltica.

a) El tránsito

Según Montejo (2006), “el dato del tránsito, requerido para el diseño del pavimento, por el método Shell, se efectúa a través del número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, por eje sencillo, que se espera circulen sobre el pavimento durante el periodo de diseño”.

b) La temperatura

El método concede especial importancia a la temperatura de la zona donde va a quedar construido el pavimento y aunque las variaciones diarias y estacionales no presentan influencia significativa en los módulos de elasticidad de las capas granulares, si son influyentes en las propiedades de las capas asfálticas a causa de la susceptibilidad térmica del asfalto que las constituye. El comportamiento de una mezcla asfáltica igual es diferente en clima frío que en caliente. Por las

razones anteriores, el método presenta un procedimiento para estimar una temperatura media anual ponderada del aire (w-MAAT) en la región del proyecto, la cual se define a partir de las temperaturas mensuales del aire (MMAT), obtenido el MMAT se determina el factor de ponderación a partir de la Figura 8. Habiendo obtenido el factor de ponderación para cada mes del año, estos se promedian y haciendo uso de la Figura 8, se obtiene la temperatura media anual ponderada w-MAAT (Montejo, 2006, pp.365-366).

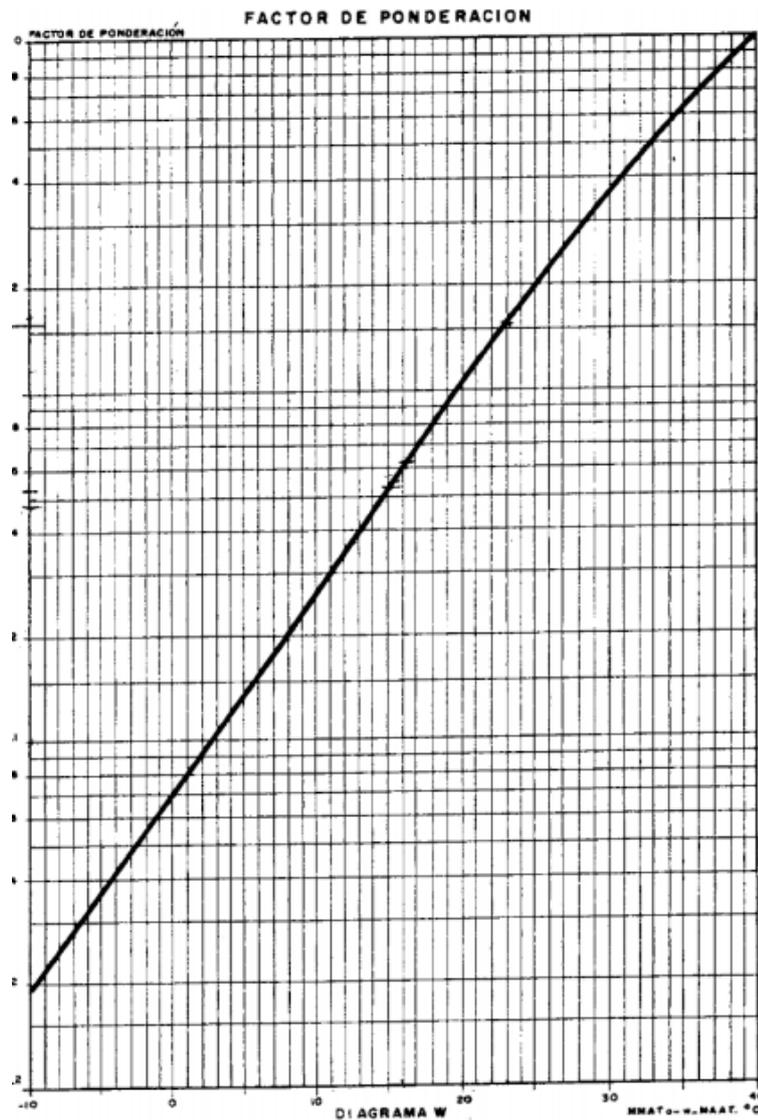


Figura 8: Curva de ponderación de temperatura

Fuente: “Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, Estudios Básicos y Diseño” por Montejo (2006, p.367).

c) Propiedades de la subrasante, subbase y base

El método exige el conocimiento del módulo dinámico de elasticidad de la subrasante que es el conocido en nuestro medio como el módulo de resiliencia (MR), evaluando en circunstancias en que el suelo se encuentre en su densidad de equilibrio. Este módulo se puede hallar mediante ensayos de laboratorio de tipo triaxial, con aplicación dinámica de carga sobre muestras que presenten condiciones apropiadas de humedad y densidad.

Cuando no sea posible efectuar los ensayos por no tener los equipos de laboratorio, se acude a los ensayos tradicionales de resistencia (CBR y prueba de placa) y en base a ellos se determina en forma indirecta el módulo dinámico. En nuestro medio el ensayo de resistencia más difundido es el CBR y la ecuación que permite determinar el módulo dinámico es:

$$MR = 10^7 \times CBR \text{ N/m}^2 \quad \text{Ecuación 5}$$

$$MR = 100 \times CBR \text{ kg/cm}^2 \quad \text{Ecuación 6}$$

Para determinar el módulo resiliente de la base y subbase, la Shell emplea la misma correlación utilizada para la subrasante (Montejo, 2006, p.366).

d) Características de la mezcla asfáltica

Existen infinidad de variedades de mezclas asfálticas, pero, para efecto del método, la Shell considera que dos propiedades de ellas son fundamentales:

- a. Su módulo de elasticidad dinámico a cortos tiempos de aplicación de carga (Stiffness).
- b. Resistencia de la mezcla a la fatiga, es decir, al agrietamiento por su flexión repetida bajo la acción de las cargas.

Con relación al Stiffness el método distingue dos tipos de mezclas; las S1 que son mezclas corrientes de cemento asfáltico de alta rigidez y con contenidos normales o promedios de agregados, de asfalto y de vacíos con aire. Las mezclas de tipo S2 son mezclas de baja rigidez, mezclas abiertas que tienen un alto contenido de vacíos con aire y un bajo contenido de asfalto. Dentro de este tipo también se incluyen las mezclas con un alto contenido de asfalto como es el caso de la arena – asfalto.

En cuanto a la fatiga, el método distingue dos tipos de mezclas: las F1 que tienen alta resistencia y que tienen cantidades moderadas de vacíos con aire y de asfalto, y las F2, de baja resistencia y que tienen altos volúmenes de vacíos con aire. En la Figura 9 se muestra:

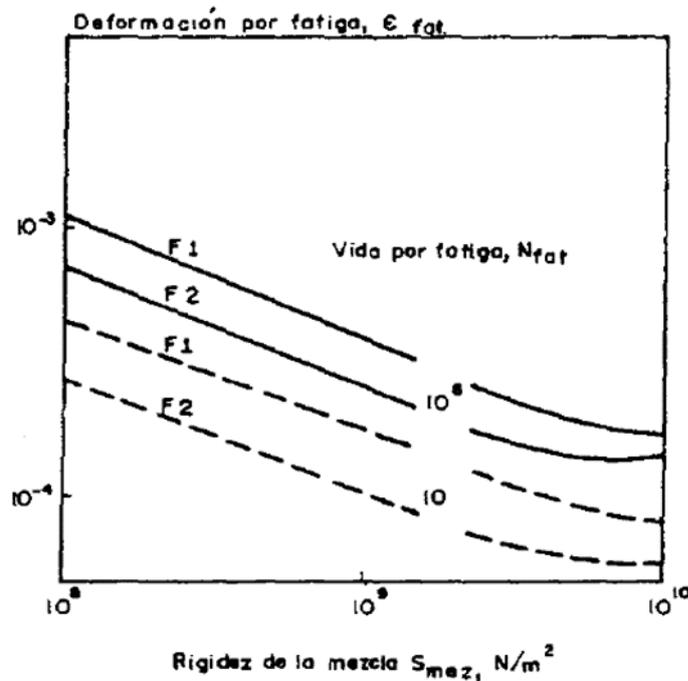


Figura 9: Características de fatiga F1 y F2

Fuente: “Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, Estudios Básicos y Diseño” por Montejo (2006, p.299).

El método considera únicamente dos tipos de cemento asfáltico para elaboración de las mezclas asfálticas; los de penetración 50 (1/10 mm) que se emplean en climas cálidos y los de penetración 100 (1/100 mm) que se emplean en climas fríos.

Con base en lo anterior, la Shell reconoce para el diseño ocho (8) tipos (o códigos) de mezclas asfálticas y presenta gráficas de diseño diferentes para cada una de ellas, estos son:

1. S1 – F1- 50
2. S1 – F2 – 50
3. S1 – F1 – 100
4. S1 – F2 – 100

5. S2 – F1- 50
6. S2 – F2 – 50
7. S2 – F1 – 100
8. S2 – F2 – 100 (Montejo, 2006, pp.367-368).

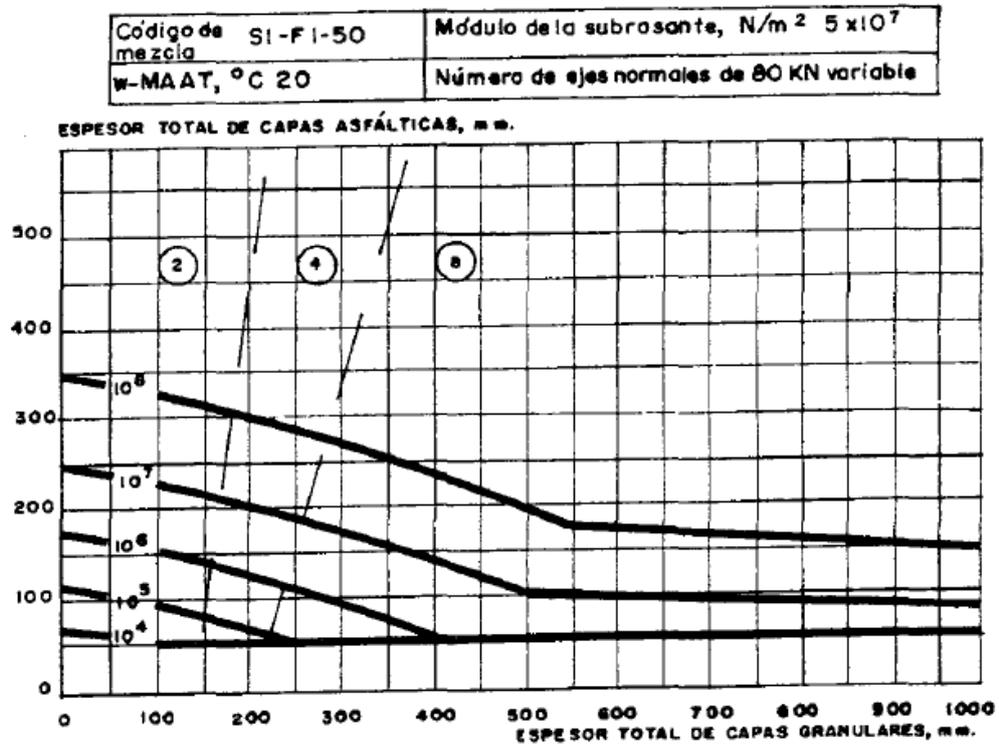


Figura 10: Características de fatiga F1 y F2

Fuente: “Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, Estudios Básicos y Diseño” por Montejo (2006, p.299).

La consideración de las alternativas en base al cumplimiento de los parámetros requeridos tales como el tráfico expresado en ejes equivalentes de diseño, así como el valor del módulo resiliente de la subrasante, se analizará a detalle para garantizar la efectividad de la estructura del pavimento

De estos métodos, tanto para los empíricos como para las mecanicistas, existen ventajas y desventajas, de los cuales es necesario mencionarlas en un cuadro comparativo para visualizar de manera general sus factores, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Cuadro de comparación de los Métodos Empíricos y Mecanicistas

	Método Empírico	Método Mecanicista
Factores Importantes	<ul style="list-style-type: none"> - Cargas de tránsito - Condiciones ambientales (T°, precipitación) - Tipo de subrasante - Calidad de los materiales 	<ul style="list-style-type: none"> - Carga - Presión de contacto - Propiedades mecánicas de los materiales (E, μ) - Espesores de las capas
Ventajas	<p>Emplea modelos matemáticos de poca complejidad basados en resultados de experiencias pasadas.</p>	<p>Al considerar el análisis de tensiones y deformaciones en cada capa de la estructura, los resultados del comportamiento tienden a aproximarse más a la realidad.</p>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - No consideran que las capas ligadas sean susceptibles a incrementos de temperatura (mayor deformación) - No consideran que las capas granulares contribuyen a la acumulación de deformación permanente - Este método de diseño necesita de gran inversión y tiempo para la realización de ensayos. 	<ul style="list-style-type: none"> - No consideran que el comportamiento de las mezclas asfálticas es viscoso (depende de la temperatura y velocidad de aplicación de la carga). - No consideran que los materiales granulares tienen un comportamiento inelástico no lineal. - En la mayoría de los casos no tienen en consideración el efecto del medio ambiente sobre las propiedades mecánicas de los materiales.

Fuente: “Análisis comparativo de métodos de diseño de pavimentos flexibles”, por Rodríguez, B (2013, p. 8)

2.3.5 Software Bisar

La aplicación del software Bisar se hace con el fin de desarrollar el método Shell según las propiedades de la carpeta asfáltica, capas granulares, y su rasante; configurando el sistema de aplicación de la carga según corresponde al método sobre el radio de contacto de la rueda y el pavimento, distancia entre ruedas y la carga aplicada.

Como dato de ingreso de las diferentes capas granulares es necesario contar con el valor del módulo resiliente correspondiente a la capa asfáltica y al módulo resiliente combinado de las capas granulares (base y sub base), así como el módulo resiliente de la sub rasante.

Para la aplicación del software Bisar es necesario incluir los valores de entrada para el módulo de Poisson de cada capa que conforma el pavimento, para lo cual, se utilizó la Tabla 5, donde muestra los valores de módulo de Poisson según el tipo de material que compone a cada capa:

Tabla 5: Módulo de Poisson referencial

Módulo de Poisson para diferentes materiales		
Material	Rango	Típico
Mezcla asfáltica en caliente	0.30 - 0.40	0.30
Concreto de cemento Portland	0.15 - 0.20	0.15
Material granular sin tratar	0.30 - 0.40	0.35
Cemento granular tratado	0.10 - 0.20	0.15
Cemento de agregado fino tratado	0.15 - 0.35	0.25
Cal estabilizada	0.10 - 0.25	0.20
Cal mezclada con cenizas volantes	0.10 - 0.15	0.15
Arena suelta o sedosa	0.20 - 0.30	0.30
Arena densa	0.30 - 0.45	0.35
Suelo de agregado fino	0.30 - 0.50	0.40
Arcillas blandas saturadas	0.40 - 0.50	0.45

Fuente: "Pavement analysis and desing" Huang (2004, p. 329)

2.3.6 Tráfico vial

- Aspectos de demanda para estudios

El Manual de Carreteras, sección: Suelos y Pavimentos del MTC (2014). Se mencionó que conocer la demanda de tráfico es de suma importancia para el ingeniero proyectista, esta información debe ser confiable y con el mayor grado de precisión posible, de tal manera que, se pueda llevar una planificación y diseño exitoso de los distintos aspectos viales, tales como, el diseño de la plataforma y pavimento del camino.

El manual de carreteras del MTC, en la sección de Suelos y Pavimentos define la necesidad de estudiar el tráfico vial tanto para el diseño de la estructura del pavimento como para la determinación de la capacidad de servicio de los tramos

viales, esto con el fin de estimar hasta qué punto crecerá el volumen de tráfico que soportará la vía en estudio dentro del periodo de diseño proyectado.

El estudio de tráfico es importante ya que nos proporciona el valor del Índice Medio Diario Anual (IMDA) para cada tramo vial en estudio. Previamente establecidos en los términos de referencia que subdivide tramos viales con características homogéneas.

Por ende, es necesario conocer la demanda volumétrica actual y la clasificación por tipo de vehículo de cada tramo subdividido. El MTC dispone de información sobre los índices de variación mensual que registra continuamente en las estaciones de pesaje y peaje existentes a nivel nacional, tanto de su propiedad como de las concesiones viales vigentes, por lo que, puede proporcionar dicha información para el cálculo del IMDA. Dicha información es de suma importancia ya que se ubica en puntos estratégicos de manera regional, lo cual, involucra la optimización de los estudios disminuyendo los costos para la obtención de la información vital para el desarrollo de los proyectos viales, además de garantizar que la información registrada es oficial según los regimientos normativos vigentes lo cual, brinda mayor consistencia y confiabilidad a los estudios que se realicen en base a dicha base de datos.

Así mismo, el Manual de Carreteras, sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014). Recomendó que en caso se requiera información más precisa sobre los estudios de tráfico, deberá estar conformada por el volumen de tráfico actual clasificada por tipo de vehículo en cada sentido de tráfico orientados a calcular el IMDA del tramo en estudio. El principio de deterioro del pavimento a causa del tránsito de vehículos pesados se registrará en base a la presión de los neumáticos y a la Carga de cada Eje de camiones y ómnibus.

Con la información fidedigna proporcionada por el MTC, el tráfico se podrá constatar en casos puntuales al cabo de dos días para cada tramo de estudio bajo condiciones normales de tráfico en los días de la semana que más incidan, tal y como el día sábado y un día particular, de tal manera, que se noté la variación en ambos casos. En todo caso, y según la información proporcionada por la autoridad competente, se podrán establecer más días de estudios, según lo requiera, esto debido a distintos factores externos como es el clima o periodos de tiempo importantes para la localidad donde se genera un considerable aumento en el volumen de tráfico.

Además de ello, es necesario llevar un control de pesaje aleatorio mediante instrumentos calibrados en base a la normativa legal vigente, para una cantidad representativa de vehículos pesados que transiten por el tramo en estudio siendo no menor al 30%, esto para evitar o disminuir la distorsión en la información registrada.

Este porcentaje mínimo podrá ser menor siempre y cuando se justifica dicha variación, en casos especiales como flujo de tráfico muy pequeños.

Demanda Proyectada

La información registrada del tramo en estudio servirá para proyectar la demanda de tráfico en el periodo de análisis, y de esta manera, establecer la cantidad de Ejes Equivalentes de diseño que soportará el pavimento. En todo caso, el Ingeniero Responsable justificará el hecho de usar información del crecimiento de la demanda en base a tendencias históricas de información preexistente o si tomará factores socio-económicos que modificarán dicho crecimiento de tráfico.

- Factor direccional y factor carril

El factor direccional corresponde a la cantidad de vehículos pesados que transitan en cada sentido de la vía, expresado como una relación que normalmente es la mitad del total de dicho tráfico del tramo evaluado. Siendo posible, obtener un valor mayor al indicado según lo demuestre el estudio de conteo de tráfico.

El factor carril esta dado como una relación que corresponde al carril o sentido que mayor número de EE recibe, generalmente es el carril por donde se canaliza el mayor tránsito.

El tráfico para el carril de diseño del pavimento considerará la cantidad de sentidos o direcciones, así como la cantidad de carriles por calzada de la vía. En tal sentido, se aplicará el IMD según el porcentaje o factor ponderado, lo cual se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Factores de Distribución Direccional de Carril

Número de calzadas	Número de sentidos	Número de carriles por sentido	Factor Direccional (Fd)	Factor Carril (Fc)	Factor Ponderado Fd x Fc para el carril de diseño
1 calzada (para IMDA total de la calzada)	1 sentido	1	1.00	1.00	1.00
	1 sentido	2	1.00	0.80	0.80
	1 sentido	3	1.00	0.60	0.60
	1 sentido	4	1.00	0.50	0.50
	2 sentidos	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentidos	2	0.50	0.80	0.40
2 calzadas con separador central (para IMDA total de las dos calzadas)	2 sentidos	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentidos	2	0.50	0.80	0.40
	2 sentidos	3	0.50	0.60	0.30
	2 sentidos	4	0.50	0.50	0.25

Fuente: Manual de Suelos y Pavimentos del MTC (2014)

- Cálculo de tasas de crecimiento y proyección

El crecimiento de tránsito se puede calcular mediante una fórmula de progresión geométrica independientemente para los componentes de tránsito de vehículos pesado y de tránsito de vehículos de pasajeros.

$$T_n = T_o(1 + r)^{n-1} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- T_n = Tránsito proyectado al año “n” en veh/día
- T_o = Tránsito actual (año base o) en veh/día
- n = Número de años del periodo de diseño
- r = Tasa anual de crecimiento del tránsito.

La tasa de crecimiento anual de tránsito se correlaciona con el crecimiento socio económico zonal, asociando generalmente el crecimiento del tránsito de vehículos de pasajeros con el crecimiento poblacional y el crecimiento de

vehículos de carga con el crecimiento de la economía expresado como el Producto Bruto Interno (PBI). Estos valores de crecimiento suelen estar en el rango de 2% a 6%.

Teniendo en cuenta que dichos porcentajes pueden variar considerablemente en caso se implementen proyectos de desarrollo a corto plazo en la zona de influencia de la vía vehicular. Lo mismo sucede con la proyección de la demanda, y los aspectos antes mencionados, en tal sentido, la región de influencia cuenta con registros de tendencia histórica para ambos índices de crecimiento.

En la Tabla 7, se muestran los valores para el Factor de Crecimiento Acumulado (Fca) según el periodo de diseño que considera la tasa de crecimiento anual (r) y el periodo de diseño expresado en años.

Tabla 7: Factores de Crecimiento Acumulado (Fca) para el Cálculo de Números de Repeticiones EE

Periodo de Análisis (años)	Factor sin crecimiento	Tasa anual de crecimiento (r)							
		2	3	4	5	6	7	8	10
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	2.00	2.02	2.03	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.00	3.06	3.09	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.00	4.12	4.18	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.00	5.20	5.31	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.00	6.31	6.47	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.00	7.43	7.66	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.00	8.58	8.89	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.00	9.75	10.16	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.00	10.95	11.46	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.00	12.17	12.81	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.00	13.41	14.19	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.00	14.68	15.62	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.00	15.97	17.09	18.29	19.60	21.02	22.55	24.21	27.97
15	15.00	17.29	18.60	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.00	18.64	20.16	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95

17	17.00	20.01	21.76	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.54
18	18.00	21.41	23.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.00	22.84	25.12	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.00	24.30	26.87	29.78	33.07	36.79	41.00	45.76	57.27

Fuente: Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014).

Datos obtenidos según la siguiente ecuación de progresión geométrica para el Factor de Crecimiento Acumulado:

$$Fca = \frac{(1+r)^n - 1}{r} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

r = Tasa anual de crecimiento

n = Periodo de diseño

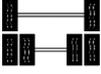
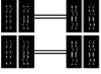
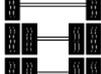
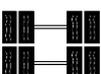
- Número de repeticiones de ejes equivalentes

La demanda de tráfico de camiones y ómnibus se considera de suma importancia para el diseño del pavimento debido a su efecto destructivo sobre dicha estructura. Para lo cual, AASHTO definió la unidad de Ejes Equivalentes (EE) que, en su totalidad son acumulados en la proyección del periodo de diseño. Individualmente cada EE esta caracterizado como un eje simple de dos ruedas que transporta una carga de 8,2 toneladas a una presión de inflado de 80 lbs/pulg².

Por lo que, según el tipo de vehículo y la configuración de ejes que contengan, se podrá estimar el efecto destructivo que causan sobre la estructura del pavimento representado en unidades de EE. En la Tabla 8 observamos los tipos de configuraciones que podrían contener los tipos de vehículos antes mencionados:

Tabla 8: Configuración de Ejes

Conjunto de Eje (s)	Nomenclatura	N° de Neumáticos	Gráfico
EJE SIMPLE (Con Rueda Simple)	1RS	02	
EJE SIMPLE (Con Rueda Doble)	1RD	04	

EJE TANDEM (1 Eje Rueda Simple + 1 Eje Rueda Doble)	1RS + 1 RD	06	
EJE TANDEM (2 Ejes Rueda Doble)	2RD	08	
EJE TRIDEM (1 Rueda Simple + 2 Ejes Rueda Doble)	1 RS + 2 RD	10	
EJE TRIDEM (3 Ejes Rueda Doble)	3RD	12	

Fuente: Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos (2014).

Nota:

RS: Rueda Simple

RD: Rueda Doble

Considerando los vehículos pesados como buses y camiones se establecen las siguientes relaciones simplificadas en base a la Guía AASHTO 93 para el cálculo de los Ejes Equivalentes, como se muestra a continuación:

Tabla 9: Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE)
Para Pavimentos Flexibles

Tipo de Eje	Eje Equivalente (EE _{8.2 tn})
Eje Simple de ruedas simples (EE _{s1})	EE _{S1} = [P/6.6] ^{4.0}
Eje Simple de ruedas dobles (EE _{s2})	EE _{S2} = [P/8.2] ^{4.0}
Eje Tandem (1 eje ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE _{TA1})	EE _{TA1} = [P/14.8] ^{4.0}
Eje Tandem (2 ejes ruedas dobles) (EE _{TA2})	EE _{TA2} = [P/15.1] ^{4.0}
Eje Tridem (2 ejes ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE _{TR1})	EE _{TR1} = [P/20.7] ^{3.9}
Eje Tridem (3 ejes de ruedas dobles) (EE _{TR2})	EE _{TR2} = [P/21.8] ^{3.9}

Fuente: Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014)

Los Ejes Equivalentes proyectados que se considerarán para el diseño del pavimento son aquellos que circulan por el “carril de diseño” siendo el carril más cargado, lo cual, se asignará para toda la vía típica según los tramos homogéneos.

La demanda de tráfico que soportará el carril de diseño considerará el tipo de sección transversal de la vía, el número de calzadas y la distribución de la carga en cada carril de la calzada.

La medición de la demanda de tráfico está basada en conteos muestrales estratificados, siempre y cuando no se cuente con información de estaciones de pesaje cercanos, para lo cual, es necesario realizar censos de pesajes representativos y determinar la carga real en toneladas por tipo de ejes y tipo de vehículos centrándonos en los vehículos pesados. De esta manera se calculará el Factor Vehículo Pesado (Fvp) para cada tipo de vehículo pesado estudiado en el camino de análisis como promedio de EE que los caracteriza, promediando la sumatoria de los EE de cada vehículo pesado en específico entre la cantidad obtenida del conteo de tráfico de dicho vehículo pesado encuestado.

En el Manual de Carreteras Sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014), se desarrolla un ejemplo para el cálculo del factor camión considerando cantidades determinadas de ejes simples y dobles para cierta cantidad de vehículos pesados, siendo un caso específico válido solamente como procedimiento a realizar en base a su esquema, más no para tomar dichos resultados como datos estándar aplicables a otros casos.

Para ello, cabe resaltar que el cálculo del valor del Fvp debe ser realizado con las cargas reales de cada eje de los vehículos pesados encuestados representativamente en el censo de cargas, según lo indica el Reglamento Nacional de Vehículos que esté vigente.

Para el cálculo de los EE, el Ingeniero responsable deberá considerar un factor de ajuste debido a la presión de inflado de los neumáticos y su efecto de deterioro sobre el pavimento flexible.

En la Tabla 10 se muestran los valores de corrección de factores de ajuste por presión de neumáticos, los cuales podrán interpolarse en caso se obtengan valores intermedios:

Tabla 10: Factor de Ajuste por Presión de Neumático (Fp) para Ejes Equivalentes (EE)

Factor de Ajuste por Presión de Neumático (Fp) para Ejes Equivalentes (EE)							
Espesor de Capa de Rodadura (mm)	Presión de Contacto del Neumático (PCN) en psi						
	PCN = 0.90 x [Presión de Inflado del Neumático] (psi)						
	80	90	100	110	120	130	140
50	1.00	1.30	1.80	2.13	2.91	3.59	4.37
60	1.00	1.33	1.72	2.18	2.69	3.27	3.92
70	1.00	1.30	1.65	2.05	2.49	2.99	3.53
80	1.00	1.28	1.59	1.94	2.32	2.74	3.20
90	1.00	1.25	1.53	1.84	2.17	2.52	2.91
100	1.00	1.23	1.48	1.75	2.04	2.35	2.68
110	1.00	1.21	1.43	1.66	1.91	2.17	2.44
120	1.00	1.19	1.38	1.59	1.80	2.02	2.25
130	1.00	1.17	1.34	1.52	1.70	1.89	2.09
140	1.00	1.15	1.30	1.46	1.62	1.78	1.94
150	1.00	1.13	1.26	1.39	1.52	1.66	1.79
160	1.00	1.12	1.24	1.36	1.47	1.59	1.71
170	1.00	1.11	1.21	1.31	1.41	1.51	1.61
180	1.00	1.09	1.18	1.27	1.36	1.45	1.53
190	1.00	1.08	1.16	1.24	1.31	1.39	1.46
200	1.00	1.08	1.15	1.22	1.28	1.35	1.41

Fuente: Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014).

Nota:

- EE: Ejes equivalentes.
- Presión de inflado del neumático (Pin): está referido al promedio de presiones de inflado de neumáticos por tipo de vehículo pesado.
- Presión de Contacto del neumático (PCN): igual al 90% del promedio de presiones de inflado de neumáticos por tipo de vehículo pesado.
- Para espesores menores de capa de rodadura asfáltica, se aplicará el factor de Ajuste igual al espesor de 50 mm.

El número de Repeticiones de Ejes Equivalentes de 8.2 tn se calculará sumando los resultados por tipo de vehículo pesado aplicando la ecuación 9.

$$N_{rep} \text{ de EE } 8.2 \text{ tn} = \Sigma [EE_{\text{día-carril}} \times F_{ca} \times 365] \quad \text{Ecuación 9}$$

Tabla 11: Definición de cada elemento de Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes de 8.2tn

Parámetros	Descripción
Nrep de EE 8.2 tn	Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes de 8.2 tn
EE _{día-carril}	EE _{día-carril} = Ejes Equivalentes por tipo de vehículo pesado, por día para el carril de diseño, que resulta del IMD de cada tipo de vehículo pesado multiplicado por el Factor Direccional por el Factor Carril de diseño por el Factor Vehículo Pesado, según el tipo seleccionado y a su vez, multiplicado por el Factor de Presión de Neumáticos. Aplicado en tal sentido para cada tipo de vehículo pesado. Lo cual se traduce en la siguiente relación:
	$EE_{\text{día-carril}} = IMD_i \times F_d \times F_c \times F_{vp_i} \times F_{p_i}$
	Donde:
	IMD _i = Es el Índice Medio Diario según el tipo de vehículo pesado seleccionado (i)
	F _d : Factor Direccional, según cuadro N° 6.1
	F _c : Factor Carril de diseño, según cuadro N° 6.1
	F _{vp_i} = Es el Factor Vehículo Pesado del tipo seleccionado (i) el cual se calcula según la composición de sus ejes, este factor representa el número de ejes equivalente promedio por tipo de vehículo pesado (bus o camión). Donde se obtiene el promedio dividiendo el total de EE entre la cantidad de vehículos del mismo tipo identificados en el censo muestral.
F _p : Factor de Presión de neumáticos, según el cuadro N° 6.13	
F _{ca}	Factor de Crecimiento Acumulado por cada tipo de vehículo pesado.
365	Número de días del año
Σ	Sumatoria de Ejes Equivalentes del total de tipo de vehículos pesados. Por día y para el carril de diseño por el Factor de Crecimiento Acumulado por 365 días del año.

Fuente: Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014).

- Clasificación de número de repeticiones de EE en el periodo de diseño
El Manual de Carreteras, Sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014), clasifica el tránsito para Pavimentos Flexibles en 15 rangos según la cantidad de Ejes Equivalentes obtenido en el análisis, desde 75,000 EE hasta 30'000,000 EE, según la Tabla 12:

Tabla 12: Número de Repeticiones Acumuladas de Ejes Equivalentes de 8.2 tn en el Carril de Diseño Para Pavimentos Flexibles.

Tipos Tráfico Pesado expresado en EE	Rangos de Tráfico Pesado expresado en EE
T_{p0}	>75,000 EE $\leq 150,000$ EE
T_{p1}	>150,000 EE $\leq 300,000$ EE
T_{p2}	>300,000 EE $\leq 500,000$ EE
T_{p3}	>500,000 EE $\leq 750,000$ EE
T_{p4}	>750,000 EE $\leq 1'000,000$ EE
T_{p5}	>1'000,000 EE $\leq 1'500,000$ EE
T_{p6}	>1'500,000 EE $\leq 3'000,000$ EE
T_{p7}	>3'000,000 EE $\leq 5'000,000$ EE
T_{p8}	>5'000,000 EE $\leq 7'500,000$ EE
T_{p9}	>7'500,000 EE $\leq 10'000,000$ EE
T_{p10}	>10'000,000 EE $\leq 12'500,000$ EE

T_{p11}	>12'500,000 EE $\leq 15'000,000$ EE
T_{p12}	>15'000,000 EE $\leq 20'000,000$ EE
T_{p13}	>20'000,000 EE $\leq 25'000,000$ EE
T_{p14}	>25'000,000 EE $\leq 30'000,000$ EE
T_{p15}	>30'000,000 EE

Fuente: Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014)

Nota:

- T_{px} : T = Tráfico Pesado expresado en EE en el carril de diseño.
- PX = Pavimentada, X = número de rango (5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15)

Para el rango de tráfico mayores a 30'000,000 EE se considerará un estudio específico, en el cual, el Ingeniero Responsable justificará la aplicación de otras alternativas de tipo de pavimentación.

Para los rangos de tráfico menores a 1'000,000 EE se considerarán como carreteras de bajo volumen, lo cual, es recomendable diseñar en un periodo de análisis de 10 años.

- Clasificación vehicular nacional
- Clasificación Vehicular del Reglamento Nacional de Vehículos del MTC (2003)

Para los efectos que correspondan a nivel nacional, la clasificación vehicular establecida debe seguirse con fines a mantener un estándar en cuestiones de diseño tanto geométricos como de la estructura del pavimento, además las clasificación vehicular está dada según la función que va a desempeñar el tipo de vehículo tal como la actividad comercial, transporte de mercancías o de pasajeros, o de uso personal y privado según la capacidad, tamaño, y

configuración de ejes que posea el vehículo, para lo cual el Reglamento Nacional de Vehículos plantea la Tabla 13:

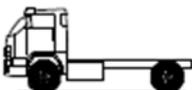
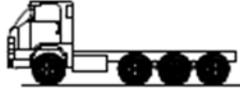
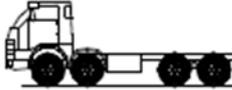
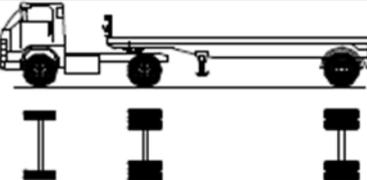
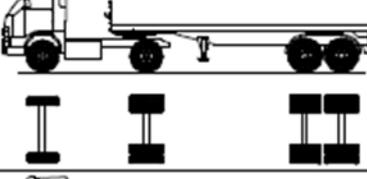
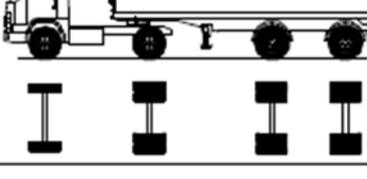
Tabla 13: Clasificación vehicular por categorías

Categoría							
L		M		N		O	
L ₁	Vehículos de dos ruedas, de hasta 50 cm ³ y velocidad máxima de 50 km/h.	M ₁	Vehículos de ocho asientos o menos, sin contar el asiento del conductor.	N ₁	Vehículos con peso bruto vehicular de 3,5 tn o menos.	O ₁	Remolques con carga vehicular de 0,75 tn o menos.
L ₂	Vehículos de tres ruedas, de hasta 50 cm ³ y velocidad máxima de 50 km/h.	M ₂	Vehículos de más de ocho asientos, sin contar el asiento del conductor.	N ₂	Vehículos con peso bruto vehicular mayor de 3,5 tn y hasta 12 tn.	O ₂	Remolques de peso bruto vehicular de más de 0,75 tn hasta 3,5 tn.
L ₃	Vehículos de dos ruedas, de más de 50 cm ³ y velocidad máxima de 50 km/h.	M ₃	Vehículos de más de ocho asientos, sin contar el asiento del conductor y peso bruto vehicular de más de 5 tn.	N ₃	Vehículos con peso bruto vehicular mayor a 12 tn.	O ₃	Remolques de peso bruto vehicular de más de 3,5 tn hasta 10 tn.
L ₄	Vehículos de tres ruedas asimétricas al eje longitudinal del vehículo, de más de 50 cm ³ o velocidad mayor a de 50 km/h.	Clase I: Vehículos contruidos con áreas para permitir pasajeros de pie y el libre tránsito de estos.				O ₄	Remolques de peso bruto vehicular de más de 10 tn.
L ₅	Vehículos de tres ruedas simétricas al eje longitudinal del vehículo, de más de 50 cm ³ o velocidad mayor a de 50 km/h y cuyo peso bruto no exceda de una tonelada.	Clase II: Vehículos contruidos con áreas para permitir pasajeros sentados y de pie y/o que estos no ocupen el espacio de dos asientos dobles.				-	
		Clase III: Vehículos contruidos exclusivamente para el transporte de pasajeros sentados.					

Fuente: Reglamento Nacional de Vehículos – MTC (2003).

En dicho reglamento, también se describen las características que en cuestiones de dimensión y uso se diferencian entre sí. Para el caso de diseño de pavimentos se ha mencionado que se consideran los vehículos pesados o de carga, ya sea de pasajeros o mercancía, los más relevantes se señalan a continuación considerando distintos aspectos característicos:

Tabla 14: Pesos y medidas máximas permitidas I

TABLA DE PESOS Y MEDIDAS								
Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. (m)	Peso máximo (t)				Peso bruto máx. (t)	
			Eje Delant	Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º		4º
C2		12,30	7	11	---	---	---	18
C3		13,20	7	18	---	---	---	25
C4		13,20	7	23 ⁽¹⁾	---	---	---	30
8x4		13,20	7+7 ⁽⁵⁾	18	---	---	---	32
T2S1		20,50	7	11	11	---	---	29
T2S2		20,50	7	11	18	---	---	36
T2Se2		20,50	7	11	11	11	---	40

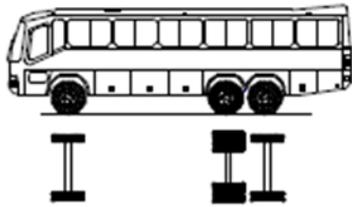
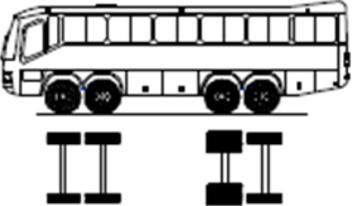
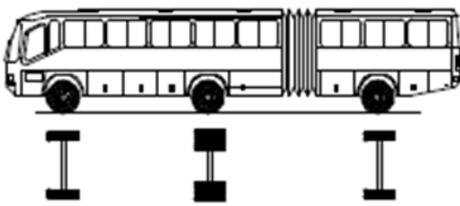
Fuente: MTC, Reglamento Nacional de Vehículos (2003).

Tabla 15: Pesos y medidas máximas permitidas II

Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. (m)	Peso máximo (t)				Peso bruto máx. (t)	
			Eje Delant	Conjunto de ejes posteriores				
				1°	2°	3°		4°
8x4 RB2		20,50	7+7 ⁽⁵⁾	18	18	—	—	48 ⁽²⁾
T3S2 S2		23,00	7	18	18	18	—	48 ⁽²⁾
T3Se2 Se2		23,00	7	18	11 + 11 ⁽³⁾	11 + 11 ⁽³⁾	—	48 ⁽²⁾
T3S2 S1S2		23,00	7	18	18	11	18	48 ⁽²⁾
T3Se2 S1Se2		23,00	7	18	11 + 11 ⁽³⁾	11	11 + 11 ⁽³⁾	48 ⁽²⁾
B2		13,20	7	11	—	—	—	18

Fuente: MTC, Reglamento Nacional de Vehículos (2003).

Tabla 16: Pesos y medidas máximas permitidas III

Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. (m)	Peso máximo (t)				Peso bruto máx. (t)	
			Eje Delant	Conjunto de ejes posteriores				
				1°	2°	3°		4°
B3-1		14,00	7	16	---	---	---	23
B4-1		15,00	7+7 ⁽⁵⁾	16	---	---	---	30
BA-1		18,30	7	11	7	---	---	25

Fuente: MTC, Reglamento Nacional de Vehículos (2003).

- (1) Conjunto de ejes con un eje direccional.
- (2) Vehículo con facilidad de distribución de peso por ejes
- (3) Conjunto de ejes separados compuestos por dos ejes simples donde la distancia entre centro de ruedas es superior a 2,40 m
- (4) Eje direccional
- (5) Carga máxima para conjunto de ejes direccionales compuestos por dos ejes simples donde la distancia entre centros de ruedas es superior a 1,70 m

- Clasificación de vehículos de diseño del Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG - 2018.

Se clasificarán como tipo M a aquellos vehículos pesados de 4 ruedas diseñados para el transporte de más de 8 asientos sin contar el asiento del conductor.

El manual en mención detalla los datos básicos de los vehículos tipo M para la utilización en el diseño de carreteras según el Reglamento Nacional de Vehículos (D.S. N° 050-2003-MTC- o el que se encuentre vigente). Lo cual, se muestra en la Tabla 17:

Tabla 17: Datos básicos de los vehículos tipo M

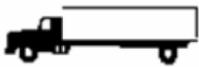
Tipo de vehículo	Alto total	Ancho total	Vuelo lateral	Ancho ejes	Largo total	Vuelo delantero	Separación ejes	Vuelo trasero	Radio mín. rueda exterior
Vehículo ligero (VL)	1.30	2.10	0.15	1.80	5.80	0.90	3.40	1.50	7.30
Ómnibus de dos ejes (B2)	4.10	2.60	0.00	2.60	13.20	2.30	8.25	2.65	12.80
Ómnibus de tres ejes (B3-1)	4.10	2.60	0.00	2.60	14.00	2.40	7.55	4.05	13.70
Ómnibus de cuatro ejes (B4-1)	4.10	2.60	0.00	2.60	15.00	3.20	7.75	4.05	13.70
Ómnibus articulado (BA-1)	4.10	2.60	0.00	2.60	18.30	2.60	6.70/1.90/4.00	3.10	12.80
Semiremolque simple (T2S1)	4.10	2.60	0.00	2.60	20.50	1.20	6.00/12.50	0.80	13.70
Remolque simple (C2R1)	4.10	2.60	0.00	2.60	23.00	1.20	10.30/0.80/2.15/7.75	0.80	12.80
Semiremolque doble (T3S2S2)	4.10	2.60	0.00	2.60	23.00	1.20	5.40/6.80/1.40/6.80	1.40	13.70
Semiremolque remolque (T3S2S1S2)	4.10	2.60	0.00	2.60	23.00	1.20	5.45/5.70/1.40/2.15/5.70	1.40	13.70
Semiremolque simple (T3S3)	4.10	2.60	0.00	2.60	20.50	1.20	5.40/11.90	2.00	1.00

Fuente: Manual de Carreteras: Diseño Geométrico (2018).

- Clasificación de vehículos del Manual para el diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo volumen de tránsito del MTC (2008)

Bajo los parámetros vehiculares ya mencionados del Reglamento Nacional de Vehículos, el manual para el diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen no indica el valor de los factores equivalentes de carga por tipo de vehículo, para el caso que se asume la carga equivalente como un eje simple de dos ruedas cargado con 8,2 tn, lo cual, se muestra a continuación:

Tabla 18: Factores de equivalencia de carga por tipo de vehículo

Factores de Equivalencia de Carga Legal por Eje de Vehículo						
Símbolo	Diagrama	Descripción	Eje delantero	Eje posterior		Total
				1er eje	2do eje	
C2		Carga (tn)	7.00	11.00		18.00
		F.EE.	1.27	3.24		4.50
C3		Carga (tn)	7.00	18.00		25.00
		F.EE.	1.27	2.02		3.29
2S1		Carga (tn)	7.00	11.00	11.00	29.00
		F.EE.	1.27	3.24	3.24	7.74
B2		Carga (tn)	7.00	11.00		18.00
		F.EE.	1.27	3.24		4.50
B3		Carga (tn)	7.00	18.00		25.00
		F.EE.	1.27	2.02		3.29

Fuente: Manual de diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo volumen de Tránsito del MTC (2008).

Asimismo, se indica en el manual de diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito, que de contar con información de pesaje se puede recurrir a información estadística registrada en la Panamericana Norte de manera referencial, como se muestra en la Tabla 19:

Tabla 19: Factor de ejes equivalentes por tipo de vehículo de la Panamericana Norte

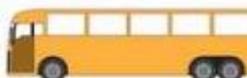
Clase de vehículo Eje equivalente	EE (8.2 tn)
Bus (de 2 o 3 ejes)	1.85
Camión ligero (2 ejes)	1.15
Camión mediano (2 ejes)	2.75
Camión pesado (3 ejes)	2
Camión articulado (> 3 ejes)	4.35
Auto o vehículo ligero	0.0001

Fuente: Manual de diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo volumen de Tránsito del MTC (2008).

- Clasificación vehicular Internacional
- Clasificación vehicular según la guía AASHTO (93)

La guía AASHTO 93 para el diseño de estructuras de pavimento flexible, considera la siguiente clasificación vehicular como volumen de camiones a partir de la clase 4 hasta la clase 13 para el estudio de tráfico vial, la clasificación vehicular fue propuesta por la Federal Highway Administration (FHWA), teniendo en cuenta lo que lleva el vehículo, pasajero o mercancías, en el caso de mercancías los vehículos se subdividen según la cantidad de ejes, y considerando las unidades de potencia y remolques, además resalta que las variaciones en distanciamiento entre ejes de un vehículo pueden ser diferentes según la región o país en donde se aplique, por lo que los clasificadores automáticos que obedecen a algoritmos matemáticos no son idóneos en todos los casos, para ello, los organismos competentes deben desarrollar, probar y calibrar su clasificación vehicular. Su propuesta de clasificación vehicular se muestra en la Tabla 20:

Tabla 20: Clasificación vehicular de la Federal Highway Administration (FHWA)

CLASIFICACIONES DE VEHÍCULOS FHWA			
1. Motocicletas	2. Automóviles de pasajeros	3. Camionetas, furgonetas	4. Autobuses
2 ejes, 2 o 3 neumáticos	2 ejes, puede tener 1- o 2-ejes de remolques	2 ejes, 4-neumáticos unidades individuales, puede tener 1 o 2 ejes de remolques	2 o 3 ejes, longitud total
	 	 	 
5. Camiones de 2 ejes		6. Camiones de 3 ejes	7. Camiones de 4 ejes o más
			8. Camiones de 3 o 4 ejes

<p>2 ejes, 6 neumáticos (neumáticos traseros dobles),</p>  <p>unidad individual</p>	<p>3 ejes, unidad individual</p> 	<p>4 o más ejes, unidad</p>  <p>individual</p>	<p>3 o 4 ejes, remolque individual</p>
<p>9. Camiones de 5 ejes</p>	<p>10. Camiones de 6 ejes o más</p>		
<p>5 ejes, remolque individual</p> 	<p>6 o más ejes, remolque</p>  <p>individual</p>		
<p>11. Camiones de 5 o menos ejes multiremolque</p>	<p>13. Camiones de 6 ejes multiremolque</p>		
<p>5 o menos ejes multiremolque</p> 	<p>6 ejes multiremolque</p>		
<p>13. Camiones multiremolque de 7 ejes o más</p>			
<p>7 o más ejes multiremolque</p> 			

Fuente: Traffic Monitoring Guide - Federal Highway Administration (FHWA) (2013)

Además, plantearon valores de factor camión en base a sus propios registros de tráfico y asumiendo un valor de 2.5 para el índice de serviciabilidad final y de 5 para el número estructural (SN), de esta manera se calculó la cantidad de Ejes Equivalentes de diseño.

Del Manual de Carreteras, Sección Suelos y Pavimentos (2014), que traduce el ejemplo de la Guía AASHTO 93, se dan las condiciones de tráfico siguientes para una cantidad de vehículos específicos:

Tabla 21: Computo de valor de vehículos pesados según ejemplo guía AASHTO 93

Rango de Cargas por Eje (Toneladas)	Cantidad de Ejes Pesados en Balanza para 165 Vehículos Pesados	Factor de Equivalencia por Eje (EE Por Eje)	EE (Ejes Equivalentes)
Eje Simple			
< 1.4	0	0.0002	0
1.4 - 3.2	1	0.0005	0.01
3.2 - 3.6	6	0.032	0.19
3.6 - 5.4	144	0.087	12.53
5.4 - 7.3	16	0.36	5.76
7.3 - 13.6	1	5.398	3.39
Eje Tandem			
< 2.7	0	0.01	0
2.7 - 5.4	14	0.01	0.14
5.4 - 8.2	21	0.044	0.92
8.2 - 10.9	44	0.148	6.51
10.9 - 11.8	42	0.426	17.89
11.8 - 14.5	44	0.753	33.13
14.5 - 14.8	21	0.885	18.59
14.8 - 15.4	101	1.002	101.2
15.4 - 16.3	43	1.23	52.89
		Sumatoria EE	255.15

Fuente: Manual de Carreteras, Sección Suelos y Pavimentos – MTC (2014)

Cabe resaltar que el valor del Factor Camión, obtenido en este ejemplo, es solo aplicable para el mismo, para el diseño de pavimentos bajo condiciones externas distintas es necesario la realización de pesajes a los vehículos que transitan por la vía en estudio según lo establezca la normativa vigente, para aproximarse de manera correcta al volumen de tránsito pesado local y así calcular los factores de deterioro adecuados, tal y como los que se muestra en la Tabla 22 en base a la información anterior:

Tabla 22: Resumen de ejemplos de factores de equivalencia por eje y factor vehículo Camión para pavimento flexible

Configuración vehicular	Peso por Eje en Toneladas (Tn)						Factor Camión
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	
C2	7	10	-	-	-	-	3.477
C3	7	8	8	-	-	-	2.526
T3S3	7	8	8	7	8	8	3.758
B3-1	7	8	7	-	-	-	2.321

Fuente: Manual de Carreteras, Sección Suelos y Pavimentos – MTC (2014).

Así mismo para la distribución de camiones propuesta por el Instituto del Asfalto para zonas urbanas y rurales con el fin de determinar el factor camión se muestra en la Tabla 23:

Tabla 23: Distribución de camiones en vías rurales según el Instituto del Asfalto (2000)

Tipo de camión	Sistema Rural					Rango
	Interestatal	Otras vías principales	Anterior menor	Colectoras		
				Mayores	Menores	
Camiones de una sola unidad						
2 ejes 4 neumáticos	43	60	71	73	80	43-80
2 ejes 6 neumáticos	8	10	11	10	10	8-11
3 ejes o más	2	3	4	4	2	2-4
Todas las unidades	53	73	86	87	92	53-92
Camiones de varias unidades						
4 ejes o menos	5	3	3	2	2	2-5
5 ejes	41	23	11	10	6	6-41
6 ejes o más	1	3	<1	1	<1	<1-1
Todos los ejes múltiples	47	27	14	12	8	8-47
Total de camiones	100	100	100	100	100	

Fuente: Instituto del Asfalto (2000)

Es evidente que en ciudades más desarrolladas se registren mayores volúmenes de tráfico que en zonas rurales menos desarrolladas, tal y como lo muestran los datos de la Tabla 24:

Tabla 24: Distribución de camiones en vías urbanas según el Instituto del Asfalto (2000)

Tipo de camión	Sistema Urbano					Rango
	Interestatal	Otras vías principales	Anterior menor	Colectoras		
				Mayores	Menores	
Camiones de una sola unidad						
2 ejes 4 neumáticos	52	66	67	84	86	52-86
2 ejes 6 neumáticos	12	12	15	9	11	9-15
3 ejes o más	2	4	3	2	1	<1-4
Todas las unidades	66	82	85	95	97	66-97
Camiones de varias unidades						
4 ejes o menos	5	5	3	2	1	1-5
5 ejes	28	13	12	10	2	2-28
6 ejes o más	1	<1	<1	1	<1	<1-1
Todos los ejes múltiples	34	18	15	12	3	3-34
Total de camiones	100	100	100	100	100	

Fuente: Instituto del Asfalto (2000)

En base a esta información el Instituto del Asfalto estableció los siguientes rangos para el Factor Camión de este volumen de tráfico diferenciado por localización rural y urbana, lo cual representa la cantidad de ejes equivalentes por tipo de camión, como se muestra en la Tabla 25:

Tabla 25: Factor Camión en vías rurales según el Instituto del Asfalto (2000)

Tipo de camión	Sistema Rural					
	Interestatal	Otras vías principales	Anterior menor	Colectoras		Rango
				Mayores	Menores	
Camiones de una sola unidad						
2 ejes 4 neumáticos	0.003	0.003	0.003	0.017	0.003	0.003-0.017
2 ejes 6 neumáticos	0.21	0.25	0.28	0.41	0.19	0.19-0.41
3 ejes o más	0.61	0.86	1.06	1.26	0.45	0.45-1.26
Todas las unidades	0.06	0.08	0.08	0.12	0.03	0.03-0.12
Camiones de varias unidades						
4 ejes o menos	0.62	0.92	0.62	0.37	0.91	0.37-0.91
5 ejes	1.09	1.25	1.05	1.67	1.11	1.05-1.67
6 ejes o más	1.23	1.54	1.04	2.21	1.35	1.04-2.21
Todos los ejes múltiples	1.04	1.21	0.97	1.52	1.08	0.97-1.52
Total de camiones	0.52	0.38	0.21	0.30	0.12	

Fuente: Instituto del Asfalto (2000)

Las vías de las ciudades más desarrolladas que soportan mayor volumen de tráfico a comparación con las vías rurales, tendrán un factor de deterioro mayor debido a la acumulación de ejes equivalentes que afectarán a la estructura del pavimento, tal y como se muestra a continuación:

Tabla 26: Factor Camión en vías urbanas según el Instituto del Asfalto (2000)

Tipo de camión	Sistema Urbano					
	Interestatal	Otras vías principales	Anterior menor	Colectoras		Rango
				Mayores	Menores	
Camiones de una sola unidad						
2 ejes 4 neumáticos	0.002	0.015	0.002	0.0026	-	0.006-0.015
2 ejes 6 neumáticos	0.17	0.13	0.24	0.23	0.13	0.13-0.24
3 ejes o más	0.61	0.74	1.02	0.76	0.72	0.61-1.02

Todas las unidades	0.05	0.06	0.09	0.04	0.16	0.04-0.16
Camiones de varias unidades						
4 ejes o menos	0.98	0.98	0.71	0.46	0.40	0.37-0.91
5 ejes	1.07	1.07	0.97	0.77	0.63	0.63-1.17
6 ejes o más	1.05	1.05	0.90	0.64	-	0.64-1.19
Todos los ejes múltiples	1.05	1.05	0.91	0.67	0.53	0.53-1.05
Total de camiones	0.39	0.39	0.21	0.07	0.24	

Fuente: Instituto del Asfalto (2000)

- Clasificación de vehículos de Brasil – Manual de Estudios de Tráfico
Según el Ministerio de Transportes, departamento Nacional de Infraestructura de Transportes, se rigen bajo la siguiente clasificación vehicular, donde indica el peso máximo por tipo de vehículos, así como la distribución de sus ejes:

Tabla 27: Pesos máximos autorizados por configuración de ejes vehiculares

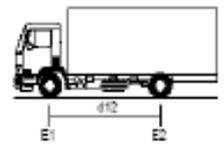
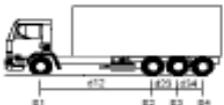
Configuração	Distância entre eixos (ee)	Qtde. de Eixos	Qtde. de Pneus	Suspensão	Carga máxima autorizada
	-----	1	2	-----	6
	-----	1	4	-----	10
	-----	2	4	-----	12
	Menor que 1,20m	2	6	Especial	9
	De 1,20 a 2,40m	2	6	Especial	13,5
	Maior que 1,20 e menor que 2,40 m	2	8	Tandem	17
				Não Tandem	15
	Maior que 1,20 e menor que 2,40 m	3	12	Tandem	25,5
	Maior que 2,40 m	2	8	-----	20
	Maior que 2,40 m	3	12	-----	30

Fuente: Manual de Estudios de Tráfico de Brasil (2006)

Para el dimensionamiento del pavimento flexible, uno de los componentes del tráfico necesario es el factor de equivalencia de carga según la clasificación

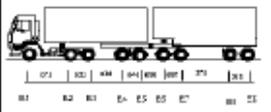
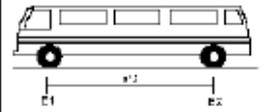
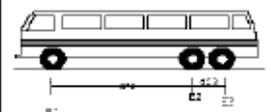
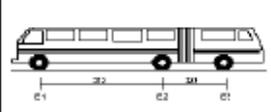
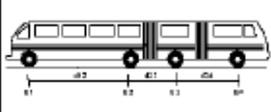
vehicular donde se especifica el valor de la carga máxima permitida por tipo de vehículo que se muestra a continuación:

Tabla 28: Vehículos Adoptados en la Clasificación I del DNIT

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	2	16(16,8)	CAMINHÃO E1 = eixo simples (ES), rodagem simples (RS), carga máxima (CM) = 8t ou capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ES, rodagem dupla (RD), CM = 10t $d_{12} \leq 3,50m$	2C
	3	23(24,2)	CAMINHÃO TRUCADO E1 = ES, RS, CM = 8t E2E3 = ES, conjunto de eixos em tandem duplo TD, CM = 17t $d_{12} > 2,40m$ $1,20m < d_{23} \leq 2,40m$	3C
	3	26(27,3)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM = 8t E2 = ED, RD, CM = 10t E3 = ED, RD, CM = 10t $d_{12}, d_{23} > 2,40m$	2S1
	4	31,5(33,1)	CAMINHÃO SIMPLES E1 = ES, RS, CM 8t E2E3E4 = conjunto de eixos em tandem triplo TT; CM = 25,5t $d_{12} > 2,40$ $1,20m < d_{23}, d_{34} \leq 2,40m$	4C
	4	29(30,5)	CAMINHÃO DUPLO DIRECIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direcionais CED, CM = 12t E3E4 = TD, CM = 17t $1,20m < d_{34} \leq 2,40m$	4CD
	4	33(34,7)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 8t E2 = ED, RD, CM 10t E3E4 = TD, CM = 17t $d_{12}, d_{23} > 2,40m$ $1,20m < d_{34} \leq 2,40m$	2S2
	4	36(37,8)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 8t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t $d_{12}, d_{23}, d_{34} > 2,40m$	2I2

Fuente: Manual de Estudios de Tráfico de Brasil (2006)

Tabla 29: Vehículos Adoptados en la Clasificación II del DNIT

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	9	74(77,7)	RODOTREM (caminhão trator trucado + dois semi reboques dom dolly) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t E8E9 = TD, CM 17t d12, d34, d56, d78 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67, d89 ≤ 2,40m	3T6
	2	16(16,8)	ÔNIBUS E1 = ES, RS, CM 6t ou a capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ED, RD, CM 10t d12 ≤ 3,50m	2CB
	3	19,5(20,5)	ÔNIBUS TRUCADO E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos, carga máxima 13,5t d12 > 2,40m 1,20 < d23 ≤ 2,40m	3CB
	4	25,5(26,8)	ÔNIBUS DUPLO DIRECCIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direccionais, carga máxima 12 ton E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos, carga máxima 13,5t 1,20 < d34 ≤ 2,40m	4CB
	3	26(27,3)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t d12, d23 > 2,40m	2SB1
	4	36(37,8)	ÔNIBUS URBANO BI-ARTICULADO E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t d12, d23, d34 > 2,40m	2IB2

Fuente: Manual de Estudios de Tráfico de Brasil (2006)

Con esta información, es posible determinar el factor de equivalencia de carga, transformando la carga de distintos tipos de eje a un eje estándar de 8.2 tn, es así, que se diferencia el nivel de daño causado al pavimento y se puede proyectar cuanto es el volumen de tráfico que soportará durante su vida útil.

A continuación se muestran las ecuaciones para calcular el factor equivalencia de carga según AASHTO:

Tabla 30: Factores de equivalencia de carga AASHTO

Tipo de eje	Ecuaciones (P en tnf)
Eje simple	$FC = (P / 7,77)^{4,32}$
Eje simple (ruedas dobles)	$FC = (P / 8,17)^{4,32}$
Eje Tándem doble (ruedas dobles)	$FC = (P / 15,08)^{4,14}$
Eje Tándem triple (ruedas dobles)	$FC = (P / 22,95)^{4,22}$

Fuente: Manual de Estudios de Tráfico de Brasil (2006)

Así mismo se muestran las ecuaciones para calcular el factor de equivalencia de cargas según USACE y así poder determinar el factor camión de cada tipo de vehículo.

Tabla 31: Factores de equivalencia de carga USACE

Tipo de eje	Rango de cargas (tn)	Ecuaciones (P en tnf)
Delantero y trasero simple	0 – 8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tándem doble	0 – 11	$FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tándem triple	0 – 18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

Fuente: Manual de Estudios de Tráfico de Brasil (2006)

El valor de P se determina mediante el censo de pesaje de vehículos en puntos específicos de los tramos de la vía en estudio, conociendo el origen y destino y la carga que se transporta por medio de encuestas, registrando la tara del vehículo para que según su configuración vehicular, se pueda conocer la carga por eje.

Luego en la Tabla 32 se muestran los valores de Equivalent Standard Axle Load Facto (ESALF) de forma similar a lo efectuado con el Factor de vehículo (Fvi).

Tabla 32: Factores de equivalencia de carga USACE

Valores de ESALF para diferentes ejes	
Simples Rueda Simple	$ESALF = (P/6,6)^4$
Simples Rueda Dupla	$ESALF = (P/8,16)^4$
Tándem Doble Rueda Dupla	$ESALF = 2(P/7,55)^4$
Tándem Triple Rueda Dupla	$ESALF = 3(P/7,63)^4$
P = Peso por eje en toneladas	
Peso Total del Conjunto Tándem, dividido por 2 para Tándem	
Doble y por 3 para Tándem Triple	

Fuente: Manual de Estudios de Tráfico de Brasil (2006)

Finalmente se muestra la Tabla 33 que contiene valores de los factores de vehículos, calculados con el valor del peso máximo permitido legalmente en Brasil, sin considerar los márgenes de tolerancia permitidos.

Tabla 33: Resumen de los factores de vehículo (Carga máxima)

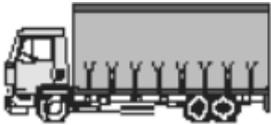
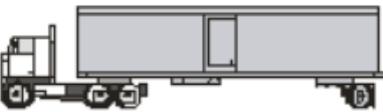
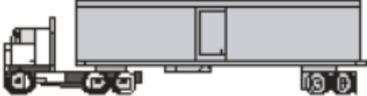
N°	Tipo	Vehículo	Factor Camión
1	2C	Camión mediano	2.938
2	3C	Camión pesado	3.896
3	4C	Camión pesado	5.304
4	2S1	Semirremolque	5.194
5	2S2	Semirremolque	6.152
6	2H3	Semirremolque	7.559
7	3H2	Semirremolque	7.109
8	3H3	Semirremolque	6.456
9	2C2	Remolque	7.449
10	2C3	Remolque	8.407
11	3C2	Remolque	8.407
12	3C3	Remolque	6.340

Fuente: Manual de Estudios de Tráfico de Brasil (2006), p. 259

- Clasificación vehicular de Colombia

La guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras de Colombia (2008), clasifica los vehículos de la siguiente manera:

Tabla 34: Tipos de vehículos de carga comercial

Clase	Esquema	Clase	Esquema
2		2 S3	
3		3 S1	
2 S1		3 S2	
2 S2		2 S3	

Fuente: Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos, Colombia (2008).

Donde calcula el factor de equivalencia de carga por eje simple de un determinado tipo de vehículo sobre un eje simple equivalente cargado con 8.2 tn, según la siguiente formula:

$$FECE = \left(\frac{P_i}{P_r}\right)^n \quad \text{Ecuación 10}$$

Siendo:

- n: coeficiente hallado empíricamente (4)
- Pi: carga del eje de un vehículo determinado
- Pr: carga equivalente de un eje simple 8.2 t

Tabla 35: Carga de referencia adoptadas por INVÍAS para el diseño de pavimentos asfálticos.

Tipo de Eje	Carga de Referencia	
	kN	T
Simple de rueda simple	65	6.6
Simple de rueda doble	80	8.2
Tándem de rueda doble	146	15.0
Triple de rueda doble	225	23.0

Fuente: Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos, Colombia (2008).

Tiene como factores vehiculares de deterioro una mejor manera de relacionar el deterioro en el pavimento por tipo de vehículo, por lo que, la definición de la unidad de medida de Factores de Equivalencia de Carga por Eje (FECE) resulta como equivalencia más específica ya que subdivide los pesos por ejes por tipo de vehículo. Por lo que resulta más conveniente usar el valor de deterioro por cada pasada de un tipo de vehículo específico conocido como factor camión.

Dicha guía recomienda realizar el cálculo de factores de deterioro de manera independiente para cada tipo de vehículo pesado, ya que, los factores de crecimiento anual son distintos según la zona de estudio.

Tabla 36: Factores vehiculares de deterioro promedios según tipo de vehículo

Tipo de Camión	Factor Vehicular de Deterioro (Ejes Simples de 80 kN)				
	MOPT	INVÍAS	INVÍAS	DATOS	DATOS
	1992	1996	2003	PAKISTÁN	USA
2	2.16	3.44	2.15	4.67	0.21
3	4.39	3.76	3.15	8.84	1.59
2 S1	-	3.37	3.13	-	-
3 S1	-	2.22	2.33	-	-
2 S2	-	3.42	2.27	10.35	1.32
3 S2	4.21	4.4	4.21	14.73	1.39
3 S3	4.42	4.72	5.31	10.9	1.39

Fuente: Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos, Colombia (2008).

Es importante la realización del pronóstico del tráfico para que a futuro se pueda utilizar la información con fines de rehabilitación o reconstrucción de las carreteras, así mismo con fines de resumir los valores del factor vehicular según el tipo de vehículo en las carreteras especificadas a continuación:

Tabla 37: Variabilidad de los factores vehiculares de deterioro según tipo de vehículo en distintos tramos de la red vial nacional de Colombia (año 2003)

CARRETERA	ESTACIÓN DE PESAJE	FACTOR VEHICULAR DE DETERIORO SEGÚN CAMIÓN			
		2	3	3S2	3S3
Manizales - Chinchiná	Cenicafé	1.25	2.04	2.75	2.73
Girardot - Bogotá	El Salero	2.49	3.54	4.91	5.42
Buenaventura - Mediacanoa	Mediacanoa	3.98	5.90	7.78	6.93
Promedio nacional	23 estaciones	2.15	3.15	4.21	5.31

Fuente: Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos, Colombia (2008).

Si bien existen valores de factores vehiculares de deterioro promedio, para ambos carriles, muchas veces se da el caso de que uno de los carriles contenga mayor volumen de tráfico por lo que el factor evaluado resulta desbalanceado si se toma el valor promedio solamente, es por eso que se considera necesario la evaluación de estos desbalances.

Tabla 38: Factor Camión en algunas carreteras colombianas por cada dirección

Carretera	Factor Camión	
	Dirección 1	Dirección 2
Bogotá - Tunja	3.39	4.41
Cerritos - Cartago	2.21	3.26
Melgar - Girardot	3.48	4.59
Buga - Buenaventura	5.05	3.17
Bogotá - Honda	2.96	3.74

Fuente: Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos, Colombia (2008).

En la actualidad, los factores camión reportados por INVIAS son utilizados comúnmente en el análisis de cargas de tránsito para el diseño estructural de pavimentos. No obstante, el uso de los factores camión agrupados a nivel nacional reportados en la investigación del Factor Camión en el 2012, “Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana”, debe realizarse con cautela para propósitos de diseño estructural de pavimentos.

Tabla 39: Factor Camión a nivel nacional de Colombia

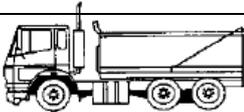
<i>Tipo de camión</i>	<i>FC-1996 (INVIAS)</i>	<i>FC-2003 (INVIAS)</i>	<i>FC-2012</i>
C2	3,44	2,15	2,29
C3	3,76	3,15	3,91
C2-S2	3,42	2,27	2,44
C3-S2	4,4	4,21	3,66
C3-S3	4,72	5,31	4,46

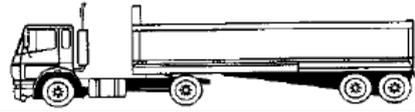
Fuente: “Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana” por Macea, L; Fuentes, L; Alvarez, A.

- Clasificación vehicular del Manual de Austroads

La Guía de Tecnología de Pavimentación - Parte 2: Diseño Estructural de Pavimentos (2017), nos muestra la relación de los vehículos dominantes por cada clase vehicular.

Tabla 40: Vehículos dominantes en cada clase AUSTROADS

Clase 1	Clase 2
Vehículo corto 	Remolque de vehículos cortos 
Clase 3	Clase 4
Camión de 2 ejes 	Camión de 3 ejes 

Clase 5	Clase 6
Camión de 4 ejes 	Vehículos articulados de 3 ejes 
Clase 7	Clase 8
Vehículos articulados de 4 ejes 	Vehículos articulados de 5 ejes 
Clase 9	Clase 10
Vehículos articulados de 6 ejes 	B doble 
Clase 11	Clase 12
Tren de doble remolque 	Tren de triple remolque 

Fuente: Guía de tecnología de pavimentos, parte 2, AUSTRROADS (2017) pp. 97.

Así mismo, la guía de tecnología de pavimentos indica en la siguiente tabla la distribución de la carga de tráfico para vehículos pesados considerando variaciones en el porcentaje de carga transportada.

Tabla 41: Distribución de la carga de tráfico utilizada en el desarrollo de gráficos de diseño de ejemplo

Tipo de Vehículo Pesado	% Estimado Cargado	Peso en grupos de ejes KN (tn)		
		Eje simple con neumáticos individuales	Eje simple con neumáticos Dobles	Eje Tándem con neumáticos dobles
Camión Rígido de 2 ejes <	Completo	52.9 (5.4)	83.3 (8.5)	-
	75	49.0 (5.0)	68.6 (7.0)	-
	50	44.1 (4.5)	53.9 (5.5)	-
	25	39.2 (4.0)	39.3 (4.0)	-
	Vacío	34.3 (3.5)	24.5 (2.5)	-

Camión Rígido de 3 ejes	Completo	52.9 (5.4)	-	147.0 (15.0)
	75	49.0 (5.0)	-	119.1 (12.1)
	50	44.1 (4.5)	-	91.1 (9.3)
	25	39.2 (4.0)	-	62.7 (6.4)
	Vacío	34.3 (3.5)	-	34.3 (3.5)
Camión Articulado de 5 ejes	Completo	39.2 (4.0)	-	147 (15)
	75	39.2 (4.0)	-	120.1 (12.2)
	50	39.2 (4.0)	-	93.1 (9.5)
	25	39.2 (4.0)	-	66.6 (6.8)
	Vacío	39.2 (4.0)	-	39.2 (4.0)
Autobús de 2 ejes	Completo	63.7 (6.5)	83.8 (8.5)	-
	50	51.9 (5.3)	75.5 (7.7)	-
	Vacío	39.2 (4.0)	68.6 (7.0)	-

Fuente: Guía de tecnología de pavimentos, parte 2, AUSTRROADS (2017)

Al tener la Tabla 41 indicando los valores de peso por eje de acuerdo al tipo de vehículo, se hizo uso de la fórmula brindada en el respectivo manual para hallar el valor del factor camión. La tesis “Propuesta de tipo de vehículo característico y su relación con los parámetros de diseño geométrico y de pavimentos en caminos de bajo volumen de tránsito” hace uso de la fórmula para obtener un rango de valores de Factor camión según Austroads, para lo cual sacaremos el promedio de acuerdo a cada tipo de vehículo para el uso de la investigación.

Tabla 42: Rango de valores de Factor camión según Austroads

TIPO DE VEHÍCULO	FACTOR CAMIÓN
Camión rígido de 2 ejes	1.176
Camión rígido de 3 ejes	1.289
Camión articulado de 5 ejes	2.066
Autobús de 2 ejes	1.006

Fuente: “Propuesta de tipo de vehículo característico y su relación con los parámetros de diseño geométrico y de pavimentos en caminos de bajo volumen de tránsito” por Huamán, I; Sunció, C. (p.78).

- Clasificación vehicular de Sudáfrica

Según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, República de Malawi, el Manual de Diseño para Carreteras Selladas de Bajo Volumen utilizando el Método de Diseño DCP (Penetrómetro de cono dinámico), nos dice que todo el tráfico, tanto motorizado como no motorizado, se agrupa en una de las doce categorías que se muestran en la Tabla 43 para el análisis de capacidad posterior para el diseño de sección transversal y revestimiento y el análisis de carga por eje para el diseño de pavimento.

Tabla 43: Clasificación de vehículos para conteos de tráfico

Clasificación de vehículos												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Automóvil	Camioneta	4WD	Minibús	Autobús grande	Autobús mediano	LGV	MGV	HGV	Camión	Motocicleta	Bicicleta	Vehículo animal
Análisis de capacidad				Análisis de carga por eje					Análisis de capacidad			

Fuente: Manual de Diseño para Carreteras Selladas de Bajo Volumen utilizando el Método de Diseño DCP (2013)

Las definiciones de la clasificación de vehículos comerciales serán las de la Tabla 44:

Tabla 44: Clasificación de vehículos comerciales

Bus grande	Capacidad de asientos de 40 o más
Bus mediano	Capacidad de asiento de 28 o más
Vehículo de mercancías ligeras (LGV)	2 ejes incluyendo el eje de dirección
	Menor de 3 tn de peso en vacío
Vehículos de mercancías medianas (MGV)	2 - 5 ejes incluyendo el eje de dirección
	Mayor de 3 tn de peso en vacío
Vehículos de mercancías pesadas (HGV)	6 o más ejes incluyendo el eje de dirección
	Mayor de 3 tn de peso en vacío

Fuente: Manual de Diseño para Carreteras Selladas de Bajo Volumen utilizando el Método de Diseño DCP (2013)

Además, realizó un ejemplo con el volumen de tráfico aleatorio, realizado durante 7 días donde contabilizó cada tipo de vehículo, para de esta manera

calcular el valor de carga equivalente por tipo de vehículo, usando una tasa de crecimiento de 4.5% para cada tipo de vehículo, en un periodo de diseño de 20 años y con un ancho de vía de 5 m, bajo dichas características dio como resultado los siguientes valores:

Tabla 45: Factor equivalente de vehículos (VEF) por tipo de vehículo

Tipo de vehículo	VEF (ESA/vehículo)
Bus grande	1.2
Bus mediano	0.8
Vehículo de mercancías ligeras (LGV)	1
Vehículos de mercancías medianas (MGV)	1.5
Vehículos de mercancías pesadas (HGV)	3.5

Fuente: Manual de Diseño para Carreteras Selladas de Bajo Volumen utilizando el Método de Diseño DCP (2013)

Recalcando la importancia de realizar estudios de pesaje estáticos para registrar las cargas transportadas de los vehículos que transitan por las vías, considerando que no son muchas veces pero que los daños aun así son considerables.

2.3.7 Suelos

Debido a que los pavimentos se emplazan sobre la subrasante de los suelos en donde se trazan las obras viales, es importante identificar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que se encuentren a lo largo del camino identificando mediante la exploración sistemática del suelo natural, para que posteriormente se pueda subdividir en tramos homogéneos considerando los sectores con características internas y externas relativamente similares para el diseño óptimo del pavimento flexible.

- Exploración de suelos y rocas

Es necesario desarrollar un programa estratégico para la exploración y extracción de muestras representativas y en cantidades suficientes de suelo según la normativa vigente del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, tal como, las normas MTC E101, MTC E102, MTC E103, MTC E 104.

Inicialmente mediante el reconocimiento del terreno por donde se realizará el trazo del camino con el objetivo de caracterizar e identificar los distintos tipos de suelos, tramos de corte y relleno, zonas de riesgo, etc.

- Caracterización de la sub rasante

Para la determinación de las características físico mecánicas de los materiales que conforman la sub rasante del camino se realizarán trabajos de excavación de pozos o calicatas para investigar los tipos de suelos presentes mediante la exploración y extracción de muestras a una profundidad mínima de 1.50 m.

Estas excavaciones se harán de manera longitudinal al eje del camino y de manera alternada, además de mantener equidistancia entre si preferentemente con una cantidad mínima de excavaciones por kilómetro, en casos especiales y donde lo requiera se realizarán mayor número de exploraciones para garantizar la correcta caracterización de los materiales que conformaran la sub rasante del camino.

En la Tabla 46 se muestra el número mínimo de calicatas por kilómetro:

Tabla 46: Número de calicatas para exploración de Suelos

Tipo de Carretera	Profundidad (m)	Número mínimo de Calicatas	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	• Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
		• Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido	
		• Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido	
Autopistas: carreteras de IMDA entre 6000 y 4000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	• Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
		• Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido	
		• Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido	

Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50 m respecto al nivel de subrasante del proyecto	• 4 calicatas x km	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50 m respecto al nivel de subrasante del proyecto	• 3 calicatas x km	
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50 m respecto al nivel de subrasante del proyecto	• 2 calicatas x km	
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un $IMDA \leq 200$ veh/día, de una calzada.	1.50 m respecto al nivel de subrasante del proyecto	• 1 calicatas x km	

Fuente: Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014).

De las indicaciones del cuadro anterior respecto a la cantidad de calicatas por kilómetro, es aplicable a proyectos de pavimentación nueva, mejoramiento y reconstrucción.

Así mismo, para el caso de cambios pronunciados en la topografía a lo largo del eje de la vía, o perfil de corte del terraplén de la calzada, e incluso, en variaciones evidentes de las características de los suelos se deberán incluir más calicatas para la confirmación de dichos cambios en los aspectos mencionados. Se deberá comprobar la presencia o no de suelos expansivos, orgánicos, rellenos sanitarios, o nivel freático en cuyo caso, se realizarán calicatas con mayor profundidad, de tal manera que se pueda establecer el método de estabilización más adecuada para la subrasante, y en caso se requieran estudios geotécnicos de estabilidad y asentamientos, lo cual, el ingeniero responsable determinará dichas soluciones para garantizar que las características físico mecánicas son las

adecuadas en cuestiones de resistencia, permeabilidad, y durabilidad. Para el caso de terraplenes de más de 5 m de altura se aplicarán dichas consideraciones, válidas para el sector en estudio según las características representativas obtenidas.

En caso se encuentre macizo rocoso dentro de la profundidad de exploración se procederá a aplicar lo establecido en la norma MTC E 101.

- Registros de excavación

En base a la exploración realizada mediante calicatas, se obtendrán muestras representativas las cuales serán identificadas y descritas por medio de una tarjeta que cuente con información sobre la ubicación en el sistema de coordenadas UTM WGS 84, numeración de la muestra, profundidad de excavación para posteriormente almacenarlas en bolsas lo suficientemente resistentes, tal como, polietileno para ser trasladadas al laboratorio de ensayos. La información complementaria consta del espesor de cada capa de los estratos del subsuelo encontrados en las excavaciones de exploración, así como su gradación y estado de compactación natural. Para el caso de la sub rasante se realizarán ensayos específicos determinantes que influirán en el diseño del pavimento, tal y como son los ensayos para hallar el Módulo resiliente (M_R) de los suelos en estudio, o ensayos de California Bering Ratio (CBR), siendo estos últimos correlacionables.

En la Tabla 47 se muestra la cantidad recomendable de ensayos según el tipo de carretera:

Tabla 47: Número de Ensayos MR y CBR

Tipo de Carretera	N° M_R y CBR
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	• Calzada 2 carriles por sentido: 1 M_R cada 3 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido
	• Calzada 3 carriles por sentido: 1 M_R cada 2 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido
	• Calzada 4 carriles por sentido: 1 M_R cada 1 km y 1 CBR cada 1 km x sentido

Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	• Calzada 2 carriles por sentido: 1 M _R cada 3 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido
	• Calzada 3 carriles por sentido: 1 M _R cada 2 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido
	• Calzada 4 carriles por sentido: 1 M _R cada 1 km y 1 CBR cada 1 km x sentido
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000 - 2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	• 1 M _R cada 3 km y 1 CBR cada 1 km
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000 - 401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	• Cada 1.5 km se realizará un CBR
	• (*)
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400 - 201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	• Cada 2 km se realizará un CBR
	• (*)
Carreteras con IMDA ≤ 200 veh/día, de una calzada.	• Cada 3 km se realizará un CBR

Fuente: Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014).

- Sectorización

Se realizará la sectorización de tramos homogéneos a los suelos de fundación que presenten características físico-mecánicas similares, además de otros aspectos externos, como el clima, el tráfico y la capacidad de drenaje de la subrasante, todo ello quedará a criterio del Ingeniero responsable.

Basándose en un programa de exploración estratégica, se realizarán los ensayos y prospecciones necesarias para la determinación de las características físico mecánicas de los suelos explorados, de tal manera que se pueda definir la sectorización de los tramos con características homogéneas.

a) Tramos de diseño

J. Menéndez (2012) en su libro Ingeniería de Pavimentos: Materiales diseño y conservación”, indicó que el sector homogéneo para el diseño de un pavimento puede ser determinado mediante distintos criterios, para el caso de tramos cortos los resultados del laboratorio y de exploraciones visuales de las prospecciones observadas serían suficientes para tener en cuenta la sectorización para el diseño vial, por otro lado, en el caso de contar con tramos mas largos involucrará el uso de métodos estadísticos que respalden los resultados del análisis para la determinación de los tramos de diseño.

En la guía de diseño de pavimentos AASHTO 93, apéndice J, se desarrolló el Método de las Diferencias acumuladas, el cual, permite delimitar los tramos homogéneos de manera estadística en base a la información resultante de la medición, en su desarrollo grafico se marcan los cambios de pendiente del valor de la variable Zx como delimitación de tramos homogéneos, y es calculada como se muestra a continuación:

$$Z_x = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{L_p} \times \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ecuación 11}$$

$$a_i = \frac{(r_{i-1} + r_i) \times x_i}{2} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- Zx es la diferencia acumulada
- ri es el parámetro analizado (CBR o Módulo de resiliencia)
- xi es la distancia parcial entre puntos de exploración
- Lp es la distancia total del tramo analizado $L_p = \sum_{i=1}^n x_i$

Para determinar el CBR final de diseño se aplica la siguiente formula:

$$CBR_{final\ de\ diseño} = \frac{(M_r\ compuesto D_1^3 + M_r\ relleno D_2^3)}{(D_1^3 + D_2^3)} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$M_r = 2550\ CBR^{0.64}\ (psi) \quad \text{Ecuación 14}$$

- Mr es el módulo resiliente
- D1 es la profundidad de influencia menos la altura de relleno

- D_2 es la altura de relleno

Siendo la información requerida:

- Progresivas de la vía
- Altura de corte y de relleno
- CBR compuesto
- CBR de relleno
- CBR final de diseño

En lo que cada variación de la pendiente representará un tramo distinto, aun así se resalta el hecho de aplicar otros criterios para complementar este método con el fin de definir adecuadamente los tramos de diseño, tales como la distancia mínima

Así mismo, cabe resaltar que el método AASHTO asume como valor de CBR del tramo como el valor promedio, a diferencia del Instituto del Asfalto que asume el valor del percentil 87.5 % para volúmenes de tráfico de 2×10^6 ESAL.

2.4 Definición de términos básicos

- Método AASHTO 93: Según el Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos del Ministerio de Transporte, este método desarrollado en función a las cargas de tráfico, al comportamiento del pavimento y características de la subrasante, nos permite obtener un espesor de pavimento que trabaje con una aceptable serviciabilidad. Calculando el número estructural del pavimento, se puede determinar el espesor de cada capa del pavimento mediante un proceso iterativo.
- Método Shell: De acuerdo a Montejo Fonseca, este método plantea a la estructura del pavimento como un sistema multicapa linealmente elástico. Mediante la elección de una combinación de espesores y características de las capas del pavimento, se determinará una combinación de espesores capaz de satisfacer los límites de esfuerzos y deformaciones durante el periodo de diseño del pavimento.
- Tráfico: La Guía AASHTO para Diseño de Estructuras de Pavimentos define al tráfico como un parámetro para el diseño del pavimento, el cual incluye las cargas por eje, configuración de ejes y número de aplicaciones.

- Módulo de resiliencia: Según Guía AASHTO para Diseño de Estructuras de Pavimentos el módulo de resiliencia es la propiedad definitiva para caracterizar al suelo de fundación del pavimento.
- Confiabilidad: De acuerdo a la Guía AASHTO para Diseño de Estructuras de Pavimentos la confiabilidad es la probabilidad que una carretera mantenga los niveles adecuados de serviciabilidad bajo las aplicaciones de carga.
- Desviación estándar normal: El Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos define al coeficiente estadístico de desviación estándar normal como el valor de la confiabilidad para volumen de tráfico establecido.
- Desviación estándar combinada: Según el Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos la desviación estándar combinada es un valor proveniente del error en la predicción del tráfico y el comportamiento del pavimento.
- Índice de serviciabilidad: El Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos define al índice de serviciabilidad como la medida de capacidad para servir a un tipo de tráfico.
- Medio ambiente: La Guía AASHTO para Diseño de Estructuras de Pavimentos establece dos factores primordiales que definen al medio ambiente, las lluvias y la temperatura. La temperatura afecta al comportamiento de la capa asfáltica debido a la susceptibilidad térmica; mientras que las lluvias afectan a la capacidad de drenaje, el cual puede generar cambios en las propiedades físicas en las capas granulares del pavimento.
- Propiedades de la subrasante, subbase y base: Para Montejo Fonseca, la propiedad elemental para conocer a las capas del pavimento es el módulo de resiliencia (M_r).
- Características de la mezcla asfáltica: Montejo Fonseca considera al *Stiffness* y la fatiga como las características principales para determinar el tipo de mezcla asfáltica.

2.5 Marco Normativo

2.5.1 Manual de Ensayo de Materiales – MTC

El Manual de Ensayo de Materiales – MTC (EM 2013), indica la importancia para la aplicación de métodos adecuados con instrumentación recomendada que garanticen el correcto desarrollo de la extracción de muestras para la

identificación del material extraído, siendo las normas que se mencionan a continuación:

- MTC E 101 Muestreo de suelos y rocas

Con el objetivo de investigar las condiciones de los suelos y rocas, es que se realizan procedimientos normativos de exploración, donde por medio de excavaciones y sustracción de muestras son evaluadas en el laboratorio; con la finalidad, de que se establezcan procedimientos que permitan correlacionar los datos obtenidos con las propiedades del suelo y de la roca.

a) Equipos Materiales e insumos

El equipo necesario para que se logre obtener la información requerida de manera confiable, dependerá de distintos aspectos, tales como la profundidad de exploración, el tipo de material encontrado debajo de la sub rasante, y los fines para los que se requieran, siendo estos equipos los siguientes:

- Barrenos manuales, excavadoras y palas para depósitos cercanos a la superficie para profundidades de 1 a 5 m.
- Equipos de percusión y lavado.
- Barrenos y taladros rotatorios motorizados, con formas adecuadas, muestreadores y tubos saca núcleos para investigación de los suelos y rocas.
- Equipos geofísicos para investigación sub superficial, tales como:
 - Instrumentos sísmicos, con recepción mediante geófonos simple o múltiple, en base a ondas originadas por golpes de un martillo contra una placa metálica, u otras fuentes de energía.
 - Aparatos para medir la resistividad, resistencia de suelos y rocas al transmitirles corriente continua o alterna.
 - Aparatos nucleares, para medir la humedad y peso unitario de suelos y rocas.
 - Muestreos de turba, para identificar las zonas que contengan material orgánico.
- Frascos de cierre hermético, para almacenar unidades de muestras con una capacidad de 4 a 8 onzas. Además de recipientes o bolsas de tejido cerrado

con capacidad de 16 kg, y cajas apropiadas para almacenar las muestras de núcleos de rocas.

- Accesorios complementarios tales como; Brújula, inclinómetro, nivel de mano, cámara fotográfica, estacas y cinta métrica.

b) Reactivos

- Ácido clorhídrico normal con disolución mediante gotero, para la identificación de carbonatos minerales contenidos en rocas y suelos.

- Muestra

De la exploración se ubican los puntos de excavación más característicos para la extracción de muestras en cantidades suficientes, de manera representativa. Esto podrá variar según el criterio del responsable de la investigación y dependerá del tipo de ensayo que se realizará según la finalidad del proyecto. Siendo estos los siguientes valores:

- Clasificación visual: 0,50 kg – 50 – 500 g.
- Análisis granulométrico y constantes suelos no granulares: 0,50 a 2,5 kg.
- Ensayo de compactación y granulometría de suelo-agregado granular: 20 – 40 kg.
- Ensayo de propiedades de agregados para su producción: 50 – 200 kg.

Las muestras extraídas deben almacenarse correctamente e identificarse básicamente con el nombre de la calicata o pozo de extracción, y con la profundidad a la que fue extraída, además de ello, para las muestras con fines de estudiar su contenido de humedad es necesario almacenarlas en recipientes herméticos de tal manera que mantengan sus características naturales.

Un estudio adicional es el de la evaluación del contenido de metales pesados, pH y acidez en el suelo y el agua de lugar o adyacentes a él, los cuales se consideren agentes contaminantes perjudiciales para el medio ambiente.

Clasificación del Material

Es necesario la realización de los siguientes ensayos en laboratorio:

- Análisis granulométrico por tamizado MTC E 107.
- Análisis granulométrico por hidrómetro MTC E 109

- Humedad natural MTC E 108.
- Determinación del límite líquido MTC E 110
- Determinación del límite plástico MTC E 111
- Determinación del límite de contracción, en presencia de alta cantidad de finos MTC E 112
- Gravedad específica de los suelos MTC E 113.

Para el caso de la construcción de terraplenes, se consideran los siguientes ensayos:

- Los mencionados en la lista anterior.
- Relación humedad-densidad compactada a la energía Proctor Modificado MTC E 115.
- CBR de materiales compactados MTC E 132.
- Módulo Resiliente sobre muestras compactadas a la energía Proctor Modificado MTC E 128.
- Compresión triaxial no consolidadas, no drenada (cu) y consolidada no drenada con medida de presión de poros MTC E131, para materiales compactados a la energía Proctor Modificado, que se van a utilizar en terraplenes mayores de 7,00 m de altura.
- Consolidación unidimensional para materiales compactados para las mismas condiciones del ensayo anterior.

Para el caso de diseño de sub rasantes, consta la realización de los siguientes ensayos:

- Los mencionados en la primera lista.
- Relación humedad-densidad compactada a la energía Proctor Modificado MTC E 115.
- CBR de materiales compactados MTC E 132.
- Módulo Resiliente sobre muestras inalteradas MTC E 128.

Para este último ensayo, no será necesario realizarlo si ya se ejecutó en campo, para lo cual, las partículas del terreno no deben exceder el tamaño de $\frac{3}{4}$ " o 19.1 mm.

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

Validando el método de diseño empírico mecanicista AASHTO 93 con el método mecanicista SHELL se determina la estructura del pavimento de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima

3.1.2 Hipótesis secundarias

- a) Revisando las consideraciones del estudio de tráfico se determina la estructura del pavimento en los modelos empírico mecanicista AASHTO 93 y mecanicista SHELL de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima.
- b) Revisando las consideraciones del estudio de suelos se determina la estructura del pavimento en los modelos empírico mecanicista AASHTO 93 y mecanicista SHELL de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima.
- c) Aplicando el método empírico mecanicista AASHTO 93 y el método mecanicista SHELL se valida la estructura del pavimento en la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima.

3.2 Variables

3.2.1 Definición conceptual de variables

La variable independiente es los métodos de diseño de pavimentos flexibles, los cuales determinan, a través de los parámetros de diseño, los espesores de las capas estructurales del pavimento. Teniendo como objetivo establecer las variables que determinen la estructura del pavimento.

La variable dependiente es la estructura del pavimento, donde se desea optimizar el diseño de pavimento obteniendo espesores de las capas estructurales adecuadas para el correcto funcionamiento de la vía.

3.2.2 Operacionalización de variables

Respecto a la definición de las variables, la variable independiente es **los** métodos de diseño, es de tipo aplicada por lo que los parámetros de diseño

aplicados tienen una relación y se complementan; la variable dependiente es la estructura del pavimento, es de tipo aplicada por lo que los métodos de diseño de pavimento empleado determinarán los espesores de las capas estructurales del pavimento.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y nivel

El tipo de la presente investigación es descriptivo, ya que se busca desarrollar una descripción de la situación actual de la vía Pasamayito a partir de sus estudios.

El método es deductivo, iniciamos desde lo más general, analizando manuales nacionales e internacionales, en conjunto con el expediente técnico en estudio, los cuales son nuestros modelos de comparación, de esta manera llega a una conclusión específica.

El enfoque de la investigación es aplicado, ya que nos concentramos estrictamente en el objetivo general y en los objetivos específicos utilizando conocimientos de diseño de pavimentos flexibles y el uso de un software.

4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental, ya que no podemos manipular la variable independiente. Retrospectiva, ya que contamos con información previamente desarrollada.

El método desarrollado en la presente investigación es inductivo, ya que se utiliza los resultados hallados para contrastar la hipótesis y para dar las conclusiones de la investigación.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población de estudio

Como población se tiene el expediente técnico de la vía denominada “Pasamayito”, manuales, papers que contengan metodologías mecanicistas para pavimentos flexibles.

4.3.2 Diseño muestral

El diseño muestral es la vía Pasamayito desde Comas con un inicio del km 00+000.000 hasta el km 8+447.000 en San Juan de Lurigancho, que contiene información recopilada de estudios de suelos, tráfico, entre otros, para su análisis.

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se utilizó la técnica de la observación indirecta para obtener la información de los parámetros climatológicos de la zona, esto se dio con la fuente del SENAMHI lo cual es una entidad certificada.

Otra técnica presente para la recolección de los datos técnicos de los métodos empírico mecanicista AASHTO 93 y mecanicista SHELL fue la observación no participante, donde se utilizó información bibliográfica donde se aplica estas metodologías.

4.4.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

Se realizó un estudio de suelos y canteras, conforme muestra el expediente técnico, por lo que existe una certificación por parte de los laboratorios acreditados donde se llevó a cabo los ensayos correspondientes bajo las especificaciones técnicas pertinentes.

Con respecto al estudio de tráfico, se realizó los conteos de tráfico y clasificación vehicular en las estaciones establecidas por el especialista.

Para el estudio climatológico de la zona se obtuvo información de las instituciones acreditadas del estado.

4.4.3 Procedimientos para la recolección de datos

El procedimiento a realizar es el siguiente:

- a) Investigación de material bibliográfico de las metodologías a analizar y recopilar información para el desarrollo de la presente investigación.
- b) Recolección de datos de los parámetros climatológicos del SENAMHI, para su respectivo proceso como indican los métodos empírico mecanicista AASHTO 93 y mecanicista SHELL.
- c) Aplicación de los parámetros de cada metodología de diseño a emplear para obtener resultados de las capas estructurales y dar las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

4.5 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información

En las técnicas de procesamiento y análisis de la información de la investigación se basa en fórmulas matemáticas descritas por el método mecanicista SHELL, entre estas fórmulas, algunas se hallan mediante gráficos y tablas debido a su complejidad.

Para desarrollar el método SHELL nos referenciamos en el Libro Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, estudios básicos y diseño, el cual se basa en el Shell Pavement Design Manual.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Descripción del Proyecto

5.1.1 Ubicación y acceso

La vía denominada Pasamayito comprendida en la av. Revolución y la av. Miguel Grau, en los distritos de Comas y San Juan de Lurigancho, respectivamente, tiene una longitud aproximada de 8 km.

Se ha colocado dos zonas de acceso a la zona de estudio, nuestro punto de referencia es la Municipalidad Metropolitana de Lima y la Plaza de Armas de Lima.

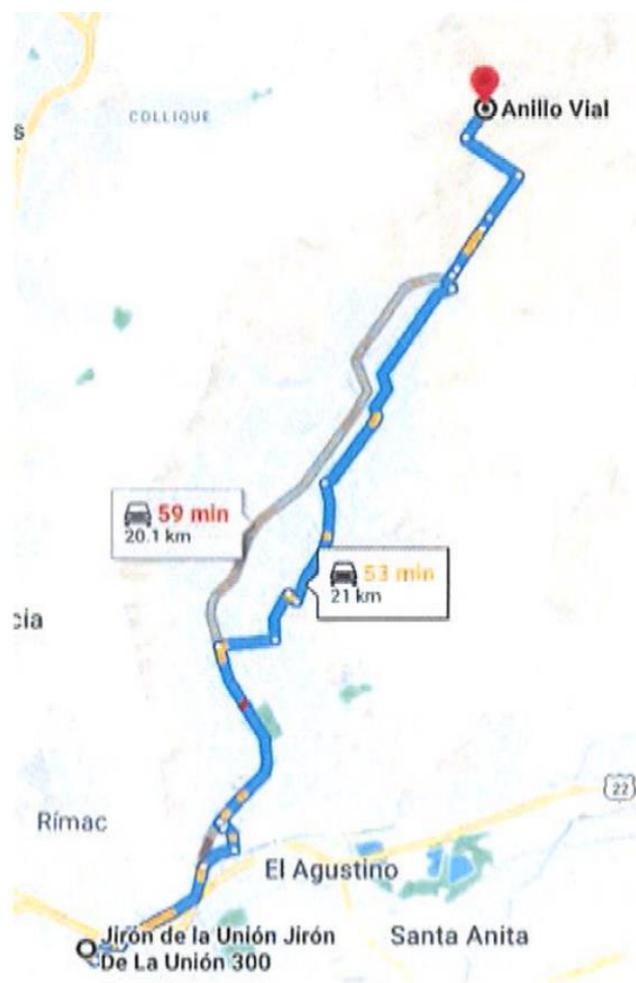


Figura 11: Acceso por carretera - Acceso Lima-San Juan de Lurigancho

Fuente: Google Maps



Figura 12: Acceso por carretera - Acceso Lima-Comas

Fuente: Google Maps

5.1.2 Pavimentos

La zona de estudio presenta una trocha con tramos afirmados con material granular, esta trocha está lejos de la zona urbana, y asfalto en mal estado y afirmado en algunos tramos cerca de la zona urbana; también presenta la vía anchos variables de aproximadamente 16.00m al inicio, 6.00m en el tramo intermedio y 8.00m en zonas curvas. Esta vía se sitúa en un terreno accidentado, comprendido en varios tramos por gravas limosas, arenas y roca fracturada, sin drenaje superficial.

En resumen, el pavimento de la vía Pasamayito se encuentra en mal estado, esto hace que se vea afectado el flujo de la transitabilidad afectando a la población.



Figura 13: Vista panorámica de la vía Pasamayito en la actualidad.

Fuente: Diario “El Comercio” (2021), foto: Municipalidad de Lima.

5.1.3 Diseño geométrico

Para el diseño geométrico de la vía, se ha realizado un análisis para determinar, en primera instancia, el tipo de vía de la zona de estudio, con ello se buscó definir las normas que se emplearon para el análisis de los parámetros geométricos de la vía.

La zona de estudio presenta una zona escarpada en su totalidad con pendiente transversal al eje de la vía superior a 100%, al ser aplicado con la norma DG-2014 sección 102 se obtiene una clasificación por su orografía, es de “Tipo 4”.

Tabla 48: Clasificación por su Orografía

Clasificación	
Por su Función	Vía Colectora del SMV-Lima
Por su Demanda	Primera Clase
Por su Orografía	Tipo 4

Fuente: Tec-Cuatro S.A.

Por consiguiente, la vía Pasamayito al presentar un firme componente urbanístico y de unión de la movilidad para ambos distritos, será diseñada bajo parámetros de vía urbana.

En conjunto con el estudio de tráfico y los términos de referencia se ha considerado como Vehículo de Diseño el B2.

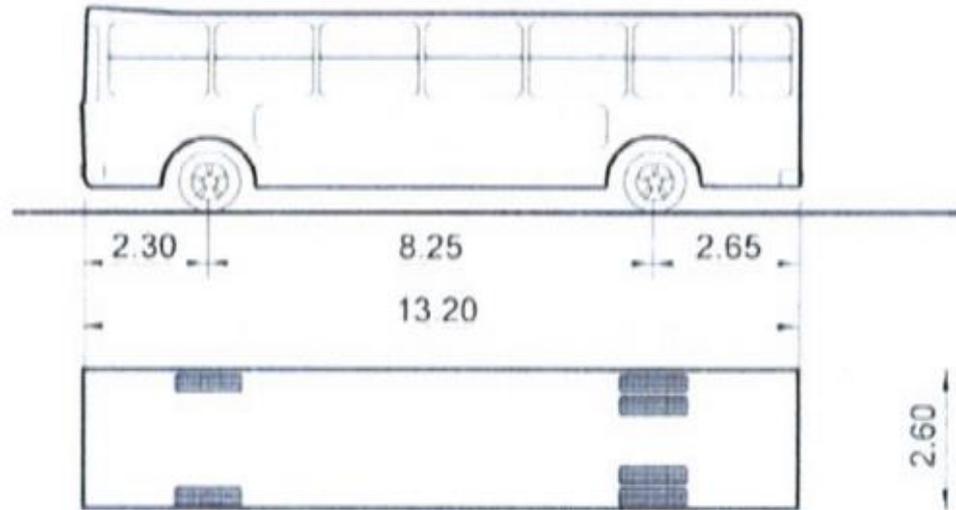


Figura 14: Tipo de vehículo de diseño "B2"

Fuente: Tec-Cuatro S.A. – Sucursal Perú

Al tratarse de una vía urbana, el Manual de Diseño Geométrico de Vías Urbanas (MDGVU) dispone que las velocidades deben estar comprendidas entre los 30 y 100 km/h. Queriéndose usar características de Carretera de Primera Clase, sin olvidar la vía urbana, la velocidad de diseño será 50 km/h, logrando reducir en tramos necesarios a 30 km/h por presentar radios de giro mínimos o algún parámetro que lo requiera.

Tabla 49: Características geométricas de la vía

DESCRIPCIÓN	VÍA PASAMAYITO
Longitud en Km.	8.43
Velocidad directriz en Km/H.	30-50km/h
Plataforma Total en m.	10.60m
Ancho de calzada en m.	6.60m
Berma en m.	0.50m lado izquierdo 0.50m lado derecho
Sobreanchos	Según Norma
S.A.C. en m.	No Aplica
Bombeo en %	2.00%
Peralte máximo permitido %	4.00-8.00%
Longitud de Transición en m.	Según Norma
Radio mínimo	35m
Radio mínimo Excepcional	22m
Radio mínimo en curva de volteo	20.00m
Curvas de Transición	Clotoide – En caso necesario
Pendiente mínima %	0.50
Pendiente máxima en %	Según Topografía
Curva Vertical, K min.	Según Velocidad de Diseño
Cunetas	Berma Cuneta de Diseño
Tipo de superficie en la calzada	Asfaltado
Tipo de superficie en Bermas	Asfaltado
Talud de relleno	Según Geotecnia
Talud de Corte	Según Geotecnia

Fuente: Tec-Cuatro S.A. – Sucursal Perú

5.1.4 Diseño de pavimentos

La vía Pasamayito presentará una estructura de pavimento basado en las metodologías del Manual de Carreteras, Capítulo “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” del MTC. Esta vía se sitúa en un terreno accidentado, sus tramos están compuestos por gravas limosas, arenas y roca fracturada.

La zona de estudio presenta una trocha con tramos afirmados con material granular, esta trocha está lejos de la zona urbana, y asfalto en mal estado y

afirmado en algunos tramos cerca de la zona urbana; también presenta la vía anchos variables de aproximadamente 16.00m al inicio, 6.00m en el tramo intermedio y 8.00m en zonas curvas.

Se determinaron 4 sectores a partir de la información de tipo de suelo, CBR y tráfico, sectorizando por los resultados de CBR. Presenta tipos de suelo A-1-a y A-2-4, indicando que es un material granular bueno. También, de los resultados ESAL, se eligieron los de mayor resultado para cada sector.

Tabla 50: Sectores definitivos

Sector	Progresiva	CBR (95%)	ESAL
1	0+000 – 1+270	14.0	1.53E+07
2	1+270 – 4+600	29.0	1.53E+07
3	4+600 – 5+500	14.0	1.53E+07
4	5+500 – 8+447	14.4	2.01E+07

Fuente: Tec-Cuatro S.A. – Sucursal Perú

A través de la metodología AASHTO 93, se halló los espesores del pavimento, optándose por la uniformidad a un espesor cumpliendo las condiciones actuales de la vía.

El cálculo realizado de los espesores del pavimento, se hizo para una proyección de 20 años de ejes equivalentes, como se muestra en la Tabla 51:

Tabla 51: Espesores calculado para una proyección de 20 años

Sector	Progresivas	CBR (95%)	Tráfico	AASHTO 93 Espesores adoptados (cm)		
				Carpeta asfáltica	Base Granular	Sub base granular
1	0+000 – 1+270	14.0	1.53E+07	10	20	45
2	1+270 – 4+600	29.0	1.53E+07	10	20	30
3	4+600 – 5+500	14.0	1.53E+07	10	20	45
4	5+500 – 8+447	14.4	2.01E+07	10	20	45

Fuente: Tec-Cuatro S.A. – Sucursal Perú

Esta estructura de pavimento diseñada cumple las condiciones de Números Estructurales en cada sector como se muestra en la Tabla 52:

Tabla 52: Cumplimiento del diseño respecto del Número Estructural

Sector	SN prop	SN req
1	5.215	5.017
2	4.439	4.191
3	5.215	5.017
4	5.215	5.199

Fuente: Tec-Cuatro S.A. – Sucursal Perú

Para finalizar el diseño de pavimento se optó por uniformizar la carpeta asfáltica, determinando un espesor de 10 cm, cumpliendo con el espesor mínimo requerido en los términos de referencia.

5.2 Resultados del estudio de tráfico

5.2.1 Clasificación vehicular

Los términos característicos para la clasificación vehicular varían de acuerdo a cada manual, como se muestra en la Tabla 53, algunos manuales usan terminologías con letras y números, incluyendo el expediente técnico para el estudio. Hay una gran variedad de tipos de vehículos en cada manual, por lo que para fines didácticos y de una manera más ordenada se está colocando tres tipos de vehículos por su similitud, estos son: bus de 2 ejes, camión de 2 ejes y camión de 3 ejes.

Tabla 53: Comparación de estudio de clasificación vehicular

	Bus de 2 ejes	Camión de 2 ejes	Camión de 3 ejes
Manual de Carreteras, Sección Suelos y Pavimentos (2014)	-	C2	C3
Reglamento Nacional de Vehículos del MTC (2003)	B2	C2	C3
Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG - 2018	B2	C2	C3
Manual para el diseño de carreteras pavimentados de bajo volumen de tránsito (2008)	Bus (de 2 o 3 ejes)	Camión (2 ejes)	Camión pesado (3 ejes)
Manual de Estudios de Tráfico de Brasil	2B	2C	3C
Manual de Colombia	Bus grande	C2	C3

AASHTO 93	Autobús	Camiones de 2 ejes y 6 ruedas	Camiones de 3 ejes o más
Manual de Austroads	Autobús de 2 ejes	Camión Rígido de 2 ejes	Camión Rígido de 3 ejes
Manual de South Africa	Bus de 2 ejes	Camión de 2 ejes	Camión de 3 ejes
Mejoramiento de la infraestructura vial de la prolongación Av. Revolución (Pasamayito) tramo Ca. Julio César Tello - Av. Miguel Grau en los distritos de Comas y San Juan de Lurigancho de la provincia de Lima - Departamento de Lima			
	B2	C2E	C3E

Fuente: Elaboración propia

Se generó una clasificación única para estos tipos de vehículos que se muestran en la tabla anterior para usar términos únicos en cada análisis.

Tabla 54: Clasificación vehicular

Tipos de vehículo	Término
Bus 2 ejes	B2
Camión de 2 ejes	C2
Camión de 3 ejes	C3

Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Factor Camión

De acuerdo con los manuales nacionales e internacionales y agregando los valores del expediente técnico en estudio, nos da una amplia visión del valor Factor camión usados en distintos países y en el nuestro, según el tipo de vehículo. Por ello se ha realizado unos gráficos para observar la diferencia de las consideraciones usadas en cada manual respecto al expediente.

Tabla 55: Comparación del valor factor camión

	B2	C2	C3
Manual para el diseño de carreteras pavimentados de bajo volumen de tránsito (2008)	1.850	2.75	2.000
Manual de Estudios de Tráfico de Brasil	2.938	2.938	3.896
Manual de Colombia	1.000	2.290	3.910
AASHTO 93	3.477	3.477	2.526
Manual de Austroads	1.006	1.176	1.289
Manual de South África	0.800	1.000	1.500
Mejoramiento de la infraestructura vial de la prolongación Av. Revolución (Pasamayito) tramo Ca. Julio César Tello - Av. Miguel Grau en los distritos de Comas y San Juan de Lurigancho de la provincia de Lima - Departamento de Lima	6.125	6.125	4.467

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 55 podemos apreciar los valores de Factor camión de los manuales nacionales, internaciones y el expediente técnico en estudio.

La Figura 15 muestra los resultados de Factor camión de cada tipo de vehículo con su respectivo manual, observando la diferencia de magnitudes que se usa para los diseños de pavimento flexible.

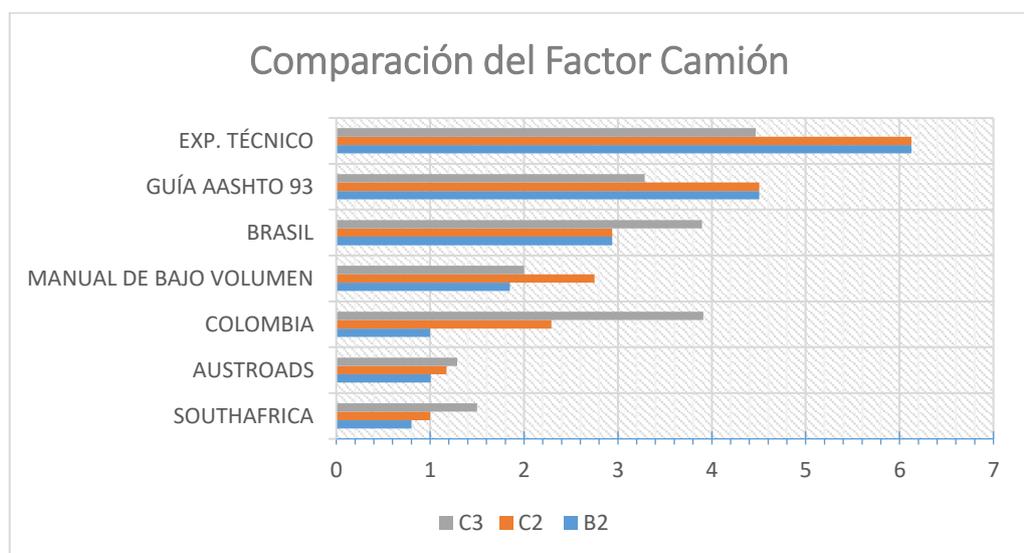


Figura 15: Comparación de Factor camión

Fuente: Elaboración propia

De la figura mostrada se realizó nuevas figuras para obtener una mejor visualización respecto a las variaciones que hay en los valores de Factor camión en cada tipo de vehículo.

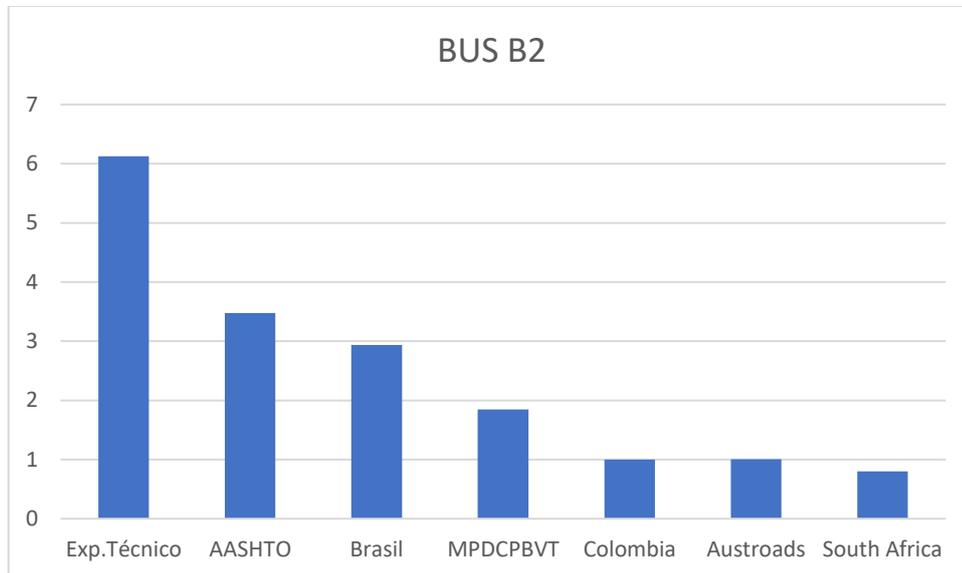


Figura 16: Comparación de Factor camión para vehículo B2

Fuente: Elaboración propia

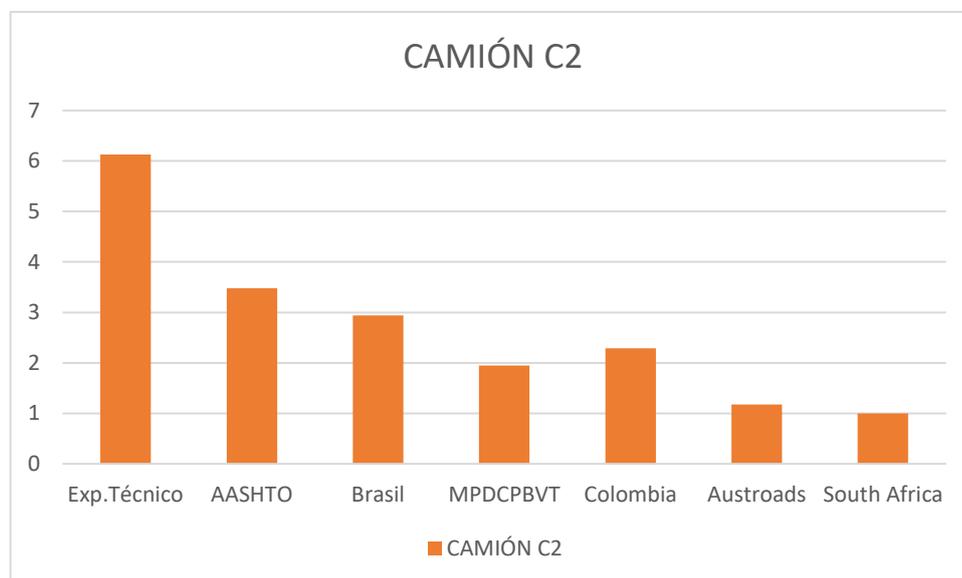


Figura 17: Comparación de Factor camión para vehículo C2

Fuente: Elaboración propia

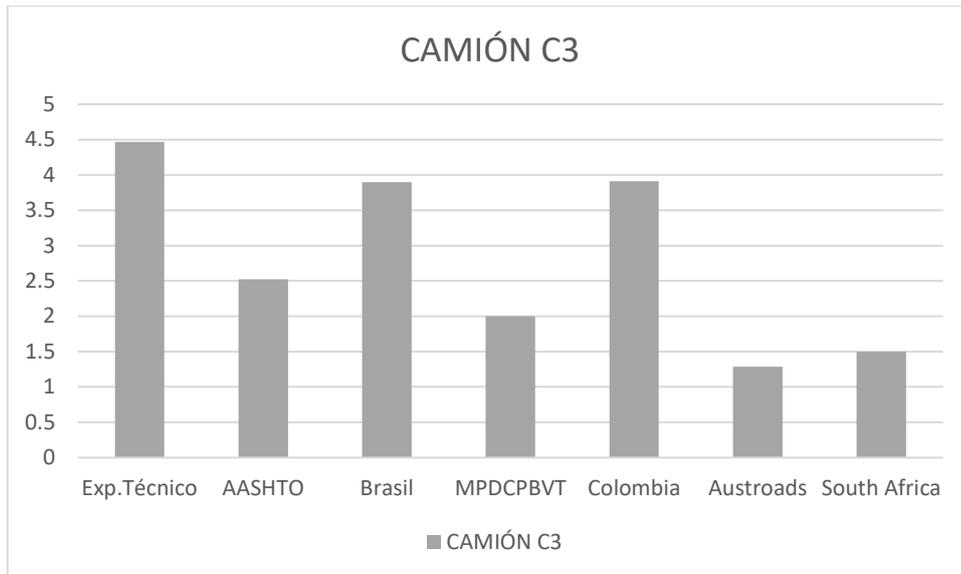


Figura 18: Comparación de Factor camión para vehículo C3

Fuente: Elaboración propia

De las figuras mostradas se puede observar la gran diferencia que hay del expediente técnico respecto a los manuales, tanto para nacionales e internacionales, sobre todo para el tipo de vehículo B2 y C2.

Por consiguiente, es necesario obtener el cálculo de EAL, para ello se realizó un cuadro de diseño con proyección de 20 años, donde se tomó los datos del expediente técnico en estudio y su tasa de crecimiento para vehículos ligeros de 1.17% y para vehículos pesados es 3.18%, el factor carril es igual a 1 y el factor dirección es 0.5; además se procedió a tomar el valor de factor camión de acuerdo a cada manual en mención.

Tabla 56: Cálculo de EAL según Expediente Técnico

Tipo de vehículo	Factor Camión	r	IMD	1	5	10	20
			2019	2022	2026	2031	2041
B2	6.125	0.012	2	3.35E+03	3.51E+03	3.72E+03	4.17E+03
C2	6.125	0.032	500	7.30E+05	8.27E+05	9.67E+05	1.32E+06
C3	4.467	0.032	1	9.39E+02	1.06E+03	1.24E+03	1.70E+03
TOTAL DE EJES EQUIVALENTES				7.34E+05	8.32E+05	9.72E+05	2.01E+07

Fuente: Elaboración propia

Tabla 57: Cálculo de EAL según Manual de AASHTO

Tipo de vehículo	Factor Camión	r	IMD	1	5	10	20
				2019	2022	2026	2031
B2	3.477	0.012	2	1.57E+03	1.65E+03	1.75E+03	1.96E+03
C2	3.477	0.032	500	4.14E+05	4.70E+05	5.49E+05	7.51E+05
C3	2.526	0.032	1	6.04E+02	6.85E+02	8.01E+02	1.10E+03
TOTAL DE EJES EQUIVALENTES				4.17E+05	2.22E+06	4.81E+06	1.14E+07

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58: Cálculo de EAL según Manual Pavimentado de Bajo volumen de Tránsito

Tipo de vehículo	Factor Camión	r	IMD	1	5	10	20
				2019	2022	2026	2031
B2	1.850	0.012	2	8.37E+02	8.77E+02	9.29E+02	1.04E+03
C2	2.750	0.032	500	3.28E+05	3.71E+05	4.34E+05	5.94E+05
C3	2.000	0.032	1	4.79E+02	5.42E+02	6.34E+02	8.67E+02
TOTAL DE EJES EQUIVALENTES				3.29E+05	1.75E+06	3.80E+06	9.00E+06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 59: Cálculo de EAL según Manual de Colombia

Tipo de vehículo	Factor Camión	r	IMD	1	5	10	20
				2019	2022	2026	2031
B2	1.000	0.012	2	4.52E+02	4.74E+02	5.02E+02	5.64E+02
C2	2.290	0.032	500	2.73E+05	3.09E+05	3.62E+05	4.95E+05
C3	3.910	0.032	1	9.35E+02	1.06E+03	1.24E+03	1.70E+03
TOTAL DE EJES EQUIVALENTES				2.74E+05	1.46E+06	3.17E+06	7.50E+06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 60: Cálculo de EAL según Manual de Austroads

Tipo de vehículo	Factor Camión	r	IMD	1	5	10	20
				2019	2022	2026	2031
B2	1.006	0.012	2	4.55E+02	4.77E+02	5.05E+02	5.68E+02
C2	1.176	0.032	500	1.40E+05	1.59E+05	1.86E+05	2.54E+05
C3	1.289	0.032	1	3.08E+02	3.50E+02	4.09E+02	5.59E+02
TOTAL DE EJES EQUIVALENTES				1.41E+05	7.51E+05	1.63E+06	3.85E+06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 61: Cálculo de EAL según Manual de South África

Tipo de vehículo	Factor Camión	r	IMD	1	5	10	20
				2019	2022	2026	2031
B2	0.800	0.012	2	3.62E+02	3.79E+02	4.02E+02	4.51E+02
C2	1.000	0.032	500	1.19E+05	1.35E+05	1.58E+05	2.16E+05
C3	1.500	0.032	1	3.59E+02	4.07E+02	4.76E+02	6.51E+02
TOTAL DE EJES EQUIVALENTES				1.20E+05	6.39E+05	1.39E+06	3.28E+06

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo resultados de los valores de EAL por cada manual proyectados a 20 años y se realizó un cuadro resumen de estos valores.

Tabla 62: Resumen de valores de EAL por cada manual

MANUAL	EAL
Exp. Técnico	2.01E+07
AASHTO	1.14E+07
Bajo Volumen	9.00E+06
Colombia	7.50E+06
Austroroads	3.85E+06
South África	3.28E+06

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 62, podemos observar la comparación de los valores de EAL calculados por cada manual, observando que el valor de EAL del expediente técnico en estudio es más elevado respecto a los otros valores de los manuales.

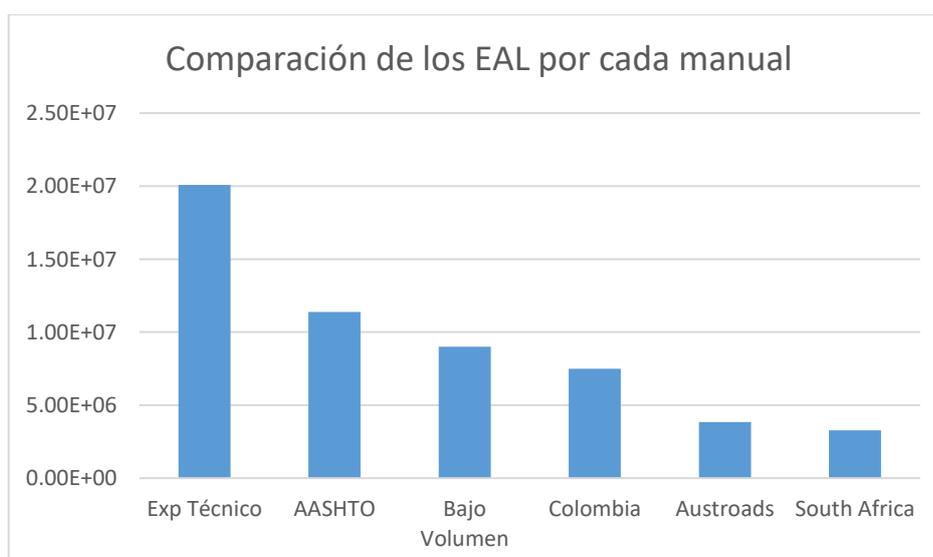


Figura 19: Cuadro resumen de EAL según cada manual

Fuente: Elaboración propia

Del análisis de la clasificación vehicular, se obtuvo una coincidencia en los tipos de vehículo pesado B2, C2 y C3 en cada modelo de análisis.

En los valores de Factor Camión de los manuales nacionales e internacionales, hay una diferencia entre la concepción del expediente técnico, el Manual de AASHTO, el Manual de Pavimentado de Bajo Volumen de Tránsito, el Manual de Colombia, el Manual Austroads y el Manual de South África.

Desde el punto de vista de la investigación se va a verificar el valor del Número Estructural (SN) del expediente técnico, del Manual de AASHTO, del Manual de Pavimentado de Bajo Volumen de Tránsito, y el Manual Austroads.

5.3 Resultados del estudio de suelos

Los estudios de suelos se realizaron en el mes de agosto del año 2020, con el fin de extraer muestras y evaluarlas para su caracterización y posterior sectorización según su tipología.

Según la plataforma proyectada se realizaron pozos de exploración conocidos como calicatas tal y como indica la normatividad nacional, de manera alterna al interior y exterior del eje de la vía, siendo un total de 40 calicatas.

Tabla 63: Valor resultante del ensayo de Proctor Modificado

Progresiva	Calicata	Muestra	Profundidad	Proctor Modificado (cc/cm ³)	
				M.D.S (gr/cc)	O.C.H (%)
0+020	CD-01	M-01	0.00-0.70	2.224	7
0+020	CD-01	M-02	0.70-1.30	2.153	7.3
0+020	CD-01	M-03	1.30-1.55	2.18	7.5
0+150	CI-01	M-01	0.00-0.35	2.215	6.8
0+150	CI-01	M-02	0.35-1.20	2.194	6.9
0+150	CI-01	M-03	1.20-1.60	2.163	7.2
1+080	CD-05	M-01	0.00-0.20	2.183	6.9
1+080	CD-05	M-02	0.20-1.35	2.137	7.5
1+080	CD-05	S/M	>1.35	-	-
1+870	C-09	M-01	0.00-0.15	2.088	6.9
4+120	C-18	M-01	0.00-0.10	2.069	8.5
4+120	C-18	M-02	0.10-0.80	2.086	8
4+120	C-18	S/M	>0.80	-	-
5+090	C-22	M-01	0.00-0.20	2.108	8.7
5+090	C-22	M-02	0.20-1.10	2.136	8.4
5+090	C-22	S/M	>1.10	-	-

6+070	C-26	M-01	0.00-0.90	2.119	10.2
6+070	C-26	S/M	>0.00	-	-
7+080	C-30	M-01	0.00-0.50	2.185	7.2
7+080	C-30	M-02	0.50-0.95	2.273	7.1
7+080	C-30	M-03	0.95-1.50	2.091	10
8+060	C-34	M-01	0.00-0.95	2.271	7
8+060	C-34	M-02	0.95-1.55	2.016	11.8

Fuente: Expediente Técnico del proyecto de rehabilitación de la vía “Pasamayito” (2020).

Además, siete (07) calicatas ubicadas en el tramo 2+200 al 3+600 fueron reemplazadas por ensayos geofísicos para la caracterización del perfil del terreno, debido a que se intervendría a una profundidad mayor a los 10 m.

Tabla 64: Resultados del ensayo de refracción sísmica

Línea	Capa N°	Vp (m/s)	Espesor (m)	Prof. (m)	Interpretación
LS-01	1	434	1.50 - 4.15	0.00 - 2.63	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	1297	3.00 - 7.00	2.83 - 7.83	Roca fracturada
	3	3889	-	7.83 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-02	1	495	2.65 - 4.30	0.00 - 3.48	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	1768	1.00 - 10.30	3.48 - 9.13	Roca fracturada
	3	4901	-	9.13 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-03	1	464	2.15 - 5.15	0.00 - 3.65	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	1654	4.65 - 8.90	3.66 - 10.43	Roca fracturada
	3	3820	-	10.43 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-04	1	357	1.55 - 4.50	0.00 - 3.03	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	1054	1.40 - 12.05	3.03 - 9.75	Roca fracturada
	3	3693	-	9.75 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-05	1	554	0.90 - 5.15	0.00 - 3.03	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	1070	7.90 - 11.50	3.03 - 12.73	Roca fracturada
	3	2032	-	12.73 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-06	1	488	3.50 - 5.05	0.00 - 4.28	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	1311	4.30 - 12.95	4.28 - 12.90	Roca fracturada
	3	2992	-	12.90 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-07	1	332	1.85 - 3.15	0.00 - 2.50	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca

	2	1418	4.05 - 12.40	2.60 - 10.73	Roca fracturada
	3	2667	-	10.73 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-08	1	340	0.95 - 2.15	0.00 - 1.50	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	1378	3.80 - 5.05	1.60 - 5.93	Roca fracturada
	3	4075		5.93 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-09	1	323	1.90 - 3.05	0.00 - 2.48	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	2458	3.40 - 12.30	2.48 - 10.33	Roca fracturada
	3	3528	-	10.33 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-10	1	311	2.60 - 3.90	0.00 - 3.25	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	875	9.45 - 18.25	3.25 - 17.10	Roca fracturada
	3	3370	-	17.00 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-11	1	363	2.40 - 5.50	0.00 - 3.95	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	1254	3.15 - 14.85	3.95 - 12.95	Roca fracturada
	3	3077	-	12.95 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-12	1	409	3.00 - 4.55	0.00 - 3.78	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	1468	7.05 - 3.55	3.78 - 9.08	Roca fracturada
	3	2298	-	9.08 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-13	1	450	1.25 - 3.40	0.00 - 2.33	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	1662	3.15 - 7.05	2.33 - 7.43	Roca fracturada
	3	2468	-	7.43 - 25.00	Roca poco fracturada
LS-14	1	387	2.75 - 4.90	0.00 - 3.83	Deposito coluvial suelto, arenas, gravas fragmentos de roca
	2	1560	3.10 - 13.80	3.83 - 12.28	Roca fracturada
	3	3065	-	12.28 - 25.00	Roca poco fracturada

Fuente: Expediente Técnico del proyecto de rehabilitación de la vía “Pasamayito” (2020).

De la interpretación de los ensayos MASW se determinó la clasificación del perfil del suelo según Vs30 y E – 030, concluyendo que corresponde a un perfil S₁ caracterizado como roca o suelo muy rígido.

Así mismo, los suelos encontrados producto de la exploración de la zona en estudio, dieron resultados de composición granular de materiales gravosos y arenosos limosos, bolonería subyacente a estos y en gran parte de la vía se evidencio la presencia de roca y roca fracturada por bloques.

A continuación, se muestran los resultados de clasificación de suelos obtenidos por SUCS y AASHTO de las diferentes muestras extraídas a profundidades variables de cada calicata realizada para la exploración de los suelos:

Tabla 65: Resultados de la clasificación de suelos SUCS y la clasificación de suelos AASHTO

Progresiva	Calicata	Muestra	Profundidad	Clasificación	
				SUCS	AASHTO
0+020	CD-01	M-01	0.00-0.70	GM	A-1-a (0)
0+020	CD-01	M-02	0.70-1.30	SW-SM	A-1-b (0)
0+020	CD-01	M-03	1.30-1.55	S/M	A-1-b (0)
0+150	CI-01	M-01	0.00-0.35	GM	A-1-b (0)
0+150	CI-01	M-02	0.35-1.20	SW-SM	A-1-a (0)
0+150	CI-01	M-03	1.20-1.60	SP-SM	A-1-b (0)
1+080	CD-05	M-01	0.00-0.20	SM	A-1-b (0)
1+080	CD-05	M-02	0.20-1.35	SW-SM	A-1-b (0)
1+080	CD-05	S/M	>1.35	BOLONERIA	BOLONERIA
1+870	C-09	M-01	0.00-0.15	GM	A-1-b (0)
4+120	C-18	M-01	0.00-0.10	SM	A-1-b (0)
4+120	C-18	M-02	0.10-0.80	SM	A-1-b (0)
4+120	C-18	S/M	>0.80	ROCA	ROCA
5+090	C-22	M-01	0.00-0.20	GM	A-1-a (0)
5+090	C-22	M-02	0.20-1.10	GM	A-1-a (0)
5+090	C-22	S/M	>1.10	BOLONERIA	BOLONERIA
6+070	C-26	M-01	0.00-0.90	SM	A-1-b (0)
6+070	C-26	S/M	>0.00	ROCA	ROCA
7+080	C-30	M-01	0.00-0.50	GM-GC	A-1-b (0)
7+080	C-30	M-02	0.50-0.95	GM	A-1-a (0)
7+080	C-30	M-03	0.95-1.50	SM	A-1-a (0)
8+060	C-34	M-01	0.00-0.95	GM	A-1-a (0)
8+060	C-34	M-02	0.95-1.55	SW-SM	A-1-b (0)

Fuente: Expediente Técnico del proyecto de rehabilitación de la vía “Pasamayito” (2020).

Así mismo, a modo de resumen se consolidan los resultados de la clasificación de los suelos según el método AASHTO en porcentajes del total según el tipo de suelo encontrado, tal y como se muestra en la Tabla 66:

Tabla 66: Porcentajes de tipos de suelos según la clasificación AASHTO

Tipo de Suelo - AASHTO	Porcentaje (%)
A-1-a (0)	25.32
A-2-b (0)	39.24
A-2-4 (0)	18.99
BOLONERÍA	3.8
BLOQUES DE ROCAS	2.53
ROCA	10.13
TOTAL	100.0

Fuente: Expediente Técnico del proyecto de rehabilitación de la vía “Pasamayito” (2020).

Del análisis para sustentar la estabilización de suelos finos que se clasifican según el porcentaje que pasa la malla N°200, se planteó el valor de índice de grupo de (4) para suelos “insuficientes”, obteniéndose un valor de (0) para todos los tipos de suelos encontrados siendo un resultado favorable denominada como una subrasante muy buena, descartando además la presencia de suelos expansivos o de deformación sensible.

Además, el Manual de Carreteras, Sección Suelos y Pavimentos (2014), menciona las categorías de la subrasante en función al valor del CBR, por lo que, en la Tabla 67 se muestra el porcentaje que abarca cada categoría del suelo resultante de los ensayos.

Tabla 67: Categorías de subrasante en función del CBR

Categoría de Sub Rasante	Porcentaje (%)
$CBR \geq 30\%$ (SUBRASANTE EXCELENTE)	44,44
$10\% \leq CBR < 30\%$ (SUBRASANTE MUY BUENA)	5,56
$10\% \leq CBR < 20\%$ (SUBRASANTE BUENA)	50,00
$6\% \leq CBR < 10\%$ (SUBRASANTE REGULAR)	0,00
$3\% \leq CBR < 6\%$ (SUBRASANTE INSUFICIENTE)	0,00
$CBR < 3\%$ (SUBRASANTE INADECUADO)	0,00

Fuente: Expediente Técnico del proyecto de rehabilitación de la vía “Pasamayito” (2020).

En la Tabla 68 se muestra el resumen de resultados de los ensayos de CBR:

Tabla 68: Resultados de los ensayos de suelos respecto del CBR

Progresiva	Calicata	Muestra	Profundidad	CBR (0.1 pulg. de penetración)	
				MDS 100%	MDS 95%
0+020	CD-01	M-01	0.00-0.70	40.8	29.5
0+020	CD-01	M-02	0.70-1.30	27	19.5
0+020	CD-01	M-03	1.30-1.55	26.3	14.7
0+150	CI-01	M-01	0.00-0.35	33.7	20.1
0+150	CI-01	M-02	0.35-1.20	43.3	30.6
0+150	CI-01	M-03	1.20-1.60	47	28.8
1+080	CD-05	M-01	0.00-0.20	37	23.6
1+080	CD-05	M-02	0.20-1.35	24.1	14
1+870	C-09	M-01	0.00-0.15	65.2	39.4
4+120	C-18	M-01	0.00-0.10	21	13.6
4+120	C-18	M-02	0.10-0.80	25	15.5
5+090	C-22	M-01	0.00-0.20	48	29
5+090	C-22	M-02	0.20-1.10	35	22.4
6+070	C-26	M-01	0.00-0.90	19	13.3
7+080	C-30	M-01	0.00-0.50	30.3	17.8
7+080	C-30	M-02	0.50-0.95	33	20
7+080	C-30	M-03	0.95-1.50	26	14.4
8+060	C-34	M-01	0.00-0.95	40.7	28
8+060	C-34	M-02	0.95-1.55	20.5	15.7

Fuente: Expediente Técnico del proyecto de rehabilitación de la vía “Pasamayito” (2020).

5.3.1 Sectorización de suelos

Para efectos del diseño de la estructura del pavimento se realiza un proceso de sectorización, por lo que los ensayos de laboratorio y los datos de campo obtenidos en la evaluación de suelos son necesarios para la identificación de los sectores con características homogéneas.

a) Sectorización por tipo de suelo

Para esta sectorización se procedió a analizar las características de los suelos de fundación, encontrando características similares a lo largo de la vía.

Tabla 69: Sectorización por tipo de material

Sector	Progresivas	Descripción
1	0+000 - 1+270	Conformado superficialmente por gravas limosas (GM), continuadas por arenas limosas (SM), que sería el suelo de subrasante, según la clasificación AASHTO estarían conformados por suelos granulares tipo A-1-a y A-1-b.
2	1+270 - 6+330	Conformado superficialmente por gravas limosas (GM) y arenas limosas (SM), según la clasificación AASHTO estarían conformados por suelos granulares tipo A-1-a, A-1-b y A-2-4, subyacente se encuentra un estrato de roca fracturada tipo Diorita.
3	6+330 - 7+810	Conformado por arenas limosas (SM) y material granular tipo gravas limosas pobremente gradadas (GP-GM), que sería el suelo de subrasante, según la clasificación AASHTO estarían conformados por suelos granulares tipo A-1-a, A-1-b y A-2-4.

Fuente: Expediente Técnico del proyecto de rehabilitación de la vía “Pasamayito” (2020).

Los sectores seleccionados contienen, en primera instancia, el material mayor encontrado y los límites de cada sector es un promedio de las progresivas donde se realizaron las calicatas.

b) Sectorización por CBR

Para efectos de la presente investigación, se realizó el análisis de los resultados de los estudios de suelos para sectorizar en tramos de suelos homogéneos. A continuación, se muestra el primer tramo seleccionado que comprende de la calicata CD – 01 en la progresiva 0+020 hasta la calicata CI – 04 en la progresiva 0+930. Además se muestra el valor del ensayo de CBR debajo de la nomenclatura del tipo de suelo del método de clasificación SUCS, comprendido por materiales granulares tal como, gravas y arenas limosas.

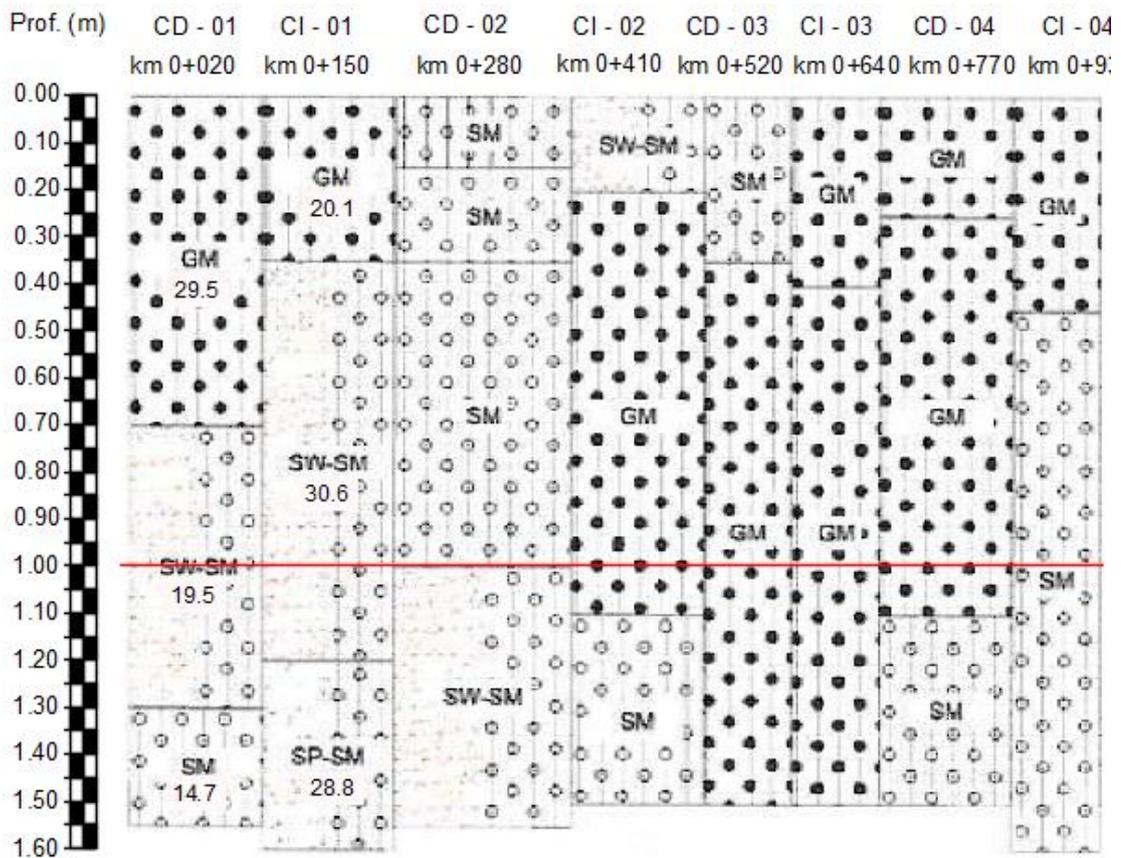


Figura 20: Perfil en sección del primer sector de suelos homogéneos

Fuente: Expediente Técnico del proyecto de rehabilitación de la vía “Pasamayito” (2020).

El segundo sector homogéneo seleccionado comprende la progresiva 1+080 hasta la progresiva 6+330, tal y como se muestra en el siguiente perfil de clasificación de suelos y el valor del CBR donde corresponde del estudio de suelos. La clasificación SUCS indica que el suelo en dicho sector está comprendido por arenas y gravas limosas asentadas sobre roca fracturada a poca profundidad, así como, bloques de roca y bolonería.

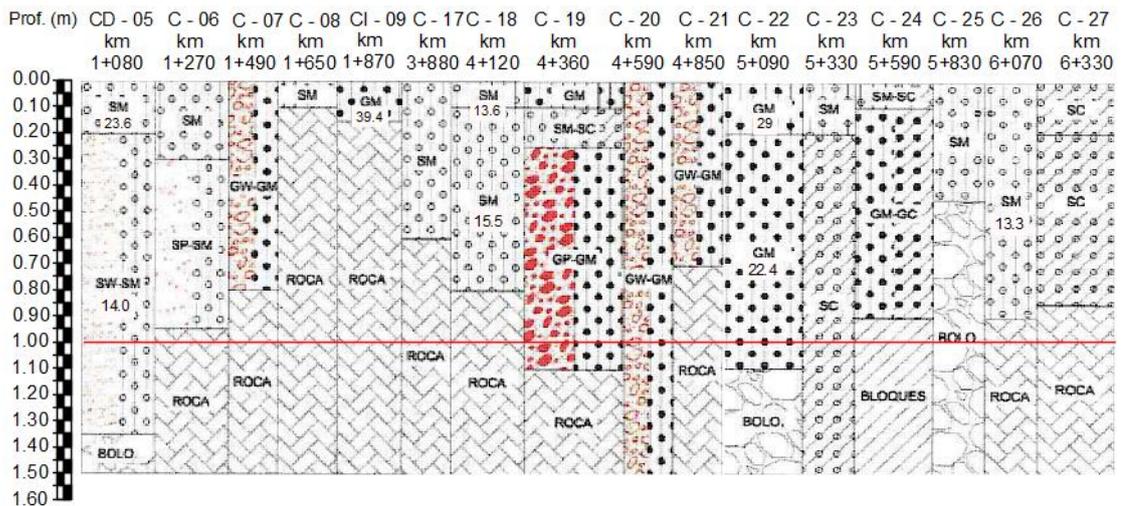


Figura 21: Perfil en sección del segundo sector de suelos homogéneos

Fuente: Expediente Técnico del proyecto de rehabilitación de la vía “Pasamayito” (2020).

El último sector de suelo homogéneo comprende la progresiva 6+580 hasta la progresiva 8+430 con la correspondiente clasificación SUCS y los valores de CBR donde corresponden, este tipo de suelo está conformado por material arenoso y gravoso con presencia de limos.

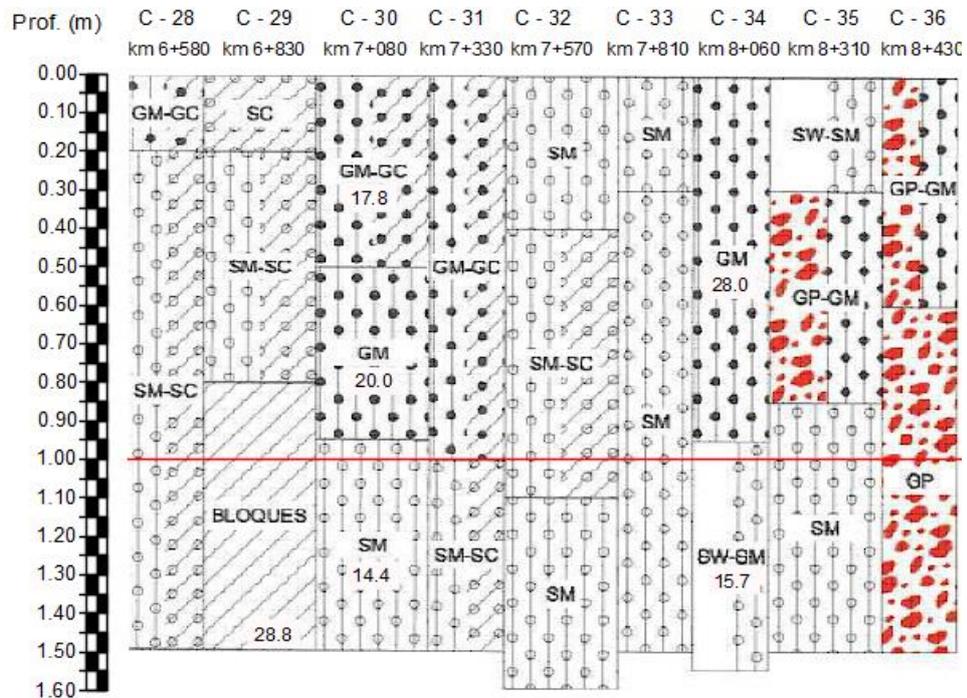


Figura 22: Perfil en sección del segundo sector de suelos homogéneos

Fuente: Expediente Técnico del proyecto de rehabilitación de la vía “Pasamayito” (2020).

Luego de haber sectorizado los suelos homogéneos según la clasificación de suelos por el método SUCS, se elige el valor de CBR con mayor profundidad dentro de una misma calicata, así mismo si estos valores son similares o parecidos se procede a calcular el valor promedio, de lo contrario se procede a elegir el valor más crítico, tal y como se muestra en la Tabla 70:

Tabla 70: Sectorización de tramos homogéneos por CBR

Progresiva		CBR (%)
0+020	1+080	14.70
1+080	6+330	36.12
6+330	8+430	15.05

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, debido a que en el sector homogéneo que comprende las progresivas 1+080 a la progresiva 6+330 se encontró material rocoso a poca profundidad inicialmente a menos de 1.50 m, y en consiguiente a profundidades menores a 1.00 m y en el caso de la calicata C-08 ubicada en la progresiva 1+650 a partir de los 0.10 m de profundidad, y un valor de CBR de 39.2 en la calicata C-09 de la progresiva 1+870.

Además, que en el lugar se realizaron ensayos de refracción sísmica desde la progresiva 1+680 hasta 4+020 y seis ensayos de MASW distribuidos desde la progresiva 1+730 hasta 3+940, debido a que en el lugar se realizarían trabajos a profundidades mayores a 10 m.

Esto dio como resultado de las correlaciones del módulo de elasticidad dinámico resultante de los ensayos geofísicos conocido como módulo resiliente del suelo con el valor del CBR, dicho valor fue tomado del estrato de roca fracturada siendo este el menor de los 6 ensayos de MASW ubicado en la progresiva 2+485, considerado a poca profundidad como se muestra en la Tabla 71:

Tabla 71: Conversión del Ed o Mr a CBR (%)

Profundidad (m)	Ed (kg/cm ²)	Ed (PSI)	Mr (PSI)=2555*CBR ^{0.64}
			CBR (%)
0.0	1765.4	25109.28	35.54
1.1	1368.0	19457.83	23.86
2.3	1784.0	25373.93	36.12
3.7	3383.4	48123.09	98.20

Fuente: Elaboración propia

Este resultado, es similar al ensayo de CBR realizado a la única muestra extraída de la calicata C-09 de la progresiva 1+870 a una profundidad menor a 0.15 m. por lo que guarda relación y comprueba la consideración del resultado de las correlaciones de los ensayos geofísicos, por lo que se decidió tener en cuenta para la sectorización de tramos de diseño, dando como resultado el siguiente cuadro de resumen:

Tabla 72: Resultado de la sectorización de tramos de diseño por CBR

Progresiva	CBR (%)
0+020 1+080	14.70
1+080 6+330	36.12 - sección en corte roca fracturada
6+330 8+447	15.05

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la guía de diseño de estructuras de pavimentos AASHTO 93 en el apéndice J, se recomienda el método por Diferencias Acumuladas, el cual se ha aplicado a este caso, dando como resultados los siguientes valores:

Tabla 73: Método de las Diferencias Acumuladas

Progre siva	CBR (%)	Distan cia de interva los (m)	Distancia acumulad a (m)	Intervalo promedio (%)	Área del intervalo	Área acumulad a	Zx
20	14.7	20	20	14.7	294.0	294.0	-250.3
150	28.8	130	150	21.8	3262.5	3556.5	-525.9
1080	14.0	930	1080	21.4	23112.0	26374.5	-3018.8
1870	39.4	790	1870	26.7	49929.0	73041.0	22147.1
4120	15.5	2250	4120	27.5	113094.0	163023.0	50893.1
5090	22.4	970	5090	19.0	96455.5	209549.5	71020.0
6070	13.3	980	6070	17.9	108349.5	204805.0	39603.8
7080	14.4	1010	7080	13.9	98058.0	206407.5	13718.2
8060	15.7	980	8060	15.1	121303.0	219361.0	0.0
					At	219361.0	
					Lp	8060.0	
					F*	27.2	

Fuente: Elaboración propia

Los resultados se proceden a graficar, donde el gráfico generado está compuesto por puntos de quiebre o cambios de pendiente, dichos puntos se utilizan como límites de cada sector de suelos homogéneos, para posteriormente definir el valor promedio del CBR en dichos sectores, tal y como se muestra en la figura 23.

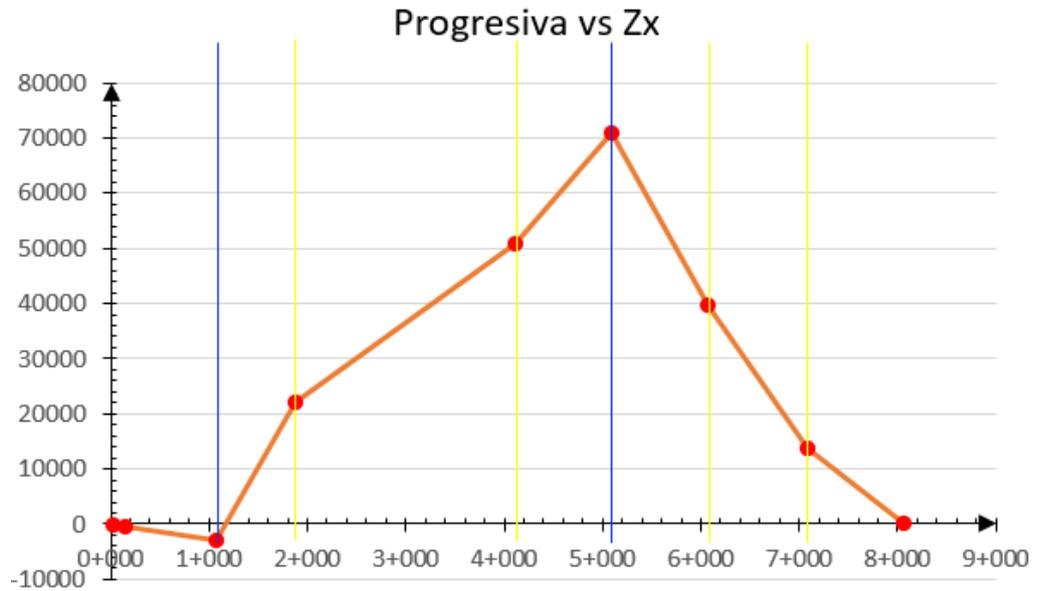


Figura 23: Gráfico resultante de los valores de diferencias acumuladas en su progresiva correspondiente

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico se puede observar los cambios de pendiente que establecen los sectores de suelos homogéneos para los tramos de diseño en base al CBR promedio de cada sector, establecido por medio del método de las diferencias acumuladas, lo cual, queda mejor diferenciado al graficar los valores de CBR y sus progresivas correspondientes a las calicatas donde se realizaron dicho ensayo, por lo que, resulta el siguiente gráfico a razón de la sectorización ya establecida:

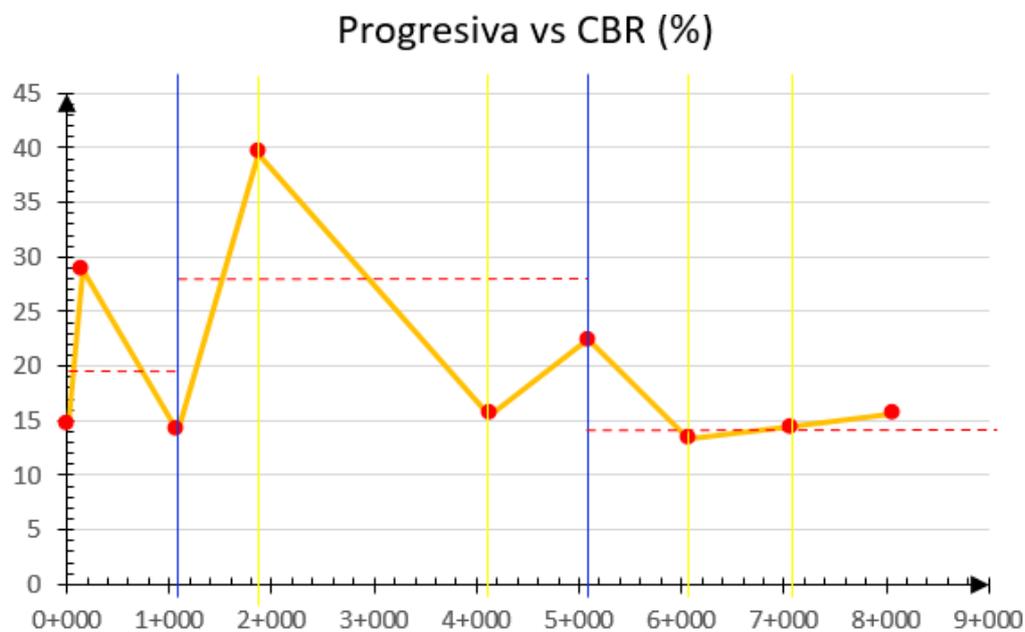


Figura 24: Progresiva y valor de CBR del alineamiento por sectores de diseño

Fuente: Elaboración propia

De esta manera obtenemos el siguiente cuadro de resumen según los sectores establecidos como tramos de diseño:

Tabla 74: Resumen del CBR promedio de los tramos de diseño

Progresiva	Tramo de diseño	CBR (%)	Subtramo - CBR promedio (%)
0+020		14.70	
0+150	0+000 al 1+080	28.80	19.2
1+080		14.00	
1+870		39.40	
4+120	1+080 al 5+090	15.50	25.8
5+090		22.40	
6+070		13.30	
7+080	5+090 al 8+447	14.40	14.5
8+060		15.70	

Fuente: Elaboración propia

Estos suelos se encuentran dentro del rango de sub rasantes buenas y muy buenas.

5.4 Método AASHTO

Esta metodología para el diseño de pavimento flexible consiste en determinar un Número Estructural (SN) requerido por el pavimento para soportar las cargas impuestas por el tráfico de diseño sobre un suelo con sus respectivas propiedades estructurales y permitiendo al pavimento poseer una servicialidad adecuada.

Al revisar las consideraciones del expediente técnico en estudio se halló nuevos datos de tráfico con su CBR respectivo en cada sector mostrado en la tabla 72, estos datos nos muestran dos valores de ESAL, para el sector 1 y 2 es $6.87E+06$ y para el sector 3 es $9.00E+06$. A partir de estos datos se procedió a hallar los restantes parámetros de diseño del Método AASHTO 93.

a) Módulo Resiliente de la subrasante

Nuestra categoría de subrasante, de acuerdo al CBR, es buena en un 50%, muy buena en 5.56% y excelente en 44.44%, mostrada en la Tabla 66. Para convertir el valor de CBR a Módulo Resiliente (M_r) se utiliza la Ecuación 12, lo cual coincide con la tabla de correlación del Manual de Carreteras:

Tabla 75: Módulo Resiliente obtenido por correlación con CBR

CBR% SUB RASANTE	MÓDULO RESILIENTE SUB RASANTE (M_r) (PSI)	MÓDULO RESILIENTE SUB RASANTE (M_r) (MPA)	CBR% SUB RASANTE	MÓDULO RESILIENTE SUB RASANTE (M_r) (PSI)	MÓDULO RESILIENTE SUB RASANTE (M_r) (MPA)
6	8,043.00	55.45	19	16,819.00	115.96
7	8,877.00	61.20	20	17,380.00	119.83
8	9,669.00	66.67	21	17,931.00	123.63
9	10,426.00	71.88	22	18,473.00	127.37
10	11,153.00	76.90	23	19,006.00	131.04
11	11,854.00	81.73	24	19,531.00	134.66
12	12,533.00	86.41	25	20,048.00	138.23
13	13,192.00	90.96	26	20,558.00	141.74
14	13,833.00	95.38	27	21,060.00	145.20
15	14,457.00	99.68	28	21,556.00	148.62
16	15,067.00	103.88	29	22,046.00	152.00
17	15,663.00	107.99	30	22,529.00	155.33
18	16,247.00	112.02			

Fuente: “Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos” (2014, p.132).

De la Ecuación 12, sustentada en la Tabla 76, hallamos los valores de módulo resiliente para cada sector.

Tabla 76: Valores de CBR y Mr de diseño

Sector	CBR (%)	Mr (psi)
1	14.70	14272
2	36.12	25372
3	15.05	14488

Fuente: Elaboración propia

b) Confiabilidad

La Guía AASHTO de Diseño de Estructuras de Pavimento (1993), recomienda valores para la confiabilidad según la función de la vía.

Tabla 77: Valores de confiabilidad recomendados según la función de la Vía

Clasificación por Funcionalidad	Valores de Confiabilidad Recomendados	
	Vía Urbana	Vía Rural
Interestatales y Autopistas	85% - 99.9%	85% - 99.9%
Red Principal	80% - 99%	75% - 95%
Red Secundaria	80% - 95%	75% - 95%
Red Local	50% - 80%	50% - 80%

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

De acuerdo con la Tabla 77, la vía Pasamayito al ser una red que conecta ambos distritos de carácter urbano, se le analizará con una confiabilidad entre 80%-99.9%.

Según AASHTO, el diseño debe ser por etapas, teniendo en cuenta los ejes equivalentes acumulados para la confiabilidad total del periodo de diseño.

Tabla 78: Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) según rango de tráfico

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	T _{P0}	75,000	150,000	65%
	T _{P1}	150,001	300,000	70%
	T _{P2}	300,001	500,000	75%
	T _{P3}	500,001	750,000	80%
	T _{P4}	750,001	1,000,000	80%
Resto de Caminos	T _{P5}	1,000,001	1,500,000	85%
	T _{P6}	1,500,001	3,000,000	85%
	T _{P7}	3,000,001	5,000,000	85%
	T _{P8}	5,000,001	7,500,000	90%
	T _{P9}	7,500,001	10'000,000	90%
	T _{P10}	10'000,001	12'500,000	90%
	T _{P11}	12'500,001	15'000,000	90%
	T _{P12}	15'000,001	20'000,000	95%
	T _{P13}	20'000,001	25'000,000	95%
	T _{P14}	25'000,001	30'000,000	95%
	T _{P15}		>30'000,000	95%

Fuente: “Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos” (2014, p.133)

De la Tabla 78, se obtiene un tráfico T_{P8} para el sector 1, 2 y 3, y T_{P9} para el sector 4. Para ambos tráficos el nivel de confiabilidad del diseño de pavimento es R=90%.

c) Desviación estándar

El coeficiente estadístico de Desviación Estándar Normal (Z_r) representa el valor del nivel de confiabilidad obtenida.

Tabla 79: Coeficiente Estadístico de la Desviación Estándar Normal (Z_r) Para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) Según el Nivel de Confiabilidad seleccionado y el Rango de Tráfico

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z_R)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	T _{P0}	75,000	150,000	-0.385
	T _{P1}	150,001	300,000	-0.524
	T _{P2}	300,001	500,000	-0.674
	T _{P3}	500,001	750,000	-0.842
	T _{P4}	750 001	1,000,000	-0.842
Resto de Caminos	T _{P5}	1,000,001	1,500,000	-1.036
	T _{P6}	1,500,001	3,000,000	-1.036
	T _{P7}	3,000,001	5,000,000	-1.036
	T _{P8}	5,000,001	7,500,000	-1.282
	T _{P9}	7,500,001	10'000,000	-1.282
	T _{P10}	10'000,001	12'500,000	-1.282
	T _{P11}	12'500,001	15'000,000	-1.282
	T _{P12}	15'000,001	20'000,000	-1.645
	T _{P13}	20'000,001	25'000,000	-1.645
	T _{P14}	25'000,001	30'000,000	-1.645
	T _{P15}		>30'000,000	-1.645

Fuente: “Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos” (2014, p.135).

La desviación estándar normal Z_r , según la Tabla 75 es $Z_r = -1.282$.

La Guía AASHTO recomienda para la desviación Estándar Combinada (S_o), utilizar valores de S_o que se encuentren entre 0.40 y 0.50, considerando el detallado estudio de tráfico para pavimento flexible se utilizará $S_o = 0.45$.

d) Serviciabilidad

Serviciabilidad inicial (P_i) es la condición de una vía recientemente construida y la serviciabilidad final (P_t), es la condición de una vía que puede tolerarse dado al tiempo de uso antes de su rehabilitación o reconstrucción.

Entonces la variación de serviciabilidad (Δ PSI) es la capacidad del pavimento para proveer un manejo seguro y confortable dado un tiempo determinado de acuerdo a la clase de tránsito

Tabla 80: Diferencial de Serviabilidad (Δ PSI) Según Rango de Tráfico

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		DIFERENCIAL DE SERVICIABILIDAD (Δ PSI)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	T _{P0}	75,001	1500,000	1.80
	T _{P1}	150,001	300,000	1.80
	T _{P2}	300,001	500,000	1.80
	T _{P3}	500,001	750,000	1.80
	T _{P4}	750 001	1,000,000	1.80
Resto de Caminos	T _{P5}	1,000,001	1,500,000	1.50
	T _{P6}	1,500,001	3,000,000	1.50
	T _{P7}	3,000,001	5,000,000	1.50
	T _{P8}	5,000,001	7,500,000	1.50
	T _{P9}	7,500,001	10'000,000	1.50
	T _{P10}	10'000,001	12'500,000	1.50
	T _{P11}	12'500,001	15'000,000	1.50
	T _{P12}	15'000,001	20'000,000	1.20
	T _{P13}	20'000,001	25'000,000	1.20
	T _{P14}	25'000,001	30'000,000	1.20
	T _{P15}		>30'000,000	1.20

Fuente: “Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos” (2014, p.139).

De acuerdo con la Tabla 80, el valor diferencial de serviabilidad para el pavimento en estudio es Δ PSI= 1.5 (4 - 2.5 = 1.5).

e) Número Estructural Requerido (SNr)

Para el diseño AASHTO utilizamos la Ecuación 1 para determinar el Número Estructural, el cual representa el espesor total de la estructura de pavimento. Esta ecuación considera el número de ejes equivalentes, el módulo resiliente, factores estadísticos y factores de serviabilidad. Para ello utilizaremos la Tabla 81 donde nos muestra los parámetros de diseño calculados previamente para un periodo de 20 años.

Tabla 81: Parámetros de diseño

Periodo de Diseño	20 años
Nivel de Confiabilidad	90%
Desviación estándar	-1.282
Desviación estándar Combinada	0.45
Serviabilidad (Δ pi-f)	1.5

Fuente: Elaboración propia

El análisis de sectorización nos dio 3 sectores, cada sector tiene en su conjunto un valor de CBR y ESAL diferente.

De la investigación se obtiene diferentes valores de ESAL de acuerdo a cada manual, por ello se calculó el Número Estructural de los siguientes manuales:

Tabla 82: Número estructural requerido SN por cada manual

Sector	Mr (psi)	SN			
		Exp. Técnico	AASHTO	MCPBVT	Austroroads
1	14272	4.374	3.990	3.836	3.316
2	25374	3.502	3.175	3.048	2.632
3	14488	4.540	4.148	3.990	3.453

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 82 nos muestra la variación Número Estructural requerido para las exigencias locales del pavimento, esta diferencia de valores influye en el diseño de las diferentes capas de la estructura del pavimento.

f) Cálculo de espesores del pavimento

Luego de hallar el número estructural requerido, se propuso un Número estructural para satisfacer las características estructurales de las capas. Para ellos se utilizó los coeficientes estructurales de cada capa y coeficiente de drenaje respectivo, que para nuestro caso fue asumido el valor de 1.00.

Tabla 83: Coeficientes estructurales de las capas del pavimento

Capa Superficial	Base	Subbase
a1	a2	a3
Carpeta Asfáltica en Caliente, módulo 2,965 MPa (430,000 PSI) a 20 °C (68 °F)	Base Granular CBR 80%, compactada al 100% de la MDS	Subbase Granular CBR 40%, compactada al 100% de la MDS
Capa Superficial recomendada para todos los tipos de Tráfico.	Capa de Base recomendada para Tráfico $\leq 10'000,000$ EE	Capa de Subbase recomendada con CBR mínimo 40%, para
0.17	0.052	0.047

Fuente: “Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos” (2014).

De esta manera se procede a utilizar los valores recomendados de espesores mínimos de capa superficial y base granular por el Manual de Carreteras, obteniendo la Tabla 84 con los siguientes espesores del pavimento.

Tabla 84: Número estructural SN

Período de Diseño (20 años)		Exp. Técnico	Manual		
			AASHTO	CPBVT	Austroroads
Número estructural Requerido	SN	4.54	4.15	3.99	3.45
Carpeta Asfáltica m1 - a1 0.170	D1	15	12	11	9
Base Granular m2 1 a2 0.052	D2	25	25	25	20
Sub Base Granular m3 1 a3 0.047	D3	20	20	20	20
Espesor total del pavimento	(cm)	60	57	56	49
Número estructural Propuesto	SN'	4.79	4.28	4.11	3.51

Fuente: Elaboración propia

El diseño de espesores a través de la metodología AAASHTO 93 finaliza con la satisfacción del número estructural requerido, es decir, SN requerido < SN propuesto. Cumpliendo con los espesores mínimos recomendados tenemos una disminución en la carpeta asfáltica en promedio de 2cm por cada manual, además que para el Manual de Austroroads disminuye la base granular.

5.5 Método Mecanicista SHELL

El método mecanicista SHELL considera las deformaciones por esfuerzos de tracción debajo de la capa asfáltica, y los esfuerzos de compresión bajo cada capa granular que compone el pavimento estructural, de tal manera que dichos valores se encuentren dentro de los rangos admisibles para el periodo de diseño.

Así mismo, considera los siguientes parámetros para la realización del diseño del pavimento flexible.

5.5.1 Tránsito

El tránsito se expresa a partir del número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 ton. De acuerdo a lo hallado en el capítulo 5.2, se emplea los valores hallados de ESAL para esta metodología. Los valores se muestran en la Tabla 62 de los cuales se seleccionaron cuatro modelos para la aplicación del método, en base a estos resultados se realizará el ingreso a los distintos ábacos para el desarrollo

del método mecanicista Shell, de tal manera que se determinen los espesores adecuados para satisfacer la demanda de tráfico proyectada.

5.5.2 Temperatura

La temperatura media anual es uno de los parámetros de entrada para la aplicación del método mecanicista SHELL, por su estrecha relación con el efecto de susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica.

Los registros de temperatura media mensual se obtuvieron de la estación meteorológica de Carabayllo en el departamento de Lima de la región Lima, del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) con latitud de 11°54'7.9'' y longitud 77°2'1.1''A 179 msnm.

A continuación, la Tabla 85 muestra las temperaturas medias mensuales tomadas de la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio:

Tabla 85: Resumen de Temperaturas medias mensuales en C° del registro del SENAMHI

Mes	Año						MMAT °C
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
ENERO	-	-	23.05	24.25	-	24.09	23.79
FEBRERO	-	26.74	24.63	26.18	25.19	24.15	25.38
MARZO	-	26.33	23.52	24.88	25.33	-	25.02
ABRIL	-	23.41	22.74	23.00	23.09	-	23.06
MAYO	-	20.55	19.35	18.72	19.88	17.61	19.22
JUNIO	-	18.21	16.32	-	17.33	17.27	17.28
JULIO	-	17.44	16.21	-	15.80	16.47	16.48
AGOSTO	-	16.33	16.05	15.73	15.79	16.02	15.98
SEPTIEMBRE	-	16.19	17.03	16.56	16.45	15.58	16.36
OCTUBRE	-	17.55	18.24	17.81	17.98	-	17.89
NOVIEMBRE	20.70	18.58	19.82	19.80	18.75	-	19.53
DICIEMBRE	21.84	20.91	21.95	21.44	21.01	-	21.43

Fuente: Elaboración propia

Haciendo uso de la Curva de ponderación de temperatura, se procedió a establecer la temperatura promedio:

Tabla 86: Factor de ponderación mensual y promedio

Mes	MMAT °C	Factor de Ponderación
ENERO	23.8	1.79
FEBRERO	25.4	2.09
MARZO	25.0	2.03
ABRIL	23.1	1.69
MAYO	19.2	0.99
JUNIO	17.3	0.74
JULIO	16.5	0.66
AGOSTO	16.0	0.62
SEPTIEMBRE	16.4	0.65
OCTUBRE	17.9	0.76
NOVIEMBRE	19.5	1.01
DICIEMBRE	21.4	1.35
	Total	14.38
Factor de ponderación promedio	14.38/12	1.20

Fuente: Elaboración propia

Con el valor del factor de ponderación promedio (1.20), procedemos a utilizar el diagrama de la curva de ponderación de temperatura, de donde se obtiene un valor de $w\text{-MAAT} = 20.5\text{ °C}$. Que vendría a ser el valor de la temperatura media anual del ambiente.

5.5.3 Propiedades de la base, sub base y sub resante

Del Manual de Carreteras, especificaciones técnicas generales para construcción (2013) se estableció que los valores de CBR mínimos para las capas granulares que conformarán el pavimento son como se muestran a continuación:

- Para sub bases a menos de 3000 msnm el CBR mínimo es de 40 %.
- Para bases con cargas de tránsito menores a 10^6 se establece un CBR mínimo de 100%.

- Para el CBR de diseño de la sub rasante se toman los valores previamente establecidos del proceso de sectorización de tramos homogéneos.

Tabla 88: Módulo resiliente del método mecanicista SHELL

Progresiva		CBR (%)	Mr (PSI) = $10^7 \times$ CBR
0+020	1+080	14.70	1.47×10^8
1+080	6+330	36.12 sección en corte roca fracturada	3.61×10^8
6+330	8+430	15.05	1.51×10^8

Fuente: Elaboración propia

5.5.4 Características de la mezcla asfáltica

Para la aplicación del método mecanicista Shell es necesario hallar el valor del Stiffness, considerado como el módulo de elasticidad dinámico con aplicaciones de carga en tiempo de corta duración, para lo cual aplicaremos los siguientes pasos:

- c) Determinación de la susceptibilidad térmica del asfalto (IP) y su temperatura T_{800}

Del nomograma o gráfica de Heukelom para calcular el índice de penetración y la temperatura T_{800} .

Para esto se utilizó la ecuación polinómica que resultó de graficar los valores de penetración a distintas temperaturas para un cemento asfáltico PEN 120/150, ya que el tipo de cemento asfáltico seleccionado para el proyecto en análisis de la vía “Pasamayito” corresponde a un PEN 60/70 debido a sus condiciones climáticas, este detalle se muestra en la figura 25:

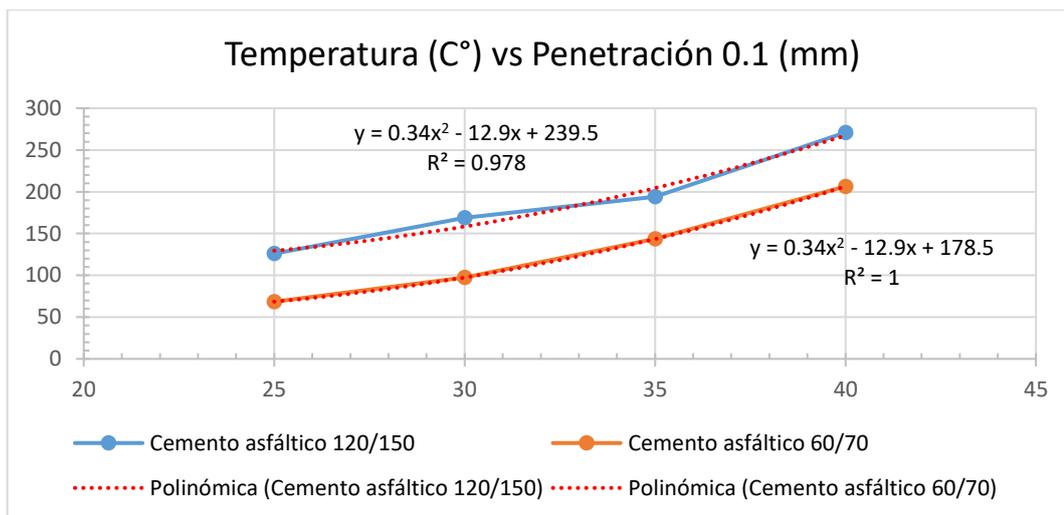


Figura 25: Ecuación resultante del ensayo de penetración al cemento asfáltico
 Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que el procedimiento de correlacionar los resultados del ensayo de penetración de un PEN 120/150 con un PEN 60/70 se ha realizado con fines educativos para este ejemplo de aplicación del método mecanicista SHELL, por lo que, es necesario realizar el ensayo de penetración al cemento asfáltico para la utilización del nomograma que ayuda a determinar el índice de penetración y la temperatura T_{800} del cemento asfáltico.

Esto dio como resultado los siguientes valores de penetración para un cemento asfáltico PEN 60/70:

Tabla 87: Valores de penetración a distintas temperaturas

Temperatura (°C)	Cemento asfáltico	
	120/150	60/70
25	122	65
30	169	98
35	194	144
40	271	207

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos se procedió a utilizar el nomograma para hallar la temperatura T_{800} y el índice de penetración del cemento asfáltico, lo cual, dio como resultado los siguientes valores:

- $T_{800} = 57.0$ °C
- I.P. = +1.45

- d) Determinación del Stiffness del cemento asfáltico a la temperatura de trabajo en campo

Con la utilización del grafico RT relación entre temperatura efectiva de la capa asfáltica y la temperatura media anual se conocerá el valor de la temperatura de la mezcla asfáltica.

Por lo que ingresamos el valor de 20.5 °C como temperatura media anual, en intersección con la curva del espesor de la capa asfáltica propuestas de 9, 11, 12, y 15 cm, dieron como resultado las siguientes temperaturas:

Tabla 88: Temperaturas según el espesor de la mezcla TMEZ
w-MAAT = 20.5 °C

Modelo	Espesor de la carpeta asfáltica (cm)	Temperatura (C°)
A	15.00	30.70
B	12.00	31.00
C	11.00	31.20
D	9.00	31.75

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- A: Expediente técnico.
- B: AASTHO 93
- C: Manual de Bajo Volumen de Tránsito
- D: Manual de Austroads

Resultando las siguientes diferencias de temperaturas entre la temperatura media anual del aire y la temperatura de la mezcla asfáltica, como se muestra a continuación:

Tabla 89: Variación de temperaturas ΔT
 $T_{800} = 57.0 \text{ °C}$

Modelo	$T_{MEZ.} (C^\circ)$	$\Delta T (C^\circ)$
A	30.70	26.30
B	31.00	26.00
C	31.20	25.80
D	31.75	25.25

Fuente: Elaboración propia

Con esta información se inicia ubicando el valor recomendado de tiempo de aplicación de la carga a 0.02 seg. unido con el punto de la variación de temperaturas ΔT °C y prolongando el alineamiento hasta el valor del índice de penetración +1.45, siguiendo las curvas en paralelo se ubicó en la intersección con el valor del Stiffness del asfalto dando los siguientes resultados:

Tabla 90: Stiffness o modulo dinámico del asfalto

Modelo	Tiempo de aplicación de la carga 0.02 seg.	
	ΔT (C°)	Stiffness del asfalto (N/m ²)
A	26.30	2.75E+06
B	26.00	2.72E+06
C	25.80	2.69E+06
D	25.25	2.62E+06

Fuente: Elaboración propia

e) Determinación del Stiffness de la mezcla asfáltica

Se utilizó el gráfico de Heukelom, en base a los valores obtenidos anteriormente y adicionando la composición volumétrica de la mezcla asfáltica basados en el método Marshall, se ingresarían los siguientes datos:

- Stiffness del asfalto
- Composición volumétrica según dosificación de la mezcla asfáltica en caliente:

Tabla 91: Dosificación en porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica

Agregados	90.00%
Asfalto	6.00%
Aire	4.00%

Fuente: Expediente técnico de “Pasamayito” EMAPE (2019)

Partiendo del Stiffness del asfalto en intersección con la curva del volumen del asfalto (Vb), proyectando la vertical hasta la intersección con la curva del porcentaje de volumen de agregado (Vg), para trazar la horizontal y obtener el Stiffness de la mezcla asfáltica:

Tabla 92: Módulo dinámico de la mezcla asfáltica

Modelo	Stiffness del asfalto (N/m ²)	Stiffness de la mezcla (N/m ²)
A	2.75E+06	1.81E+09
B	2.72E+06	1.70E+09
C	2.69E+06	1.59E+09
D	2.62E+06	1.46E+09

Fuente: Elaboración propia

f) Identificación del código de rigidez de la mezcla

Se utilizó el gráfico M-1 donde se ubicó el punto de intersección entre el Stiffness de la mezcla y el Stiffness del asfalto, dando como resultado una cercanía bastante notoria a la curva S1, por lo que, queda definida con dicho código.

Tabla 93: Código de la mezcla asfáltica

Modelo	Código de la Mezcla asfáltica
A	M1
B	M1
C	M1
D	M1

Fuente: Elaboración propia

g) Determinación de la deformación máxima admisible específica en tracción de la fibra inferior de la capa asfáltica.

Se determinaron las deformaciones máximas admisibles para el EAL de cada manual, como se muestra a continuación:

Tabla 94: Deformaciones máximas admisibles

Modelo	EAL	ϵ_{FAT}
A	2.01E+07	1.02E-04
B	1.14E+07	1.04E-04
C	9.00E+06	1.06E-04
D	3.85E+06	1.21E-04

Fuente: Elaboración propia

h) Determinación del código estructural de la fatiga de la mezcla asfáltica.

Se ingresaron los valores de rigidez de la mezcla asfáltica en intersección con el valor de las respectivas deformaciones a tracción correspondientes a la cantidad de ejes equivalentes de su respectiva fuente.

A continuación, se muestran los resultados para la selección del código estructural de fatiga correspondiente al valor más cercano de dicha intersección:

Tabla 95: Código estructural de fatiga

Modelo	EAL	N _{F1}	N _{F2}	Código resultante
A	2.01E+07	8.50E+08	1.50E+07	F2
B	1.14E+07	8.00E+08	1.20E+07	F2
C	9.00E+06	7.00E+07	1.10E+07	F2
D	3.85E+06	9.00E+07	8.00E+06	F2

Fuente: Elaboración propia

i) Identificación del código resultante de la mezcla

En la Tabla 96 se observa el código de la mezcla asfáltica para cada cantidad de ejes equivalentes. Teniendo en cuenta que el valor de penetración obtenido es de 65 se toma el valor de 50 por ser la opción más cercana del método mecanicista SHELL:

Tabla 96: Código resultante de la mezcla asfáltica

Manual/guía de diseño de pavimentos flexibles	Código resultante
Exp. Técnico	S1-F2-50
AASHTO	S1-F2-50
Bajo Volumen	S1-F2-50
Austroroads	S1-F2-50

Fuente: Elaboración propia

5.6 Aplicación del software Bisar

En primera instancia, para la aplicación del software Bisar, se requiere de la siguiente información antes calculada:

a) Módulo de resiliencia de las capas que conforman el pavimento

- Módulo resiliente de la carpeta asfáltica obtenido de los ábacos del método Shell.

Tabla 97: Módulo Resiliente de la carpeta asfáltica

Modelo	Espesor de Carpeta Asfáltica (cm)	M _R (N/m ²)	M _R (MPa)
A	15.0	1.81E+09	1.81E+03
B	12.0	1.70E+09	1.70E+03
C	11.0	1.59E+09	1.59E+03
D	9.0	1.46E+09	1.46E+03

Fuente: Elaboración propia

- Módulo resiliente de las capas granulares (base y sub base)

Tabla 98: Módulo Resiliente de las capas granulares

Capa	CBR (%)	M _R (N/m ²)	M _R (MPa)
Base	100	1.00E+09	1.00E+03
Sub base	40	4.00E+08	4.00E+02

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de las capas granulares estas se tomaron como un conjunto sumando el espesor total de la capa base y sub base, lo que conlleva al cálculo del módulo resiliente compuesto de ambas capas granulares en unidades de mega pascales (MPa), necesario para la introducción de los datos en el software Bisar.

En la Tabla 99 se muestran los resultados para el módulo resiliente compuesto o equivalente:

Tabla 99: Módulo resiliente compuesto de las capas granulares

Modelo	Espesores de las capas del pavimento (m)			Sub Rasante		M _{R comp} (MPa)
	Carpeta asfáltica	Base	Sub Base	M _R (N/m ²)	M _R (MPa)	
A	0.15	0.25	0.20	1.47E+08	1.47E+02	796.83
B	0.12	0.25	0.20	1.47E+08	1.47E+02	796.83
C	0.11	0.25	0.20	1.47E+08	1.47E+02	796.83
D	0.09	0.20	0.20	1.51E+08	1.51E+02	700.00

Fuente: Elaboración propia

Se aplico el método Shell mediante su software Bisar en base a los datos respecto a las propiedades del pavimento flexible, dando como resultado las siguientes deformaciones:

Tabla 100: Deformación Unitaria por tracción y por compresión resultantes del Bisar

Modelo	Deformación Unitaria en Tracción ϵ_T	Deformación Unitaria en Compresión ϵ_V
A	1.38E-04	1.40E-04
B	1.37E-04	1.54E-04
C	1.41E-04	1.60E-04
D	1.41E-04	2.11E-04

Fuente: Resultados del software Bisar aplicando el método mecanicista Shell

Los porcentajes de desempeño en términos de deformaciones unitarias tanto en tracción como en compresión entre los valores obtenidos de las fórmulas de Shell y de los resultados del programa Bisar, son los que se muestran a continuación:

Tabla 101: Deformación Unitaria por tracción y por compresión resultantes del Bisar

Modelo	De las fórmulas de SHELL		Comparación con BISAR	
	Deformación Unitaria en Tracción ϵ_T	Deformación Unitaria en Compresión ϵ_V	Desempeño en Tracción	Desempeño en compresión
A	1.70E-04	2.75E-04	81.12%	51.08%
B	1.95E-04	3.35E-04	70.44%	45.95%
C	2.10E-04	3.56E-04	67.18%	44.89%
D	2.56E-04	4.64E-04	55.00%	45.47%

Fuente: Resultados del software Bisar aplicando el método mecanicista Shell

Con los valores de la Tabla 100, se aplicó la ecuación de relación de la deformación unitaria y la cantidad de ejes equivalentes, podremos definir si los espesores ingresados son suficientes para soportar el tráfico de diseño de la vía, como se muestra a continuación:

Tabla 102: Resumen de resultados de Ejes Equivalentes según su deformación

Modelo	Número de Ejes Equivalentes admisibles	
	Tracción	Compresión
A	5.72E+07	2.95E+08
B	6.57E+07	2.56E+08
C	6.58E+07	2.22E+08
D	7.65E+07	9.01E+07

Fuente: Elaboración Propia

Mediante las ecuaciones señaladas en el marco teórico para la aplicación del método mecanicista Shell, se convirtieron los valores de las deformaciones unitarias obtenidas con el software bisar en ejes equivalentes, tanto para compresión como para tracción, así mismo, estos muestran un desempeño mucho más alto en términos de ejes equivalentes, como se muestra en la Tabla 103:

Tabla 103: Comparación del ESAL de diseño con los resultados del software Bisar

Modelo	Número de Ejes Equivalentes admisibles en Tracción		Desempeño en Tracción
	Diseño	Bisar	
A	2.01E+07	5.72E+07	285%
B	1.14E+07	6.57E+07	>300%
C	9.00E+06	6.58E+07	>300%
D	3.85E+06	7.65E+07	>300%

Fuente: Elaboración propia

Conversión de deformaciones en compresión a ejes equivalentes de 8.2 ton y comparación con los ejes equivalentes de diseño.

Tabla 104: Comparación del ESAL de diseño con los resultados del software Bisar

Modelo	Número de Ejes Equivalentes admisibles en Compresión		Desempeño en Compresión
	Diseño	Bisar	
A	2.01E+07	2.95E+08	>300%
B	1.14E+07	2.56E+08	>300%
C	9.00E+06	2.22E+08	>300%
D	3.85E+06	9.01E+07	>300%

Fuente: Elaboración propia

Para ambos casos los valores de desempeño en términos de ejes equivalentes resultan elevados, por lo que se procedió a optimizar reduciendo los espesores de

las capas granulares y del concreto asfáltico con la siguiente información de entrada mostrada en la Tabla 105:

Tabla 105: Primera propuesta de espesores y resultado de deformaciones del pavimento

MODELO	Espesores de las capas del pavimento (m)			Sub Rasante		M_R combinado (MPa)
	Carpeta asfáltica	Base	Sub Base	M_R (N/m ²)	M_R (MPa)	
A	0.10	0.15	0.15	1.51E+08	1.51E+02	700.00
B	0.10	0.15	0.10	1.51E+08	1.51E+02	862.86
C	0.08	0.15	0.15	1.51E+08	1.51E+02	700.00
D	0.05	0.25	0.00	1.51E+08	1.51E+02	1000.00

Fuente: Elaboración propia

Dando como resultado las siguientes deformaciones unitarias en tracción y en compresión mostradas en la Tabla 106:

Tabla 106: Deformaciones unitarias resultantes del programa bisar

Modelo	Deformación Unitaria en Tracción ϵ_T	Deformación Unitaria en Compresión ϵ_V
A	1.39E-04	2.67E-04
B	1.39E-04	2.67E-04
C	1.34E-04	2.87E-04
D	8.95E-05	2.90E-04

Fuente: Elaboración propia

Comparamos los valores de deformaciones obtenidas mediante las fórmulas del método mecanicista Shell y el obtenido del software Bisar:

Tabla 107: Comparación de deformaciones unitarias halladas con fórmulas y con el software Bisar

Modelo	De las fórmulas de SHELL		Comparación con bisar	
	Deformación Unitaria en Tracción ϵ_T	Deformación Unitaria en Compresión ϵ_V	DESEMPEÑO EN TRACCIÓN	DESEMPEÑO EN COMPRESIÓN
A	1.81E-04	2.75E-04	76.63%	97.24%
B	2.16E-04	3.35E-04	64.25%	79.71%
C	2.26E-04	3.56E-04	59.34%	80.70%
D	2.70E-04	4.64E-04	33.11%	62.51%

Fuente: Elaboración propia

Se convirtieron los valores de deformaciones unitarias a unidades de ejes equivalentes tanto como para tracción como para compresión:

Tabla 108: EE8.2 resultantes de la conversión de deformaciones unitarias del software Bisar

Modelo	Número de Ejes Equivalentes admisibles	
	Tracción	Compresión
A	7.61E+07	2.25E+07
B	1.04E+08	2.82E+07
C	1.22E+08	2.12E+07
D	9.68E+08	2.52E+07

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran las comparaciones entre los ejes equivalentes de diseño y los obtenidos con el software Bisar:

Tabla 109: Comparación de EE8.2 resultantes en tracción

Modelo	Número de Ejes Equivalentes admisibles en Tracción		Desempeño en Tracción
	Diseño	Bisar	
A	2.01E+07	7.61E+07	>300%
B	1.14E+07	1.04E+08	>300%
C	9.00E+06	1.22E+08	>300%
D	3.85E+06	9.68E+08	>300%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 110: Comparación de EE8.2 resultantes en compresión

Modelo	Número de Ejes Equivalentes admisibles en Compresión		Desempeño en Compresión
	Diseño	Bisar	
A	2.01E+07	2.25E+07	111.8%
B	1.14E+07	2.82E+07	247.7%
C	9.00E+06	2.12E+07	235.7%
D	3.85E+06	2.52E+07	>300%

Fuente: Elaboración propia

Realizamos una segunda optimización debido a que aún se pueden reducir los espesores de las distintas capas mientras nos acercamos al valor de 100% para seguir cumpliendo con los requerimientos con los siguientes espesores:

Tabla 111: Segunda propuesta de espesores y resultado de deformaciones del pavimento

Modelo	Espesores de las capas del pavimento (m)			Sub Rasante		M_R combinado (MPa)
	Carpeta asfáltica	Base	Sub Base	M_R (N/m ²)	M_R (MPa)	
A	0.08	0.15	0.15	1.51E+08	1.51E+02	700.00
B	0.07	0.15	0.10	1.51E+08	1.51E+02	862.86
C	0.05	0.15	0.10	1.51E+08	1.51E+02	862.86
D	0.05	0.15	0.00	1.51E+08	1.51E+02	1000.00

Fuente: Elaboración propia

Se ingresaron los datos de entrada de la Tabla 111 al software Bisar, de los cuales resultaron los siguientes valores de deformaciones unitarias:

Tabla 112: Deformaciones unitarias resultantes de la segunda optimización

Modelo	Deformación Unitaria en Tracción ϵ_T	Deformación Unitaria en Compresión ϵ_V
A	1.40E-04	2.88E-04
B	1.16E-04	2.67E-04
C	9.12E-05	3.17E-04
D	7.59E-05	3.80E-04

Fuente: Elaboración propia

Realizamos la comparación de deformaciones obtenidas de fórmulas teóricas con las obtenidas del software Bisar.

Tabla 113: Conversión de deformaciones en compresión a ejes equivalentes de 8.2 ton

Modelo	De las fórmulas de SHELL		COMPARACIÓN CON BISAR	
	Deformación Unitaria en Tracción ϵ_T	Deformación Unitaria en Compresión ϵ_V	DESEMPEÑO EN TRACCIÓN	DESEMPEÑO EN COMPRESIÓN
A	1.93E-04	2.75E-04	72.69%	104.81%
B	2.17E-04	3.35E-04	53.70%	79.71%
C	2.28E-04	3.56E-04	39.98%	89.19%
D	2.70E-04	4.64E-04	28.09%	81.87%

Fuente: Elaboración propia

De los valores de deformaciones se procedió a convertir a ejes equivalentes para los nuevos valores de espesores propuestos en la segunda optimización, lo cual, se muestra en la Tabla 114:

Tabla 114: Segunda comparación de EE8.2 resultantes en tracción

Modelo	Número de Ejes Equivalentes admisibles en Tracción		Desempeño en Tracción
	Diseño	Bisar	
A	2.01E+07	9.90E+07	>300%
B	1.14E+07	2.55E+08	>300%
C	9.00E+06	8.81E+08	>300%
D	3.85E+06	2.20E+09	>300%

Fuente: Elaboración propia

Para los ejes equivalentes resultantes de las deformaciones unitarias en compresión se muestran los siguientes valores de desempeño:

Tabla 115: Segunda comparación de EE8.2 resultantes en compresión

Modelo	Número de Ejes Equivalentes admisibles Compresión		Desempeño en Compresión
	Diseño	Bisar	
A	2.01E+07	1.67E+07	82.9%
B	1.14E+07	2.82E+07	247.7%
C	9.00E+06	1.42E+07	158.0%
D	3.85E+06	8.57E+06	222.6%

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los resultados de ejes equivalentes en base a las deformaciones unitarias obtenidas del software Bisar muestran un mayor acercamiento a los valores límites de diseño de los cuatro modelos analizados; ya que, conforme se van reduciendo los espesores de las capas granulares aumentan las deformaciones unitarias en compresión. Por lo, que su desempeño resulta más óptimo ante las solicitudes de tráfico obtenidas de los cuatro modelos.

5.7 Análisis de resultados

- Tráfico vial
 - En la figura N°15 se observa las comparaciones de valores de factor camión del expediente técnico, los manuales internacionales y el Manual de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, visualizando que el factor camión del expediente es más alto en los tres tipos de vehículos pesados B2, C2 y C3, y lo más bajos y similares valores son el Manual de Austroads y el Manual de South África.
 - En la figura N°16 se ve las comparaciones de valores de factor camión del tipo de vehículo pesado B2, en la cual se visualiza que hay similitud entre el Manual de AASHTO, el Manual de Brasil y el Manual de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito; también lo hay con valores menores para el Manual de Colombia, el manual de Austroads y el Manual de South África.
 - En figura N°17 se visualiza los valores de factor camión del tipo de vehículo pesado C2, en la cual se visualiza que hay similitud entre Manual de AASHTO, el Manual de Brasil, el Manual de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito y el Manual de Colombia; de la misma manera en menor proporción para el Manual de Austroads y el Manual de South África.
 - En figura N°18 observamos una variación con las similitudes de los valores de factor camión del tipo de vehículo C3, teniendo una semejanza entre el expediente técnico, el Manual de Brasil y el Manual de Colombia, por otro lado, tenemos semejanza entre el Manual de AASHTO y el Manual de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, así como entre el manual de Austroads y el Manual de South África.
 - En la tabla N°62 y la figura N°19 se visualizan los resultados de ejes equivalentes acumulados proyectados a 20 años, teniendo un elevado valor de EAL para el expediente técnico en comparación con los otros manuales y por ende el menor valor hallado es del Manual de South África.
 - Podemos concluir del análisis del estudio de tráfico que las fuentes consultadas presentan características similares en cuestiones de clasificación vehicular sobre todo en comparación con el vehículo de diseño del expediente técnico analizado. Variando en algunos casos el peso máximo legal permitido por tipo de eje vehicular, lo cual, incide en gran porcentaje al aumento del

factor camión considerado en el cálculo de los ejes equivalentes de diseño del pavimento flexible. Esto debido a las consideraciones en los volúmenes de tráfico y su distribución vehicular en porcentaje en las distintas regiones de origen donde fueron elaboradas. Ya que, según el lugar de aplicación estos porcentajes varían debido distintos factores del entorno. Sin embargo, bajo un consenso de características similares, se optó por la utilización de un valor de factor camión comúnmente usado por países con características similares a las del Perú o guías internas que coinciden con dichos valores o se acercan notablemente, como la guía de diseño de pavimentos de bajo volumen, y la guía de diseño de pavimentos de AASHTO 93, entre otros.

- Estudio de suelos
 - En la tabla N°67 se observa la nueva categoría por la subrasante en función del CBR, obteniendo 44.44% subrasante excelente, 5.56% muy buena y 50.00% buena.
 - En la tabla N°69 se visualiza la sectorización por tipo de material uniformizando el sector 3 y 4 del expediente técnico en el sector 3 para nuestro análisis debido a su conformación de material granular.
 - En la tabla N°70 se sectoriza por tramos homogéneos por el CBR menor y por el tipo de material hallado, obteniendo el mayor valor en el sector 2 debido a la presencia de rocas en la profundidad de aproximadamente 1m.
 - La nueva sectorización resultante de la aplicación del método de CBR que indica el Manual de Carreteras sección suelos y pavimentos del MTC (2014), es similar a la sectorización obtenida del método de las Diferencias Acumuladas de AASHTO 93, y considerando el valor de CBR resultante de la correlación con el módulo dinámico o módulo resiliente de la subrasante obtenido de los estudios geofísicos en el sector II. En tal sentido, resulta conveniente la utilización de los valores de CBR obtenidos para el sector I con $CBR = 14.7 \%$, sector II con $CBR=36.12\%$ y para el sector III $CBR=15.05\%$, para su utilización en los métodos de diseño empírico mecanicista AASHTO 93 y método mecanicista Shell.

- Método AASHTO 93 y método SHELL
 - El parámetro de entrada tráfico expresado en número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 toneladas es el mismo valor tanto como para el método AASHTO y el método SHELL.
 - Para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante, el Manual de Carreteras basado en AASHTO, obtiene este valor por correlación con CBR, lo cual para este método lo utiliza con la unidad de PSI; mientras que según la Tabla N°87, el método SHELL halla valores de módulo resiliente muy elevados en comparación a AASHTO.
 - Los datos estadísticos como la confiabilidad, desviación estándar y la serviciabilidad son parámetros que se obtienen a partir del valor de EAL solamente para la metodología AASHTO, estos no son requeridos para el método SHELL. Sin embargo, para el método Shell el porcentaje de confiabilidad tiene asignado un coeficiente que sirve para determinar el valor de la deformación vertical en compresión de las capas granulares.
 - Respecto al parámetro clima, AASHTO considera la calidad del drenaje en base al tiempo en que tarda el agua en ser evacuado para así obtener un coeficiente de drenaje de las capas granulares de base y subbase, por otro lado, el método SHELL considera la temperatura media anual del aire en la zona para el diseño del pavimento.
 - En la determinación de espesores del pavimento, se halló el número estructural como indicador que satisface los parámetros del método AASHTO, en cambio el indicador para el método SHELL es la deformación unitaria obtenida para la carpeta asfáltica y las capas granulares.
 - El método mecanicista Shell se empleó de manera manual mediante los gráficos, ábacos, y nomogramas para hallar los factores determinantes en su proceso de diseño, tal como, la rigidez de la mezcla asfáltica y las deformaciones unitarias admisibles en tracción y compresión resultantes de sus ecuaciones. Lo cual se utilizó para la aplicación del método mecanicista Shell mediante su software Bisar 3.0, en tal sentido se pudo comparar el valor obtenido de las deformaciones de las ecuaciones y las resultantes del software.
 - En el proceso de diseño estructural de del método Shell para la determinación de los espesores del pavimento no es recomendable la utilización de los gráficos típicos que presentan valores mínimos de CBR como 2% y 5% para

la sub rasante; ya que, en el caso de aplicación en zonas con CBR de sub rasante categorizados como buenos y muy buenos con CBR mayores a 10% y 20% resulta contraproducente, al no satisfacer los requerimientos de deformaciones en tracción máximas admisibles con los espesores propuestos por el método empírico mecanicista AASHTO 93.

- La aplicación del software Bisar en base a los espesores del pavimento resultante del método AASHTO 93 y a sus propiedades de las capas que la componen dieron como resultado mayores valores de deformaciones unitarias admisibles en tracción y en compresión, lo que se traduce en que soportará una mayor cantidad de fatiga causada por el paso de los vehículos en términos de ejes equivalentes de 8.2 ton.

Tabla 116: Desempeño del pavimento según los métodos empírico mecanicista AASHTO 93 y mecanicista Shell

M O D E L O	Método AASHTO 93				Método Shell (Bisar)			
	Periodo de diseño igual 20 años				Deformación unitaria	Desempeño de vida útil		
	Carpeta asfáltica (cm)	Base granular (cm)	Sub Base granular (cm)	Espesor total del pavimento (cm)	Carpeta asfáltica	Base granular	Carpeta asfáltica	Base granular
A	15	25	20	60	1.38E-04	1.40E-04	123%	196%
B	12	25	20	57	1.37E-04	1.54E-04	142%	218%
C	11	25	20	56	1.41E-04	1.60E-04	149%	223%
D	9	20	20	49	1.41E-04	2.11E-04	182%	220%

Fuente: Elaboración propia.

- La evaluación de los resultados indicó que es posible reducir los espesores de las distintas capas que conforma el pavimento ya que superan el 100% para el cual fue diseñado, de tal manera que se cumplan con los requerimientos de deformaciones máximas admisibles del método mecanicista Shell, a fin de optimizar los materiales granulares en la construcción de la carretera.

5.8 Contratación de hipótesis

5.8.1 Hipótesis secundaria 1

H11: Revisando las consideraciones del estudio de tráfico se determina la estructura del pavimento en los modelos empírico mecanicista AASHTO 93 y mecanicista SHELL de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima.

H01: Revisando las consideraciones del estudio de tráfico no se determina la estructura del pavimento en los modelos empírico mecanicista AASHTO 93 y mecanicista SHELL de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima.

De lo efectuado en el capítulo V, inciso 5.2, se analizó la clasificación vehicular para los vehículos B2, C2 y C3 y se estandariza para ser aplicado en cada modelo. Los FC varían para cada modelo, siendo similares entre el Manual de Caminos Pavimentados de Bajo Volumen de Tránsito y el Manual de Colombia, y el del proyecto es aproximadamente el doble del Manual de AASHTO. Aplicando los FC del Manual de caminos pavimentados de bajo volumen se obtiene un valor intermedio.

Se calculo los EAL según cada modelo y se compararon resultando el modelo South África el más bajo y similar a Austroads. Los más altos fueron el proyecto con ASSHTO y el modelo de Colombia con el modelo de Bajo Volumen de Tránsito.

De acuerdo al inciso 5.4, se concluye que los valores de ejes equivalentes acumulados obtenidos para cada manual influyeron en el cálculo de número estructural requerido a través de la metodología AASHTO, obteniendo una variación de 0.5 entre los valores de SN requerido del expediente técnico, el Manual de Caminos Pavimentados de Bajo Volumen de Tránsito y el Manual de Austroads. Es decir, que según la Tabla 84, en los espesores hallados, se obtiene una diferencia de 2cm en promedio de la carpeta asfáltica.

Según el inciso 5.5, se concluye que el parámetro tráfico, para la metodología SHELL, permitió analizar las deformaciones unitarias en tracción y compresión obteniendo que el número de ejes equivalentes admisibles que soporta el pavimento son mayores que los hallados a través de AASHTO. Es decir, que

para la metodología SHELL, se tiene que disminuir los espesores de pavimento para igualar el mismo valor de ejes equivalentes.

Según Huamán Román y Sunción Saavedra (2020), los valores de factor camión que se han utilizado por tipo de vehículo tienden a ser elevados hasta un máximo de 6.793 para Camión C2, comparados con normas extranjeras de países como Estados Unidos, Australia, Colombia, Sudáfrica e incluso algunos expedientes están por encima de valores propuestos por el Manual de caminos pavimentados de bajo volumen de tránsito del MTC según el vehículo pesado característico.

En consecuencia, las consideraciones de tráfico permiten determinar la estructura del pavimento aplicando los métodos empírico mecanicista AASHTO 93 y mecanicista SHELL.

Por lo tanto, se valida la hipótesis alterna (H11) y se rechaza la hipótesis nula (H01).

5.8.2 Hipótesis secundaria 2

H12: Revisando las consideraciones del estudio de suelos se determina la estructura del pavimento en los modelos empírico mecanicista AASHTO 93 y mecanicista SHELL de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima.

H02: Revisando las consideraciones del estudio de suelos no se determina la estructura del pavimento en los modelos empírico mecanicista AASHTO 93 y mecanicista SHELL de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima.

De lo presentado en el capítulo V, inciso 5.3, respecto al estudio de suelos, se analizó los ensayos realizados por método de refracción sísmica y por el método MASW desde la progresiva 1+680 hasta la 4+020 para la selección del menor CBR en la sectorización, encontrando que solo el menor valor de módulo de elasticidad es diferente al comprobarlo y para los demás nos salió el mismo valor. De esta manera obtuvimos un nuevo valor CBR, 36.12%, y una nueva sectorización de suelos.

De acuerdo al inciso 5.4, se concluye que según la Tabla 82 en la metodología AASHTO, se obtiene un menor número estructural requerido en el sector 2 por

la presencia de un mayor módulo resiliente. Es decir, que para este sector la estructura de pavimento disminuye, reduciendo para nuestro caso solamente la subbase en un aproximado de 15cm para manuales.

Según el inciso 5.6, se analiza en conjunto los módulos resilientes en MPA y los espesores de las capas obtenidas en AASHTO para la aplicación del software Bisar, obteniendo como resultado mayores valores de ejes equivalentes para la metodología empírica mecanicista.

Según Mendoza Torres (2019), concluyó que al identificar los parámetros de diseño del método SHELL, se calculan las deformaciones del pavimento, generando como respuesta las deformaciones unitarias a tracción y compresión bajo la carpeta asfáltica y sobre la subrasante del pavimento respectivamente.

Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos a través de la nueva consideración en el estudio de suelo, se valida la hipótesis alterna (H12) y se rechaza la a la hipótesis nula (H02).

5.8.3 Hipótesis secundaria 3

H13: Aplicando el método empírico mecanicista AASHTO 93 y el método mecanicista SHELL se valida la estructura del pavimento en la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima.

H03: Aplicando el método empírico mecanicista AASHTO 93 y el método mecanicista SHELL no se valida la estructura del pavimento en la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima.

De lo presentado en el capítulo V, concluye que la evaluación por el método Shell valida el diseño de pavimento AASHTO 93 confirmando un buen desempeño en su periodo de proyección, además observa un sobredimensionamiento en las capas granulares, en un aproximado de 15cm.

Según Olivas, R. (2016), en el desarrollo de su investigación diseña un pavimento flexible a partir de la metodología AASHTO 93, posterior al diseño define parámetros de diseño complementarios del método SHELL. El autor complementa ambos métodos para analizar el comportamiento de su diseño propuesto por AASHTO 93, logrando así un diseño de la estructura de pavimento óptimo para el periodo de vida establecido.

Según Mendoza Torres (2019), determina la relación de parámetros que existe entre los métodos AASHTO 93 y SHELL para finalmente optimizar el espesor de las capas granulares de los pavimentos flexibles.

En consecuencia, se valida la hipótesis alterna (H13) y se rechaza la a la hipótesis nula (H03).

El método de diseño empírico mecanicista AASHTO 93 se valida a través del análisis con el método mecanicista SHELL habiéndose determinado que el FC de distintos modelos influyó en la comparación de las consideraciones de tráfico para similares condiciones de suelo y sectorización, determinado y validando también la estructura del pavimento diseñado para cada modelo.

Por lo tanto, se valida la hipótesis general.

CONCLUSIONES

1. Se concluyó que al identificar la consideración de factor camión utilizada en el expediente técnico para los tipos de vehículos pesados, estos valores son muy elevados, debido a que están basados de acuerdo con el Manual de Carreteras, sección Suelos y Pavimentos del MTC (2014), lo cual considera que estos vehículos están en su carga máxima durante todo el periodo del pavimento, teniendo un valor de 6.125 para el vehículo C2 en comparación con normas extranjeras de países como Estados Unidos (3.477), Colombia (2.290), Australia (1.176), Sudáfrica (1.00) e incluso el Manual de Bajo Volumen de Tránsito (2.75).
2. Se concluyó que, al analizar la sectorización del expediente técnico, se halló una nueva sectorización basada solamente en el tipo de material del perfil estratigráfico y el CBR para cada tramo de la vía Pasamayito, en base a los cuales se calculó los módulos resilientes finales, como parámetro de entrada para los diseños de pavimento flexible de las metodologías de AASHTO 93 y SHELL, cuyos valores son similares en términos generales, excepto el tramo 2 que hubo una diferencia de 36% a 29%.
3. Al aplicar el método AASHTO 93 y el método SHELL, se concluyó que la estructura del pavimento cumplirá su periodo de diseño, ya que presenta un elevado FC que no está acorde con el concepto teórico que utilizan otros países.
4. Se validó el método diseño empírico mecanicista AASHTO 93 con el método mecanicista Shell al determinar la estructura del pavimento ya que podrá soportar mayor cantidad de EAL en el periodo de diseño siendo el EAL del método empírico mecanicista AASHTO 93 para el denominado “Modelo A” igual a 1.14×10^7 EE8.2 y el EAL del método mecanicista Shell igual a 5.72×10^7 EE8.2 para las deformaciones admisibles en tracción y de 2.95×10^8 EE8.2 para las deformaciones admisibles en compresión, de tal manera que extiende la vida útil.

RECOMENDACIONES

1. El factor camión incide de manera exponencial en la determinación de la estructura del pavimento, ya que, según el tipo de vehículo pesado, la configuración de sus ejes y la carga máxima legal permitida se causará mayor o menor daño al paquete estructural afectando su vida útil, es por ello que, se recomienda utilizar datos de cargas reales por eje de los vehículos pesados mediante encuestas y censo de cargas con la instrumentación adecuada y debidamente calibrada en la zona de influencia del proyecto, debido a que, según las actividades sociales y económicas que se generan en el entorno los vehículos podrían llevar mayor o menor carga a la permitida en el marco legal, por lo que, considerar que los vehículos pesados transitan con su carga máxima en ambos sentidos conlleva a un posible sobre dimensionamiento del pavimento.
2. Según la importancia del proyecto y en cuanto a su capacidad de carga ante altos volúmenes de tráfico, se recomienda realizar ensayos de módulo resiliente a las capas granulares que conforman la estructura del pavimento tales como base, sub base y sub rasante para obtener valores más exactos de dicho factor, ya que, es parte fundamental en el desarrollo del procedimiento de diseño de las metodologías AASHTO y SHELL.
3. Para la determinar la estructura del pavimento aplicando métodos empírico mecanicistas como AASHTO 93 es necesario verificar si las propiedades físico mecánicas de los materiales que conforman el pavimento son suficientes para garantizar el correcto desempeño durante el periodo de diseño, por lo que, se recomienda implementar las metodologías mecanicistas, como la SHELL, para permitir observar el comportamiento estructural del pavimento y sus deformaciones.
4. El método empírico mecanicista AASHTO 93 para el diseño de pavimentos flexibles se basa en el número estructural resultante, del cual, se establecerán distintas configuraciones de espesores los cuales garantizan que las deformaciones en tracción que se produzcan bajo la carpeta asfáltica estén por debajo del valor máximo admisible, sin embargo, no contempla las deformaciones por compresión debajo de las capas granulares, por ello, se recomienda validar el diseño con metodologías mecanicistas como la SHELL, ya que, además de considerar las deformaciones por

tracción y compresión debajo de la carpeta asfáltica y debajo de las capas granulares respectivamente, considera también los factores ambientales que afectan a la mezcla asfáltica; permitiendo de esta manera optimizar el diseño del pavimento de la metodología AASHTO 93, reduciendo los espesores del pavimento, y por lo tanto el costo del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1993). (n.d.). *Guide for Design of Pavement Structure*. Washington, D.C: Department of the Army.
- Austroroads. (2008). *Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design*. Sidney, Australia.
- Cabrales Contreras, D. (2015). *Ejemplo de Diseño de Pavimento Flexible Bajo Metodología AASHTO 93*. Bogota, Colombia.
- Camargo Zanguña, A. (2020). *Monografía comparación de métodos de diseño y patologías en el pavimento flexible. (Tesis de pregrado)*, Universidad Santo Tomás de Aquino, Facultad de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia.
- Cárdenas Capcha, J. (2018). *Influencia del tráfico vehicular con respecto a las deflexiones de los pavimentos flexibles en zona urbana de la ciudad de Huancayo, Junín – 2017. (Tesis de posgrado)*. Universidad Ricardo Palma, Escuela de Posgrado, Maestría en Ingeniería Vial. Lima, Perú.
- Castro Murcia, A. (2013). *Diseño de pavimento flexible de la carrera 8° entre calles 64 y 67 Barrio Parrales – Torremolino en el Municipio de Ibagué, mediante el uso del método SHELL (Tesis de posgrado)* Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Castro Murcia, A. (2013). *Diseño de pavimento flexible de la carrera 8ª entre calles 64 y 67 barrio parrales -torremolino en el municipio de ibagué, mediante el uso del método shell*. Bogotá, Colombia.
- Committee of State Road Authorities. (1991). *Traffic loading for pavement and rehabilitation design*. Republic of South Africa.
- Departamento Nacional de Infra-Estructura de Transportes. (2006). *Manual de Estudios de Tráfico*. Río de Janeiro, Brasil.
- Escobar, L., & Huincho, J. (2017). *Diseño de pavimento flexible, bajo influencia de parámetros de diseño debido al deterioro del pavimento en Santa Rosa – Sachapite, Huancavelica – 2017*. Universidad Nacional de Huancavelica, Facultad de Ingeniería, Huancavelica, Perú.
- Garzón Garzón, C. (2020). *Evaluación de metodología AASHTO y SHELL para el diseño del pavimento de la vía “Caracoli” que conecta a “La carretera del amor” en Villavicencio – Meta. (Tesis de pregrado)*, Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Civil. Villavicencio, Colombia.

- Higuera Sandoval, C. (2007). *Leyes de Comportamiento de la Deformación Radial Admisible de Tracción en Pavimentos Flexibles*. Turja, Colombia.
- Higuera Sandoval, C. H. (2011). *Nociones sobre Métodos de Diseño de Estructuras de Pavimentos para Carreteras. Volumen 1: Principios Fundamentales, Tránsito, Factores Climáticos y Geotecnia Vial* 1ra Edición. Colombia.
- Huamán, I., & Sunció, C. (2020). *Propuesta de tipo de vehículo característico y su relación con los parámetros de diseño geométrico y de pavimentos en caminos de bajo volumen de tránsito*. Lima, Perú.
- Instituto del Asfalto. (1973). *Manual del Asfalto*. Bilbao, España.
- Mendoza Torres, E. (2019). *Relación entre los métodos de diseño de pavimentos flexible empírico mecanístico ASSHTO 93 y SHELL para determinar la vida útil del pavimento*. Lima.
- Menendez Acurio, J. (2016). *Ingeniería De Pavimentos*. Lima: Instituto De La Construcción Y Gerencia.
- Ministerio De Transporte. (2006). *Manual de estudio de tráfico*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Ministerio de Transporte de Colombia. (2007). *Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para vías con bajos volúmenes de Tránsito*. Colombia.
- Ministerio de Transporte. Instituto Nacional de Vías. (2008). *Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras*. Colombia.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2007). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. Lima: MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008). *Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito*. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*. Lima: MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima: MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018*. Lima, Perú.
- Montejo, A. (2006). *Ingeniería de pavimentos: fundamentos, estudios básicos y diseño*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones (3ra ed.).

- Olivas, R. (2016). *Aplicación de método empírico mecanicista para la evaluación de probables fallas del pavimento flexible diseñado con AASHTO 93 de la rehabilitación urbana Los Anitos – Barranca*. Ancash, Perú.
- Quispe Cabello, L. (2021). *Diseño Vial con los métodos AASHTO-93 y SHELL para mejorar la transitabilidad en el diseño del Tambo – Huancayo, 2020. (Tesis Pregrado)*. Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Lima, Perú.
- Rondón, H., & Reyes, F. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño (1ra ed.)*. Bogotá, Colombia: Editorial Macro.
- Vargas Angarita, N. (2018). *Comparación del diseño calculado mediante método AASHTO 1993 de tramo de la vía paso nacional por Zipaquirá, con respecto a métodos modernos de diseño del manual INVIAS 2016 para medios y altos volúmenes de tránsito. (Tesis de pregrado)*. Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MEDICIÓN	INSTRUMENTOS
¿En qué medida se valida el método empírico mecanístico AASHTO 93 con el método mecanicista Shell para determinar la estructura del pavimento de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima?	Validar el método de diseño empírico mecanístico AASHTO 93 con el método mecanicista Shell para determinar la estructura del pavimento de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima	Validando el método de diseño empírico mecanístico AASHTO 93 con el método mecanicista SHELL se determina la estructura del pavimento de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima	Estructura del pavimento	Espesor capas estructurales	capa asfáltica	Centímetros (cm)	ASSHTO, Coeficiente estructural de cada capa
					capa de base		
					capa subbase		
					capa mejoramiento		
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MEDICIÓN	INSTRUMENTOS
1. ¿Cuáles son las consideraciones del estudio de tráfico en la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima?	Revisar las consideraciones del estudio de tráfico para determinar la estructura del pavimento en los modelos empírico y mecanicista de la ruta vecinal LM-712	Revisando las consideraciones del estudio de tráfico se determina la estructura del pavimento en los modelos empíricomecanístico AASHTO 93 y	Método mecanicista SHELL	TRAFICO	TIPOS DE VEHICULOS	EAL	Estudio de tráfico
					FACTOR CAMION		
					Tasa de crecimiento		
				CAPAS GRANULARES	ESPESOR	cm	
	RESISTENCIA CORTE	MR					

	tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima	mecanicista SHELL de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima			leyes de deformacion	ϵ, σ	textos teoria
				CLIMA	Temperatura	Grados centigrados	SENAMHI
				MEZCLA ASFALTICA	Características de la mezcla asfáltica	Tipo de mezcla asfáltica	Diseño de mezcla
				ESFUERZOS Y DEFORMACIONES	AHUELLAMIENTO SUBRASANTE	MICRO..	SOFTWARE SHELL
2. ¿Cuáles son las consideraciones del estudio de suelos en la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima?	Revisar las consideraciones del estudio de suelos para determinar la estructura del pavimento en los modelos empírico y mecanicista, de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima	Revisando las consideraciones del estudio de suelos se determina la estructura del pavimento en los modelos empírico mecanístico AASHTO 93 y mecanicista SHELL de la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima		TRAFICO			
				SUBRASANTE	Módulo de resiliencia	Psi	ENSAYOS DE SUELOS
				DATOS ESTADISTICOS	Confiableidad Y VARIANZA	%R	Norma de Suelos y Pavimentos MTC
				Perdida De Servicialidad	Índice de serviciabilidad	PSI	Norma de Suelos y Pavimentos MTC
				Numero Estructural	Numero estructural CAPAS	Adimensional	SOFTWARE AASHTO 93
3. ¿Cómo se valida el método empírico mecanístico AASHTO 93 aplicando el modelo mecanicista de Shell?	Aplicar el método empírico mecanístico AASHTO 93 y el método mecanicista Shell para validar la estructura del pavimento en la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima	Aplicando el método empírico mecanístico AASHTO 93 y el método mecanicista SHELL se valida la estructura del pavimento en la ruta vecinal LM-712 tramo: Comas - San Juan de Lurigancho, Lima	Método empírico mecanicistico AASHTO 93				

Anexo 2: Matriz operacional

TIP O	VARIAB LE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSION ES	INDICADORES	MEDICIÓN	INSTRUMEN TO
INDEPENDIENTE	Método mecanicista SHELL y empírico mecanicista AASHTO 93	Plantea a la estructura del pavimento como un sistema multicapa linealmente elástico. Se determinará una combinación de espesores capaz de satisfacer los límites de esfuerzos y deformaciones durante el periodo de diseño del pavimento.	Utilizando como combinación de espesores de diseño a los espesores de pavimento obtenidos mediante el Método AASHTO 93, podremos verificar con el Método SHELL si esta combinación nos dará un comportamiento dentro de los límites admisibles en términos de esfuerzos y deformaciones.	Tráfico	Tipos de vehiculos	EAL	Estudio de tráfico
					Factor Camión		
					Tasa de crecimiento		
				Capas granulares	Espesor	cm	
					Resistencia al corte	MR	
					Leyes de deformación	ϵ, σ	Textos, teoría
				Clima	Temperatura	Grados centígrados	SENAMHI
		Mezcla Asfáltica	Caract. mezcla asfáltica	Tipo mezcla asfált.	Diseño de mezcla		
		Esfuerzos y deformaciones	Ahuellamiento	Micro..	SOFTWARE SHELL		
			Subrasante				
		Tráfico					
		Subrasante	Módulo de resiliencia	EAL	Estudio de tráfico		
		Datos Estadísticos	Confiability y varianza	Psi	Ensayo CBR		
Perdida Servicialidad	Índice de servicialidad	%R	Datos estadísticos				
Número Estructural	Número estructural	Adimensional	Norma de Suelos y Pavimentos MTC				

		que conforman el pavimento			Capas		SOFTWARE AASHTO 93
DEPENDIENTE	Estructura del pavimento	Esta formado por capas de resistencia decreciente con la profundidad. Generalmente se componen de: carpeta de rodamiento, base y subbase apoyado todo este conjunto sobre la subrasante.	Constituido por capas (subbase, base, capa de rodadura) con un espesor determinado y unas condiciones mecánicas de cada capa y del conjunto.	y1: Espesores de capas estructurales	y11: Capa asfáltica	Centímetros (cm)	ASSHTO, Coeficiente estructural de cada capa
					y12: Capa de base		
					y13: Capa Subbase		
					y14: Capa mejoramiento		

Anexo 3: Gráficos de aplicación del Método mecanicista Shell

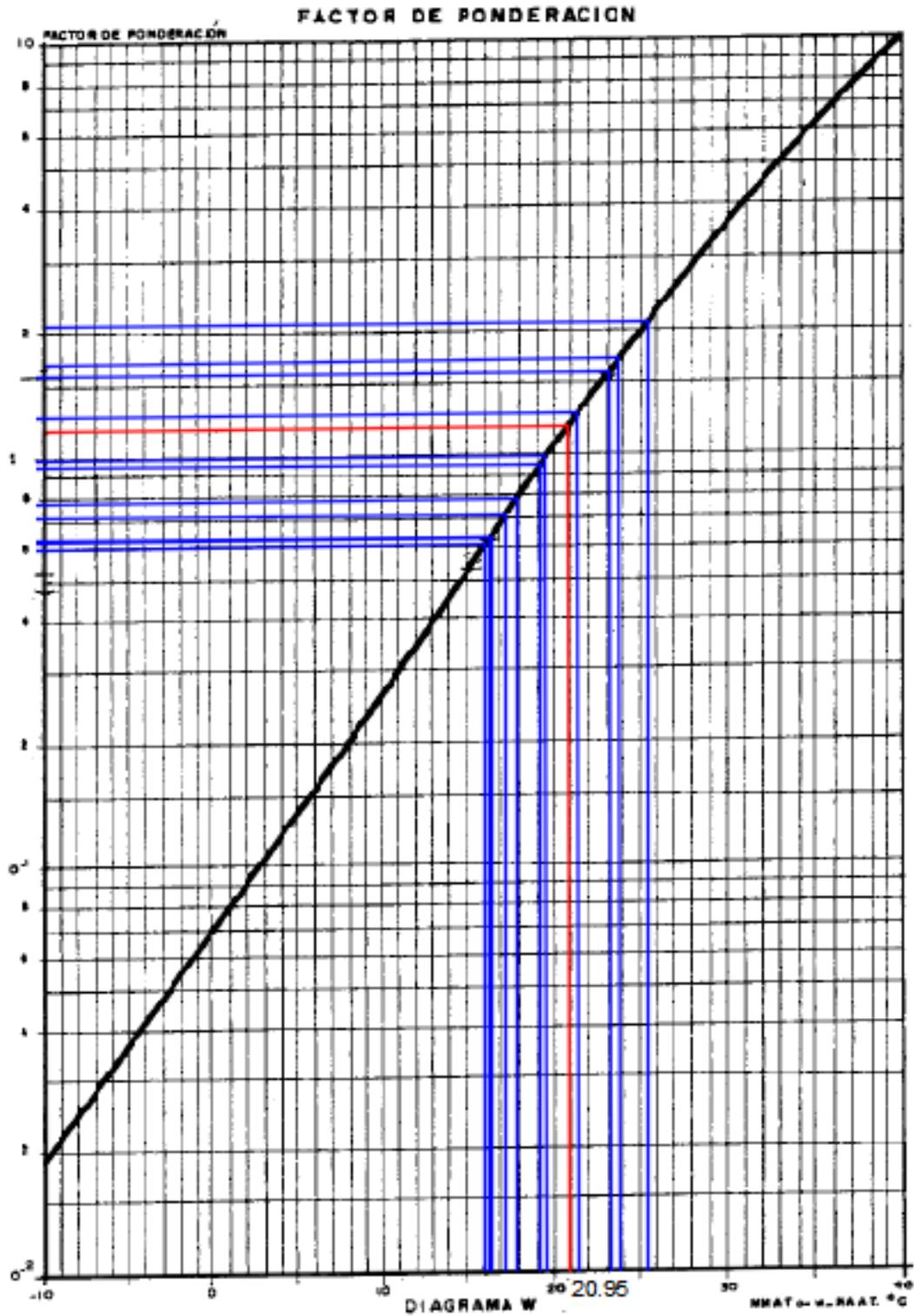
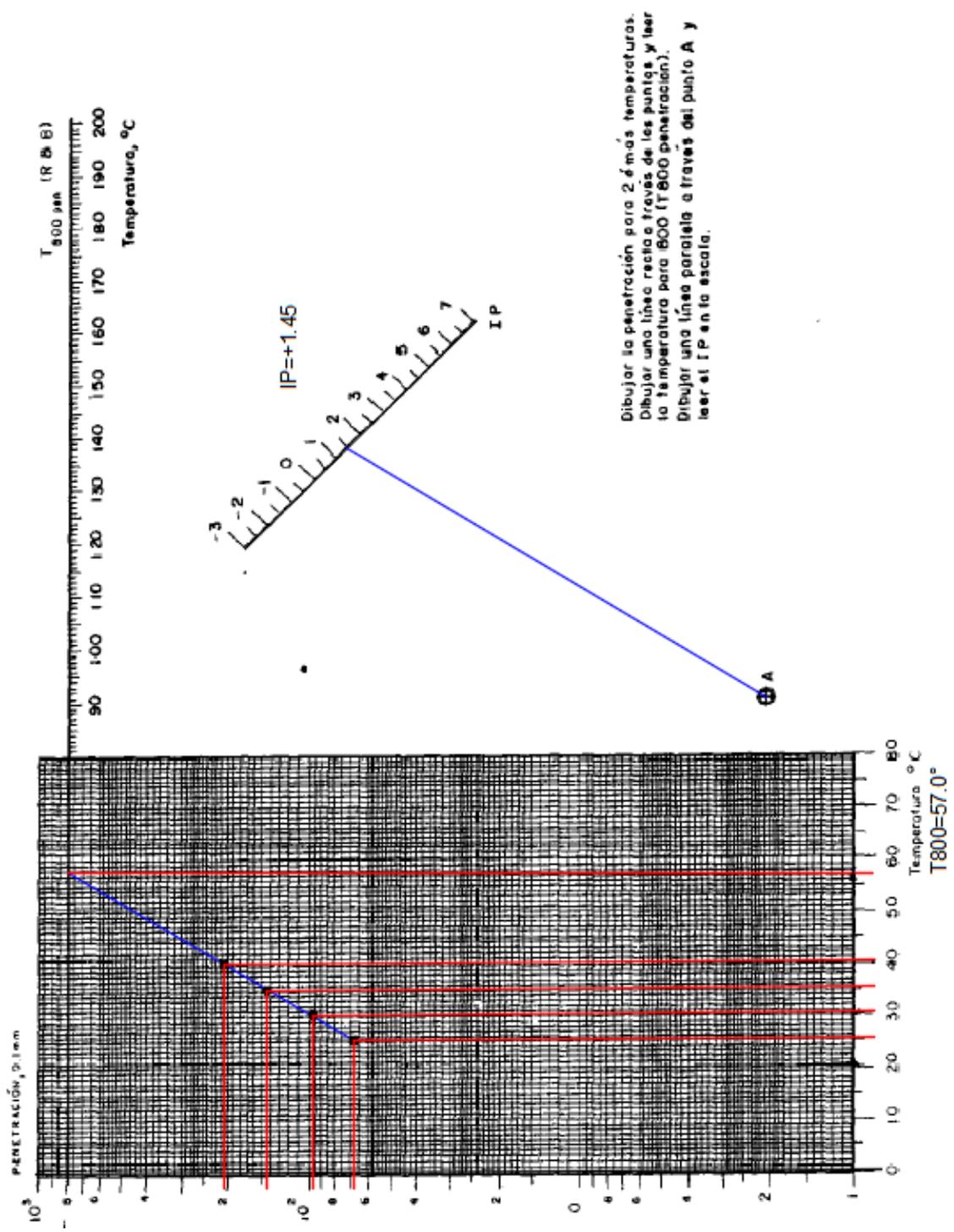


Figura: Curva para determinar el factor de ponderación según la temperatura

Fuente: "Ingeniería de Pavimentos para Carreteras" por Montejo (2002, p. 288)

Resultado: $w\text{-MAAT} = 20.95^\circ$



Dibujar la penetración para 2 ó más temperaturas.
 Dibujar una línea recta a través de los puntos y leer la temperatura para 800 (T₈₀₀ penetración).
 Dibujar una línea paralela a través del punto A y leer el IP en la escala.

Figura: Nomograma para determinar el IP y la T₈₀₀
 Fuente: “Ingeniería de Pavimentos para Carreteras” por Montejo (2002, p. 291)
 Resultado: T₈₀₀ = 57 °C y IP = 1.45

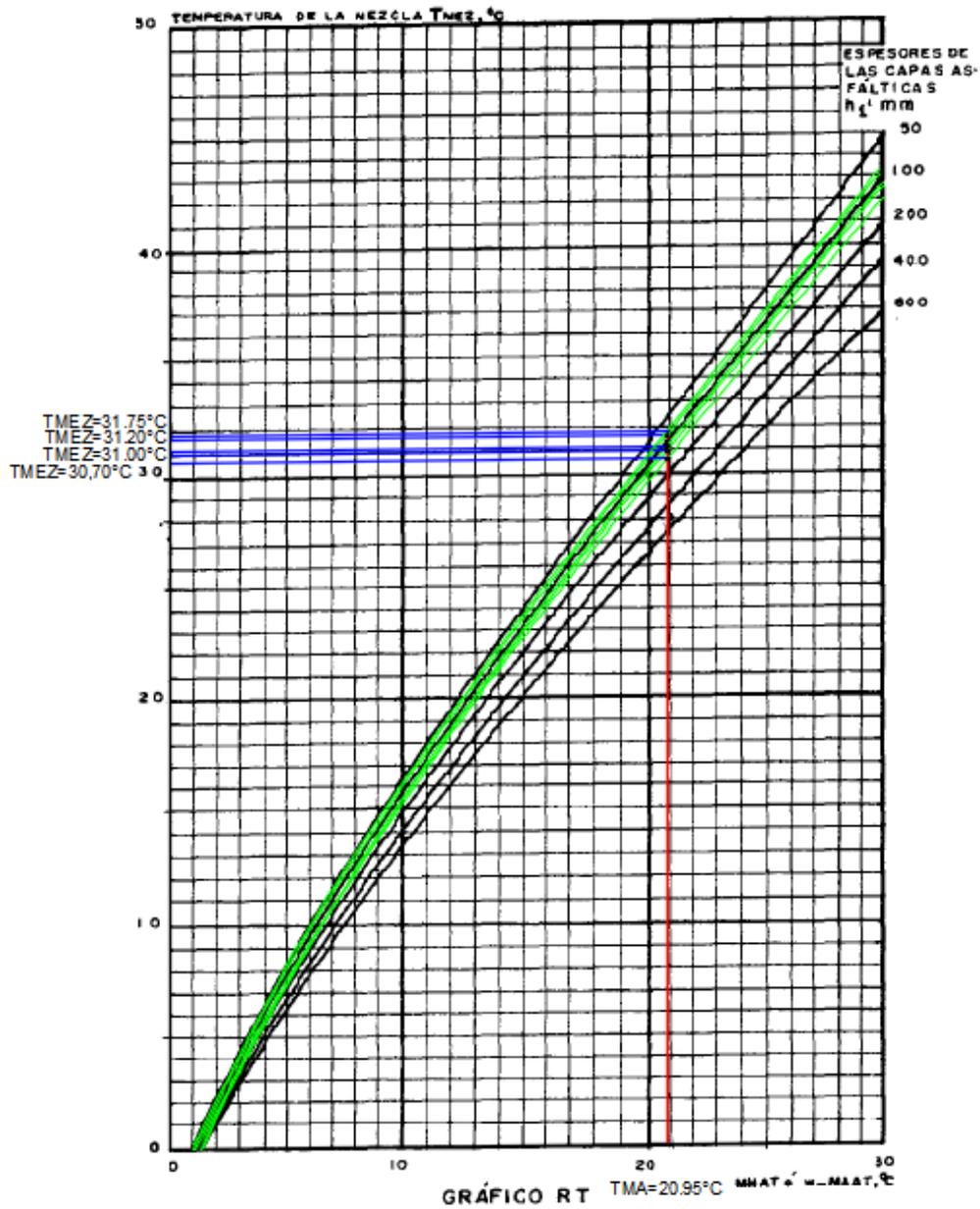


Figura: Relación entre temperatura de la mezcla asfáltica según su espesor y la temperatura media anual o mensual.

Fuente: “Ingeniería de Pavimentos para Carreteras” por Montejó (2002, p. 294)

Resultado: $T_{800} = 57 \text{ °C}$ y $IP = 1.45$

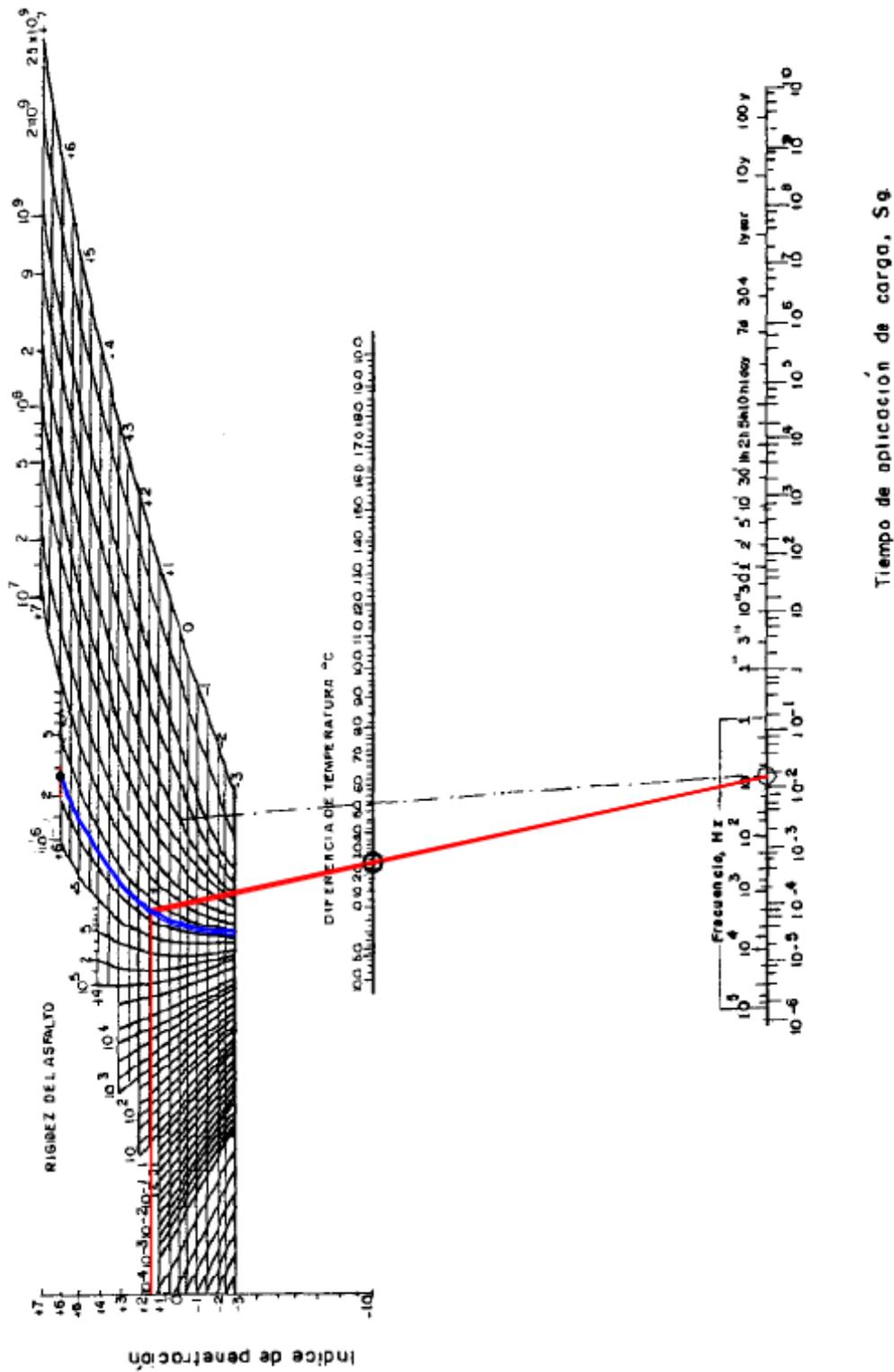


Figura: Nomograma de Van Der Poel para determinar el módulo dinámico del asfalto (Stiffness)

Fuente: “Ingeniería de Pavimentos para Carreteras” por Montejó (2002, p. 293)

Resultado: Stiffness del asfalto A=2.75 B=2.72 C=2.69 D=2.62 (N/m²)

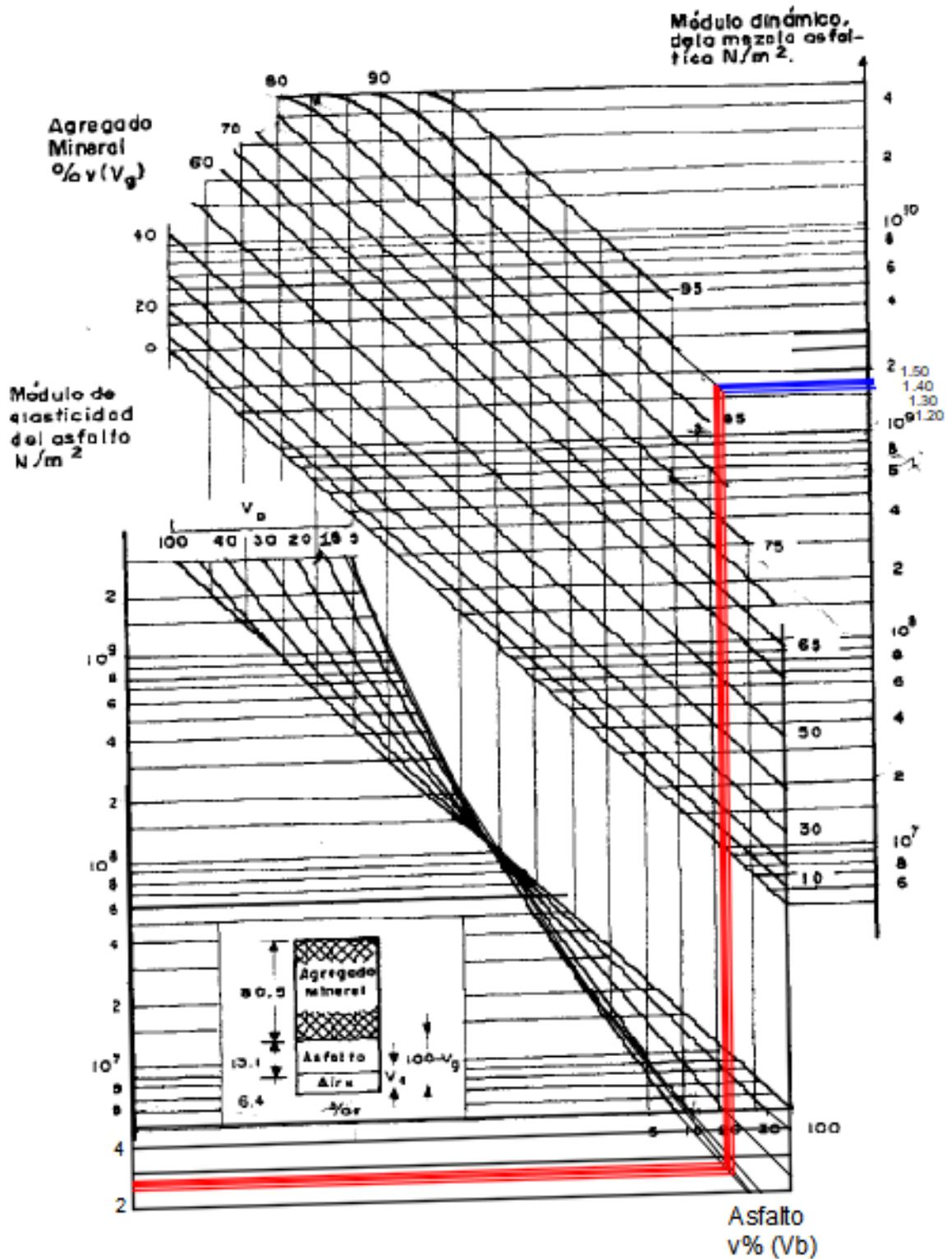


Figura: Nomograma de Van Der Poel para determinar el módulo dinámico del asfalto (Stiffness)

Fuente: "Ingeniería de Pavimentos para Carreteras" por Montejo (2002, p. 295)

Resultado: Stiffness del asfalto A=2.75 B=2.72 C=2.69 D=2.62 (N/m²)

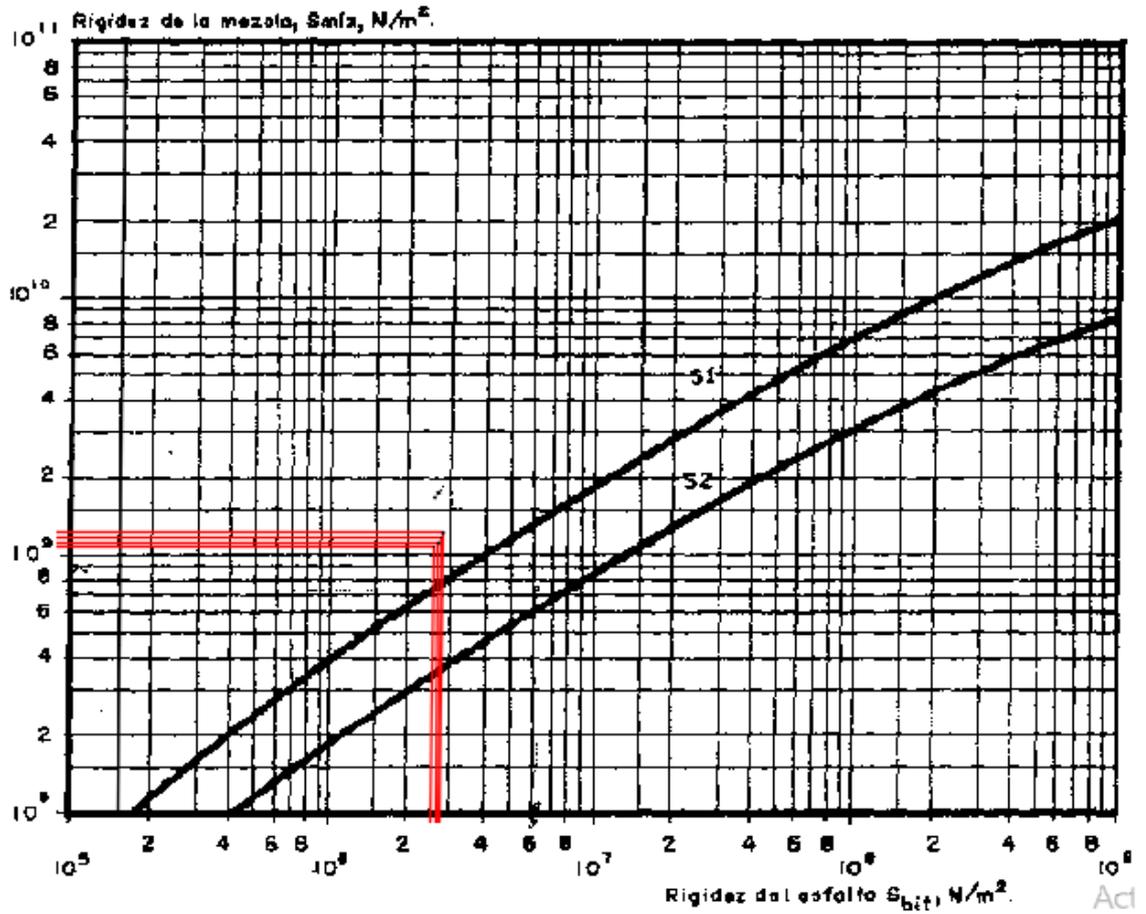


Figura: Relaciones entre la rigidez del asfalto y la rigidez de la mezcla.

Fuente: “Ingeniería de Pavimentos para Carreteras” por Montejo (2002, p. 297)

Resultado: Código de mezcla S1 para los cuatro modelos analizados

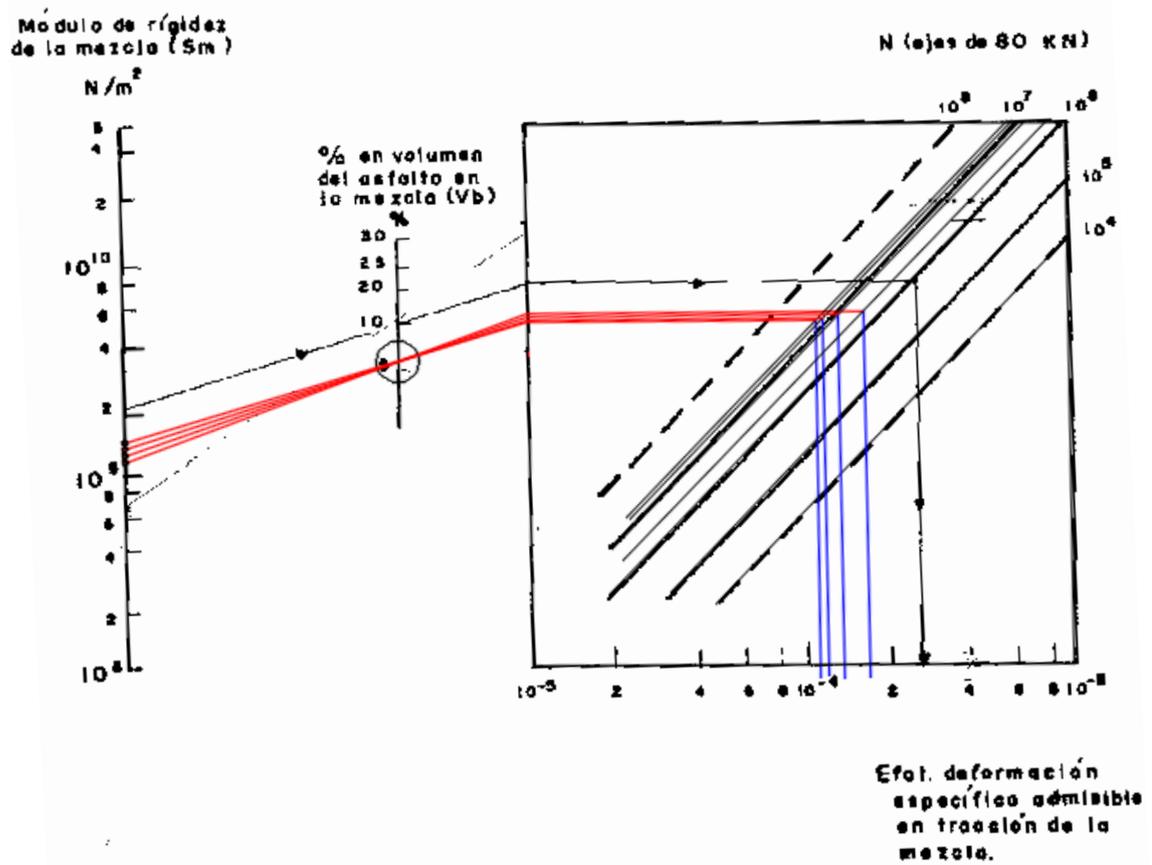


Figura: Nomograma de fatiga para la determinación de la mezcla en función del Stiffness de la mezcla y el volumen de asfalto en la mezcla.

Fuente: "Ingeniería de Pavimentos para Carreteras" por Montejo (2002, p. 298)

Resultado: $A=1.03 \times 10^{-4}$, $B=1.04 \times 10^{-4}$, $C=1.07 \times 10^{-4}$, $D=1.2 \times 10^{-4}$

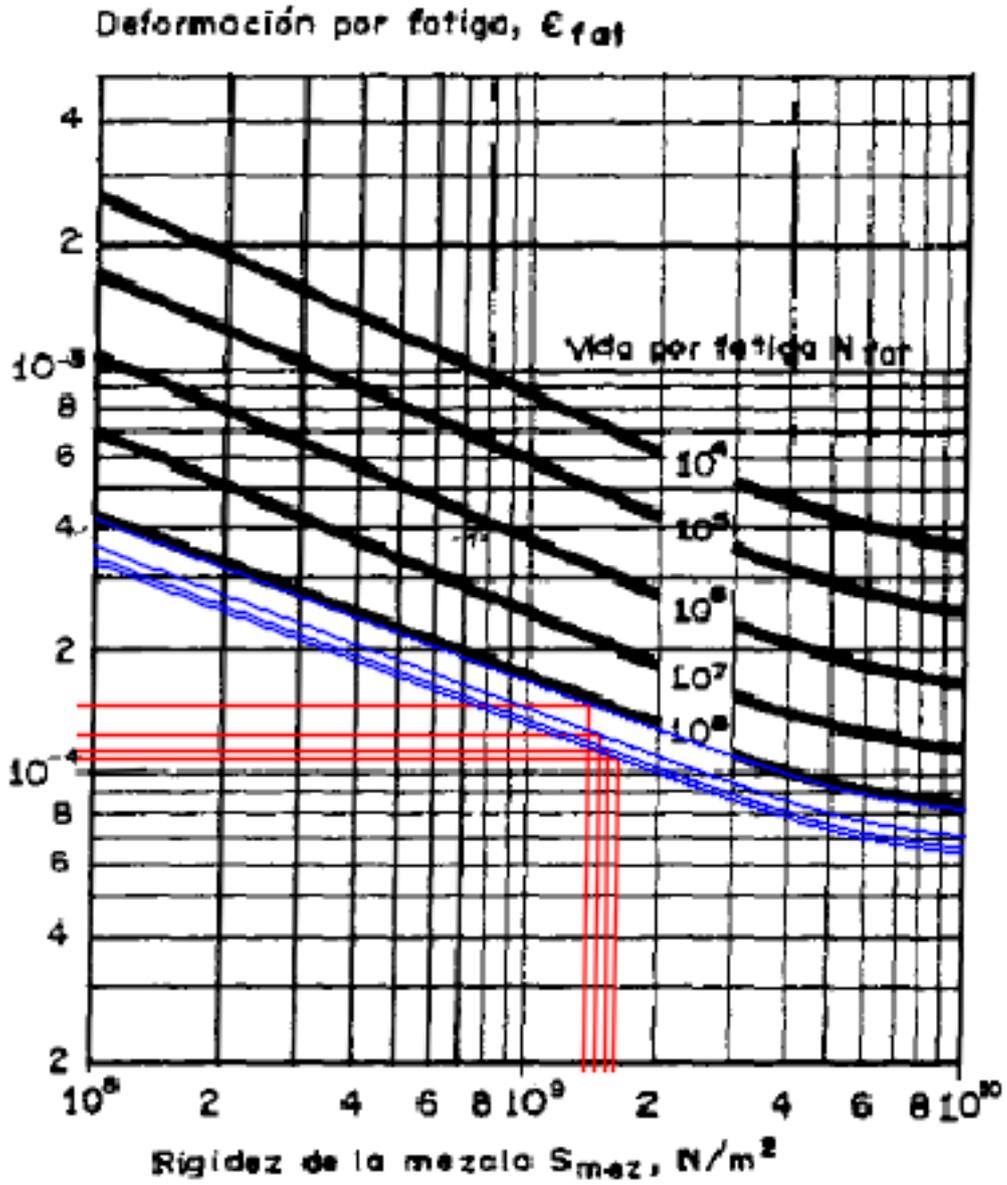


Figura: Características de fatiga F1

Fuente: "Ingeniería de Pavimentos para Carreteras" por Montejo (2002, p. 299)

Resultado: $A=1.65 \times 10^8$, $B=1.60 \times 10^8$, $C=1.40 \times 10^8$, $D=1.02 \times 10^8$

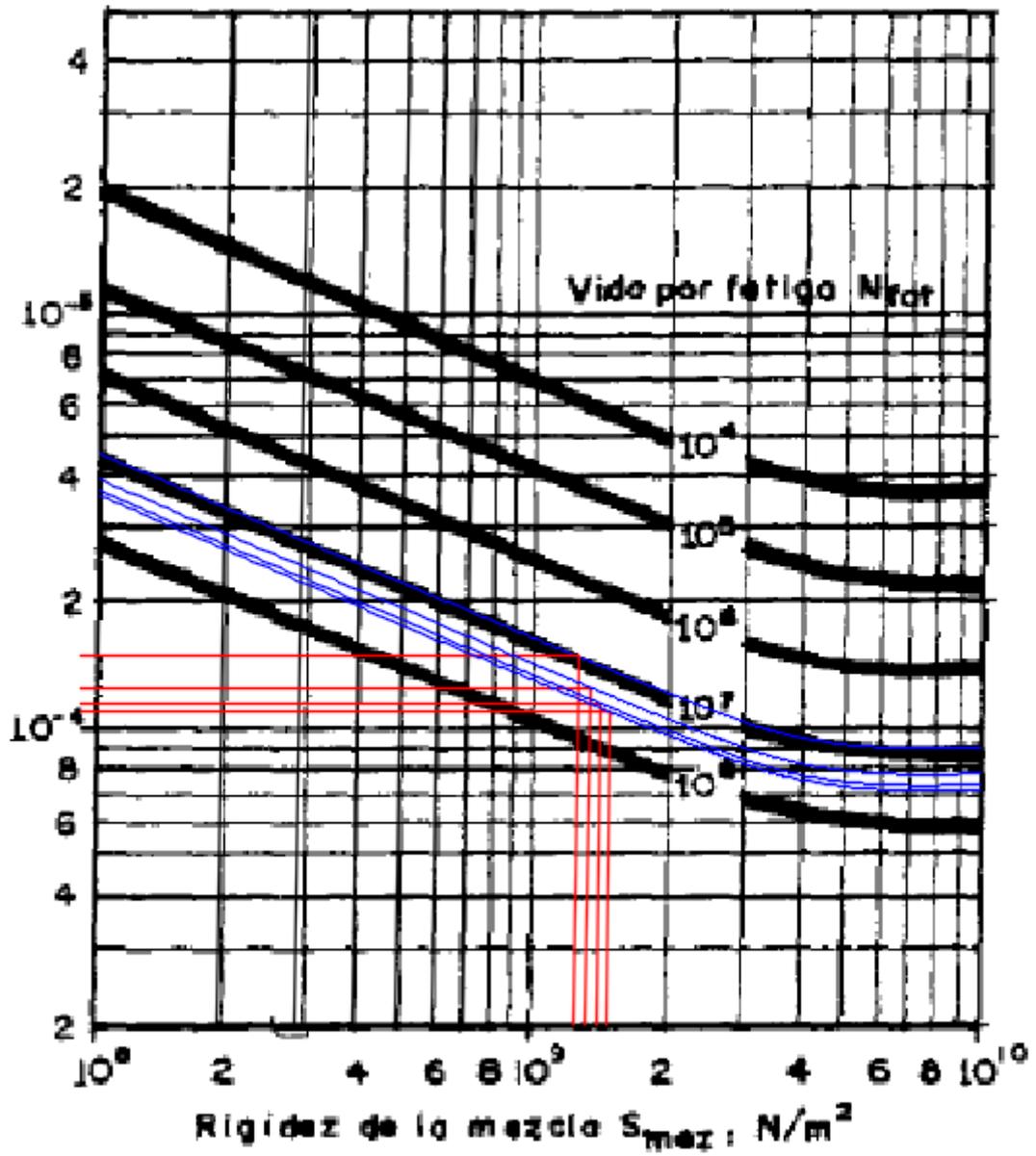


Figura: Características de fatiga F2

Fuente: "Ingeniería de Pavimentos para Carreteras" por Montejo (2002, p. 299)

Resultado: $A=5.5 \times 10^8$, $B=5.0 \times 10^7$, $C=3.0 \times 10^7$, $D=9.95 \times 10^6$

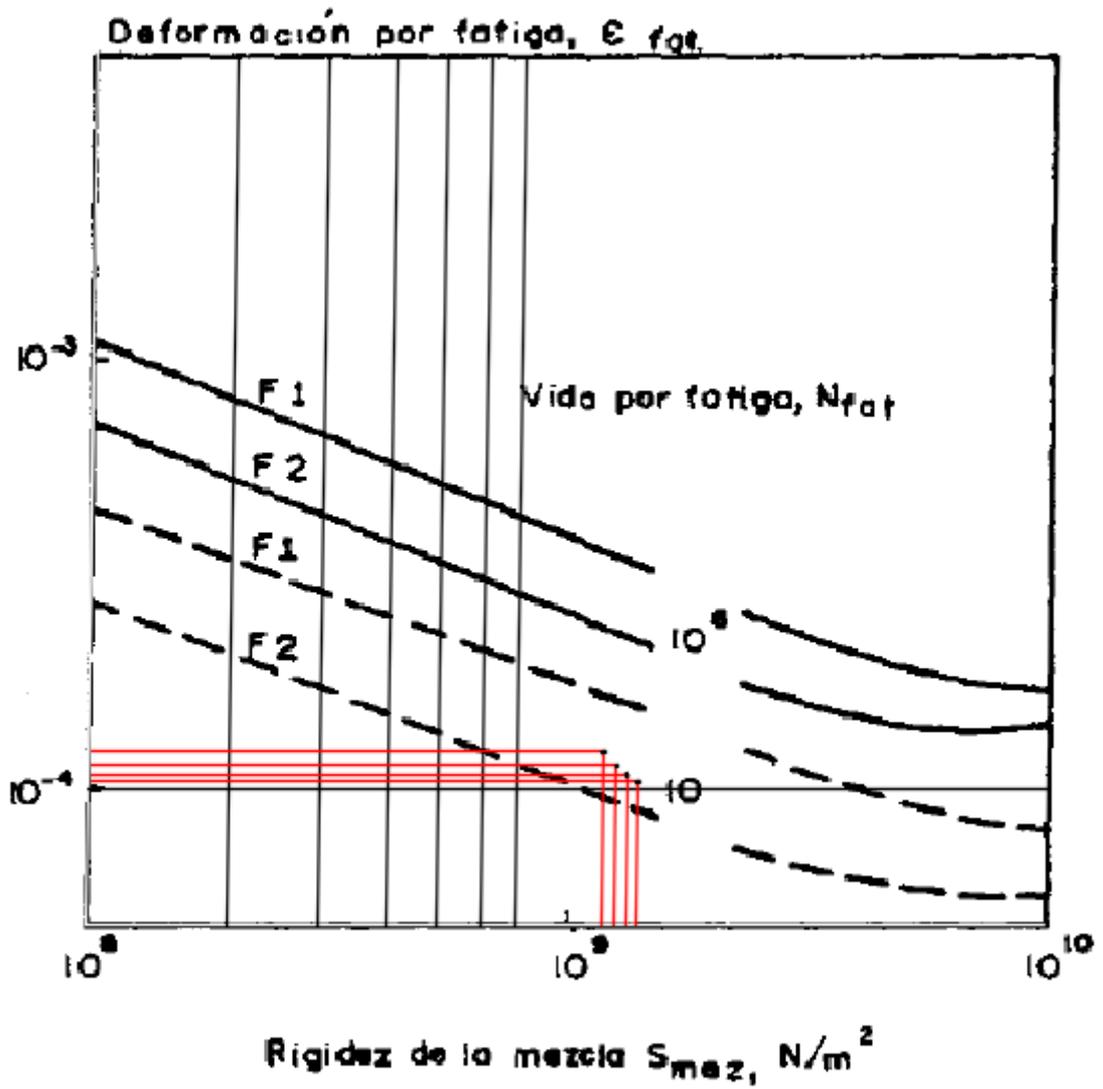


Figura: Características de fatiga F2

Fuente: "Ingeniería de Pavimentos para Carreteras" por Montejo (2002, p. 299)

Resultado: Tipo de Fatiga F2

Anexo 4: Software Bisar 3.0

Tabla: Datos paramétricos de entrada del Modelo A para aplicación con el Software Bisar

		BISAR 3.0 - Detailed Report		
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93				
System 1: MODELO A				

Layer Number	Thickness (m)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio	Shear Spring Compliance (m ² /N)
1	0,150	1,500E+09	0,30	0,000E+00
2	0,450	7,970E+08	0,35	0,000E+00
3		1,510E+08	0,40	

Load Number	Normal Stress (Pa)	Shear Stress (Pa)	Radius of Loaded Area (m)	Load - Position X (m)	Y (m)	Shear Direction (°)
1	2,621E+05	0,000E+00	3,150E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09

Print Date: 05-Oct-2021

Page: 1

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados del concreto asfáltico del Modelo A

		BISAR 3.0 - Detailed Report		
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93				
System 1: MODELO A				

Position Number: 1	Layer Number: 1	X Coord (m): 0,000E+00	Y Coord (m): 0,000E+00	Z Coord (m): 1,500E-01
Load Distance to No. Load Axis (m)	Theta (°)	Radial	Tangential	Vertical
0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	3,382E-04
		Radial	Tangential	Vertical
		-1,076E+04	-1,076E+04	-2,249E+05
		Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.
		0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
		Radial	Tangential	Vertical
		3,062E-05	3,062E-05	-1,376E-04
		Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.
		0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Total Stresses (Pa)	XX: -3,076E+04	YY: -3,076E+04	ZZ: -2,249E+05	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Strains	XX: 3,062E-05	YY: 3,062E-05	ZZ: -1,376E-04	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Displacements (m)	UX: 0,000E+00	UY: 0,000E+00	UZ: 3,382E-04			

Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains

	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.
Maximum:	-3,076E+04	3,062E-05			0,0000	1,0000	0,0000
Minimum:	-3,076E+04	3,062E-05			1,0000	0,0000	0,0000
Maximum:	-2,249E+05	-1,376E-04			0,0000	0,0000	1,0000
Minimum:	-1,278E+05		9,706E+04	8,412E-05	0,0000	0,7071	-0,7071
Maximum:	-1,278E+05		9,706E+04	8,411E-05	0,0000	0,7071	-0,7071
Minimum:	-1,278E+05		7,256E-01	6,294E-10	0,7071	0,0000	0,7071
Maximum:	-3,076E+04				-0,7071	0,7071	0,0000

Strain Energy (J): 1,453E+01 Strain Energy of Distortion (J): 1,089E+01

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09

Print Date: 05-Oct-2021

Page: 2

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de las capas granulares del Modelo A



BISAR 3.0 - Detailed Report
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93
System 1: MODELO A

Position Number: 2 Layer Number: 2 X Coord (m): 0,000E+00 Y Coord (m): 0,000E+00 Z Coord (m): 6,000E-01

Load No.	Distance to Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
			Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	2,669E-04	1,028E+05	1,028E+05	-3,998E+04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,014E-04	1,014E-04	-1,404E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Total Stresses (Pa)	XX: 1,028E+05	YY: 1,028E+05	ZZ: -3,998E+04	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Strains (Pa)	XX: 1,014E-04	YY: 1,014E-04	ZZ: -1,404E-04	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Displacements (m)	UX: 0,000E+00	UY: 0,000E+00	UZ: 2,669E-04			

Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains

	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.
Maximum:	1,028E+05	1,014E-04			1,0000	0,0000	0,0000
Minimum:	1,028E+05	1,014E-04			0,0000	1,0000	0,0000
Maximum:	-3,998E+04	-1,404E-04	7,138E+04	1,209E-04	0,0000	0,0000	1,0000
Minimum:	3,140E+04		7,138E+04	1,209E-04	0,7071	0,0000	-0,7071
Maximum:	3,140E+04		7,138E+04	1,209E-04	0,7071	0,0000	0,7071
Minimum:	3,140E+04		3,906E-03	7,276E-12	0,0000	0,7071	-0,7071
Maximum:	1,028E+05				0,7071	-0,7071	0,0000
Minimum:	1,028E+05				0,7071	0,7071	0,0000

Strain Energy (J): 1,323E+01 Strain Energy of Distortion (J): 1,151E+01

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09 Print Date: 05-Oct-2021 Page: 3

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Datos paramétricos de entrada del Modelo B para aplicación con el Software Bisar



BISAR 3.0 - Detailed Report
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93
System 2: MODELO B

Layer Number	Thickness (m)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio	Shear Spring Compliance (m ³ /N)
1	0,120	1,400E+09	0,30	0,000E+00
2	0,450	7,970E+08	0,35	0,000E+00
3		1,510E+08	0,40	

Load Number	Normal Stress (Pa)	Shear Stress (Pa)	Radius of Loaded Area (m)	Load - Position X (m)	Y (m)	Shear Direction (°)
1	2,621E+05	0,000E+00	3,150E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09 Print Date: 05-Oct-2021 Page: 4

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados del concreto asfáltico del modelo B

BISAR 3.0 - Detailed Report																
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93																
System 2: MODELO B																
Position Number: 1		Layer Number: 1			X Coord (m): 0,000E+00			Y Coord (m): 0,000E+00			Z Coord (m): 1,200E-01					
Load Distance to No. Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
		Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	3,580E-04	-8,199E+04	-8,199E+04	-2,413E+05	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,071E-05	1,071E-05	-1,372E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Total Stresses (Pa)		XX:	-8,199E+04	YY:	-8,199E+04	ZZ:	-2,413E+05	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00			
Total Strains		XX:	1,071E-05	YY:	1,071E-05	ZZ:	-1,372E-04	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00			
Total Displacements (m)		UX:	0,000E+00	UY:	0,000E+00	UZ:	3,580E-04									
Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains																
	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.									
Maximum:	-8,199E+04	1,071E-05			0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Minimum:	-8,199E+04	1,071E-05			1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Maximum:	-2,413E+05	-1,372E-04	7,965E+04	7,396E-05	0,0000	0,7071	-0,7071	0,0000	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Minimum:	-1,616E+05		7,965E+04	7,396E-05	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Minimum:	-1,616E+05		1,336E+00	1,241E-09	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Minimum:	-8,199E+04				-0,7071	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Strain Energy (J):		1,568E+01		Strain Energy of Distortion (J):		7,855E+00										

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09

Print Date: 05-Oct-2021

Page: 5

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de las capas granulares del Modelo B

BISAR 3.0 - Detailed Report																
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93																
System 2: MODELO B																
Position Number: 2		Layer Number: 2			X Coord (m): 0,000E+00			Y Coord (m): 0,000E+00			Z Coord (m): 5,700E-01					
Load Distance to No. Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
		Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	2,823E-04	1,122E+05	1,122E+05	-4,429E+04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,110E-04	1,110E-04	-1,541E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Total Stresses (Pa)		XX:	1,122E+05	YY:	1,122E+05	ZZ:	-4,429E+04	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00			
Total Strains		XX:	1,110E-04	YY:	1,110E-04	ZZ:	-1,541E-04	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00			
Total Displacements (m)		UX:	0,000E+00	UY:	0,000E+00	UZ:	2,823E-04									
Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains																
	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.									
Maximum:	1,122E+05	1,110E-04			0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Minimum:	1,122E+05	1,110E-04			1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Maximum:	-4,429E+04	-1,541E-04	7,825E+04	1,325E-04	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Minimum:	3,396E+04		7,825E+04	1,325E-04	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Minimum:	3,396E+04		7,813E-03	1,091E-11	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Minimum:	1,122E+05				0,7071	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,7071	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Strain Energy (J):		1,587E+01		Strain Energy of Distortion (J):		1,383E+01										

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09

Print Date: 05-Oct-2021

Page: 6

Fuentes: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Datos paramétricos de entrada del Modelo C para aplicación con el Software Bisar

BISAR 3.0 - Detailed Report
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93
System 3: MODELO C



Layer Number	Thickness (m)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio	Shear Spring Compliance (m ² /N)
1	0,110	1,300E+09	0,30	0,000E+00
2	0,450	7,970E+08	0,35	0,000E+00
3		1,510E+08	0,40	

Load Number	Normal Stress (Pa)	Shear Stress (Pa)	Radius of Loaded Area (m)	Load - Position X (m)	Y (m)	Shear Direction (°)
1	2,621E+05	0,000E+00	3,150E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09

Print Date: 05-Oct-2021

Page: 7

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados del concreto asfaltico del Modelo C

BISAR 3.0 - Detailed Report
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93
System 3: MODELO C



Position Number: 1 Layer Number: 1 X Coord (m): 0,000E+00 Y Coord (m): 0,000E+00 Z Coord (m): 1,100E-01

Load Distance to No. Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
		Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	3,658E-04	-1,049E+05	-1,049E+05	-2,461E+05	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	2,796E-07	2,773E-07	-1,409E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Total Stresses (Pa)		XX: -1,049E+05		YY: -1,049E+05		ZZ: -2,461E+05		YZ: 0,000E+00		XZ: 0,000E+00		XY: 0,000E+00				
Total Strains		XX: 2,796E-07		YY: 2,773E-07		ZZ: -1,409E-04		YZ: 0,000E+00		XZ: 0,000E+00		XY: 0,000E+00				
Total Displacements (m)		UX: 0,000E+00		UY: 0,000E+00		UZ: 3,658E-04										

Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains

	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.
Maximum:	-1,049E+05	2,796E-07			1,0000	0,0000	0,0000
Minimum:	-1,049E+05	2,773E-07			0,0000	1,0000	0,0000
Maximum:	-2,461E+05	-1,409E-04			0,0000	0,0000	1,0000
Maximum:	-1,755E+05		7,057E+04	7,057E-05	0,7071	0,0000	-0,7071
Minimum:	-1,755E+05		7,057E+04	7,057E-05	0,0000	0,7071	-0,7071
Minimum:	-1,755E+05		1,121E+00	1,121E-09	0,0000	0,7071	0,7071
Minimum:	-1,049E+05				0,7071	-0,7071	0,0000
					0,7071	0,7071	0,0000

Strain Energy (J): 1,730E+01

Strain Energy of Distortion (J): 6,640E+00

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09

Print Date: 05-Oct-2021

Page: 8

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de las capas granulares del Modelo C



BISAR 3.0 - Detailed Report
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93
System 3: MODELO C

Position Number: 2 Layer Number: 2 X Coord (m): 0,000E+00 Y Coord (m): 0,000E+00 Z Coord (m): 5,600E-01

Load No.	Distance to Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
			Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.			
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	2,888E-04	1,159E+05	1,159E+05	-4,612E+04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,148E-04	1,148E-04	-1,597E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Total Stresses (Pa)	XX: 1,159E+05	YY: 1,159E+05	ZZ: -4,612E+04	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Strains	XX: 1,148E-04	YY: 1,148E-04	ZZ: -1,597E-04	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Displacements (m)	UX: 0,000E+00	UY: 0,000E+00	UZ: 2,888E-04			

Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains

	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.
Maximum:	1,159E+05	1,148E-04			0,0000	1,0000	0,0000
Minimum:	1,159E+05	1,148E-04			1,0000	0,0000	0,0000
Maximum:	-4,612E+04	-1,597E-04	8,101E+04	1,372E-04	0,0000	0,0000	1,0000
Minimum:	3,489E+04		8,101E+04	1,372E-04	0,0000	0,7071	-0,7071
Maximum:	3,489E+04		8,101E+04	1,372E-04	0,7071	0,0000	-0,7071
Minimum:	3,489E+04		1,172E-02	2,183E-11	0,7071	0,0000	0,7071
Maximum:	1,159E+05				0,7071	0,7071	0,0000

Strain Energy (J): 1,699E+01 Strain Energy of Distortion (J): 1,482E+01

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09 Print Date: 05-Oct-2021 Page: 9

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Datos paramétricos de entrada del Modelo D para aplicación con el Software Bisar



BISAR 3.0 - Detailed Report
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93
System 4: MODELO D

Layer Number	Thickness (m)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio	Shear Spring Compliance (m ² /N)
1	0,090	1,200E+09	0,30	0,000E+00
2	0,400	7,000E+08	0,35	0,000E+00
3		1,510E+08	0,40	

Load Number	Normal Stress (Pa)	Shear Stress (Pa)	Radius of Loaded Area (m)	Load - Position X (m)	Load - Position Y (m)	Shear Direction (°)
1	2,621E+05	0,000E+00	3,150E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09 Print Date: 05-Oct-2021 Page: 10

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de la capa de concreto asfaltico del Modelo D



BISAR 3.0 - Detailed Report
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93
System 4: MODELO D

Position Number: 1 Layer Number: 1 X Coord (m): 0,000E+00 Y Coord (m): 0,000E+00 Z Coord (m): 9,000E-02

Load No.	Distance to Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
			Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.			
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,176E-04	-1,373E+05	-1,373E+05	-2,512E+05	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-1,727E-05	-1,727E-05	-1,407E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Total Stresses (Pa)	XX: -1,373E+05	YY: -1,373E+05	ZZ: -2,512E+05	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Strains	XX: -1,727E-05	YY: -1,728E-05	ZZ: -1,407E-04	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Displacements (m)	UX: 0,000E+00	UY: 0,000E+00	UZ: 4,176E-04			

Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains

	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.
Maximum:	-1,373E+05	-1,727E-05			1,0000	0,0000	0,0000
Minimax:	-1,373E+05	-1,728E-05			0,0000	1,0000	0,0000
Minimum:	-2,512E+05	-1,407E-04			0,0000	0,0000	1,0000
Maximum:			5,696E+04	6,171E-05	0,7071	0,0000	-0,7071
Minimax:					0,7071	0,0000	0,7071
Minimum:			5,696E+04	6,171E-05	0,0000	0,7071	-0,7071
Minimum:			1,422E+00	1,540E-09	0,7071	-0,7071	0,0000
Minimum:					0,7071	0,7071	0,0000

Strain Energy (J): 2,004E+01 **Strain Energy of Distortion (J):** 4,687E+00

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09 Print Date: 05-Oct-2021 Page: 11

Fuentes: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de las capas granulares del Modelo D



BISAR 3.0 - Detailed Report
ANALISIS DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93
System 4: MODELO D

Position Number: 2 Layer Number: 2 X Coord (m): 0,000E+00 Y Coord (m): 0,000E+00 Z Coord (m): 4,900E-01

Load No.	Distance to Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
			Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.			
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	3,337E-04	1,254E+05	1,254E+05	-5,999E+04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,465E-04	1,465E-04	-2,111E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Total Stresses (Pa)	XX: 1,254E+05	YY: 1,254E+05	ZZ: -5,999E+04	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Strains	XX: 1,465E-04	YY: 1,465E-04	ZZ: -2,111E-04	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Displacements (m)	UX: 0,000E+00	UY: 0,000E+00	UZ: 3,337E-04			

Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains

	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.
Maximum:	1,254E+05	1,465E-04			1,0000	0,0000	0,0000
Minimax:	1,254E+05	1,465E-04			0,0000	1,0000	0,0000
Minimum:	-5,999E+04	-2,111E-04			0,0000	0,0000	1,0000
Maximum:			9,272E+04	1,788E-04	0,7071	0,0000	-0,7071
Minimax:					0,7071	0,0000	0,7071
Minimum:			9,272E+04	1,788E-04	0,0000	0,7071	-0,7071
Minimum:			0,000E+00	0,000E+00	0,0000	0,7071	0,7071
Minimum:					0,7071	-0,7071	0,0000
Minimum:					0,7071	0,7071	0,0000

Strain Energy (J): 2,471E+01 **Strain Energy of Distortion (J):** 2,210E+01

Calculated: 05-Oct-2021 21:44:09 Print Date: 05-Oct-2021 Page: 12

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Datos paramétricos de entrada del Modelo A optimizado

	BISAR 3.0 - Detailed Report				
	OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93				
	System 1: MODELO A				

Layer Number	Thickness (m)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio	Shear Spring Compliance (m ² /N)
1	0,100	1,250E+09	0,30	0,000E+00
2	0,300	7,000E+08	0,35	0,000E+00
3		1,510E+08	0,40	

Load Number	Normal Stress (Pa)	Shear Stress (Pa)	Radius of Loaded Area (m)	Load - Position		Shear Direction (°)
				X (m)	Y (m)	
1	2,621E+05	0,000E+00	3,150E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Calculated: 05-Oct-2021 22:40:21 Print Date: 05-Oct-2021 Page: 1

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de la capa de concreto asfáltico del Modelo A optimizado

	BISAR 3.0 - Detailed Report				
	OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93				
	System 1: MODELO A				

Position Number: 1	Layer Number: 1	X Coord (m): 0,000E+00	Y Coord (m): 0,000E+00	Z Coord (m): 1,000E-01
---------------------------	------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

Load Distance to No. Load Axis (m)	Theta (°)	Displacement (m)			Stresses (Pa)						Strains					
		Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,579E-04	-1,142E+05	-1,142E+05	-2,420E+05	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-5,900E-06	-5,900E-06	-1,388E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Total Stresses (Pa)	XX: -1,142E+05	YY: -1,142E+05	ZZ: -2,420E+05	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Strains	XX: -5,900E-06	YY: -5,900E-06	ZZ: -1,388E-04	YZ: 0,000E+00	XZ: 0,000E+00	XY: 0,000E+00
Total Displacement (m)	UX: 0,000E+00	UY: 0,000E+00	UZ: 4,579E-04			

Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains							
	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.
Maximum:	-1,142E+05	-5,900E-06			0,0000	1,0000	0,0000
Minimum:	-1,142E+05	-5,900E-06			1,0000	0,0000	0,0000
Maximum:	-2,420E+05	-1,388E-04			0,0000	0,0000	1,0000
Minimum:	-1,781E+05		6,387E+04	6,643E-05	0,0000	0,7071	-0,7071
Minimum:	-1,781E+05		6,387E+04	6,643E-05	0,0000	0,7071	0,7071
Minimum:	-1,781E+05		1,207E+00	1,255E-09	0,7071	0,0000	0,7071
Minimum:	-1,142E+05				-0,7071	0,7071	0,0000
Minimum:	-1,142E+05				0,7071	0,7071	0,0000

Strain Energy (J): 1,746E+01	Strain Energy of Distortion (J): 5,657E+00
-------------------------------------	---

Calculated: 05-Oct-2021 22:40:21 Print Date: 05-Oct-2021 Page: 2

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de las capas granulares del Modelo A optimizado

BISAR 3.0 - Detailed Report																	
OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93																	
System 1: MODELO A																	
Position Number: 2		Layer Number: 2			X Coord (m): 0,000E+00			Y Coord (m): 0,000E+00			Z Coord (m): 4,000E-01						
Load No.	Distance to Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
			Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang.	Rad/Vert.	Tang/Vert.
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	3,883E-04	1,553E+05	1,553E+05	-7,834E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,834E-04	1,834E-04	-2,673E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Total Stresses (Pa)		XX: 1,553E+05		YY: 1,553E+05		ZZ: -7,834E-04		YZ: 0,000E+00		XZ: 0,000E+00		XY: 0,000E+00					
Total Strains		XX: 1,834E-04		YY: 1,834E-04		ZZ: -2,673E-04		YZ: 0,000E+00		XZ: 0,000E+00		XY: 0,000E+00					
Total Displacements (m)		UX: 0,000E+00		UY: 0,000E+00		UZ: 3,883E-04											
Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains																	
	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.										
Maximum:	1,553E+05	1,834E-04			1,0000	0,0000	0,0000										
Minimum:	1,553E+05	1,834E-04			0,0000	1,0000	0,0000										
Maximum:	-7,834E+04	-2,673E-04			0,0000	0,0000	1,0000										
Minimum:			1,168E+05	2,253E-04	0,7071	0,0000	-0,7071										
Maximum:	3,850E+04				0,7071	0,0000	0,7071										
Minimum:			1,168E+05	2,253E-04	0,0000	0,7071	-0,7071										
Maximum:	3,850E+04				0,0000	0,7071	0,7071										
Minimum:			7,813E-03	1,455E-11	0,7071	-0,7071	0,0000										
	1,553E+05				0,7071	0,7071	0,0000										
Strain Energy (J): 3,896E+01		Strain Energy of Distortion (J): 3,510E+01															

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Datos paramétricos de entrada del Modelo B optimizado para aplicación con el Software Bisar

BISAR 3.0 - Detailed Report						
OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93						
System 2: MODELO B						
Layer Number	Thickness (m)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio	Shear Spring Compliance (m ² /N)		
1	0,100	1,250E+09	0,30	0,000E+00		
2	0,300	7,000E+08	0,35	0,000E+00		
3		1,510E+08	0,40			
Load Number	Normal Stress (Pa)	Shear Stress (Pa)	Radius of Loaded Area (m)	Load - Position		Shear Direction (°)
1	2,621E+05	0,000E+00	3,150E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de la capa de concreto asfaltico del Modelo B optimizado

BISAR 3.0 - Detailed Report																	
OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93																	
System 2: MODELO B																	
Position Number: 1		Layer Number: 1		X Coord (m): 0,000E+00			Y Coord (m): 0,000E+00			Z Coord (m): 1,000E-01							
Load No.	Distance to Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
			Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang	Rad/Vert	Tang/Vert	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang	Rad/Vert	Tang/Vert
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,579E-04	-1,142E+05	-1,142E+05	-2,420E+05	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-5,900E-06	-5,898E-06	-1,388E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Total Stresses (Pa)			XX:	-1,142E+05	YY:	-1,142E+05	ZZ:	-2,420E+05	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00			
Total Strains			XX:	-5,900E-06	YY:	-5,898E-06	ZZ:	-1,388E-04	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00			
Total Displacements (m)			UX:	0,000E+00	UY:	0,000E+00	UZ:	4,579E-04									
Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains																	
	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.										
Maximum:	-1,142E+05	-5,898E-06			0,0000	1,0000	0,0000										
Minimum:	-1,142E+05	-5,900E-06			1,0000	0,0000	0,0000										
Maximum:	-2,420E+05	-1,388E-04			0,0000	0,0000	1,0000										
Minimum:	-2,420E+05	-1,388E-04			0,0000	0,7071	-0,7071										
Maximum:	-1,781E+05		6,387E+04	6,643E-05	0,0000	0,7071	0,0000										
Minimum:	-1,781E+05		6,387E+04	6,643E-05	0,7071	0,0000	-0,7071										
Maximum:	-1,781E+05		1,207E+00	1,255E-09	0,7071	0,0000	0,7071										
Minimum:	-1,781E+05		1,207E+00	1,255E-09	-0,7071	0,7071	0,0000										
Maximum:	-1,142E+05				0,7071	0,7071	0,0000										
Strain Energy (J):			1,746E+01	Strain Energy of Distortion (J):			5,657E+00										

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de las capas granulares del Modelo B optimizado

BISAR 3.0 - Detailed Report																	
OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93																	
System 2: MODELO B																	
Position Number: 2		Layer Number: 2		X Coord (m): 0,000E+00			Y Coord (m): 0,000E+00			Z Coord (m): 4,000E-01							
Load No.	Distance to Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
			Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang	Rad/Vert	Tang/Vert	Radial	Tangential	Vertical	Rad/Tang	Rad/Vert	Tang/Vert
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	3,883E-04	1,553E+05	1,553E+05	-7,834E+04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,834E-04	1,834E-04	-2,673E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Total Stresses (Pa)			XX:	1,553E+05	YY:	1,553E+05	ZZ:	-7,834E+04	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00			
Total Strains			XX:	1,834E-04	YY:	1,834E-04	ZZ:	-2,673E-04	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00			
Total Displacements (m)			UX:	0,000E+00	UY:	0,000E+00	UZ:	3,883E-04									
Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains																	
	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.										
Maximum:	1,553E+05	1,834E-04			1,0000	0,0000	0,0000										
Minimum:	1,553E+05	1,834E-04			0,0000	1,0000	0,0000										
Maximum:	-7,834E+04	-2,673E-04			0,0000	0,0000	1,0000										
Minimum:	-7,834E+04	-2,673E-04			0,0000	0,0000	-0,7071										
Maximum:	3,850E+04		1,168E+05	2,253E-04	0,7071	0,0000	0,7071										
Minimum:	3,850E+04		1,168E+05	2,253E-04	0,0000	0,7071	-0,7071										
Maximum:	3,850E+04		7,813E-03	1,455E-11	0,0000	0,7071	0,7071										
Minimum:	3,850E+04		7,813E-03	1,455E-11	0,7071	-0,7071	0,0000										
Maximum:	1,553E+05				0,7071	0,7071	0,0000										
Strain Energy (J):			3,896E+01	Strain Energy of Distortion (J):			3,510E+01										

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Datos paramétricos de entrada del Modelo C optimizado para aplicación con el Software Bisar

 **BISAR 3.0 - Detailed Report**
OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93
System 3: MODELO C

Layer Number	Thickness (m)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio	Shear Spring Compliance (m ² /N)
1	0,080	1,100E+09	0,30	0,000E+00
2	0,300	7,000E+08	0,35	0,000E+00
3		1,510E+08	0,40	

Load Number	Normal Stress (Pa)	Shear Stress (Pa)	Radius of Loaded Area (m)	Load - Position X (m)	Y (m)	Shear Direction (°)
1	2,621E+05	0,000E+00	3,150E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de la capa de concreto asfaltico del Modelo C optimizados

 **BISAR 3.0 - Detailed Report**
OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93
System 3: MODELO C

Position Number: 1 Layer Number: 1 X Coord (m): 0,000E+00 Y Coord (m): 0,000E+00 Z Coord (m): 8,000E-02

Load Distance to No. Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
		Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,795E-04	-1,694E+05	-1,694E+05	-2,495E+05	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-3,975E-05	-3,975E-05	-1,344E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Total Stresses (Pa): XX: -1,694E+05 YY: -1,694E+05 ZZ: -2,495E+05 YZ: 0,000E+00 XZ: 0,000E+00 XY: 0,000E+00
Total Strains: XX: -3,975E-05 YY: -3,976E-05 ZZ: -1,344E-04 YZ: 0,000E+00 XZ: 0,000E+00 XY: 0,000E+00
Total Displacements (m): UX: 0,000E+00 UY: 0,000E+00 UZ: 4,795E-04

Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains

	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.
Maximum:	-1,694E+05	-3,975E-05			1,0000	0,0000	0,0000
Minimum:	-1,694E+05	-3,976E-05			0,0000	1,0000	0,0000
Maximum:	-2,495E+05	-1,344E-04	4,005E+04	4,733E-05	0,0000	0,0000	1,0000
Minimum:	-2,094E+05		4,005E+04	4,733E-05	0,0000	0,0000	-0,7071
Maximum:	-2,094E+05		3,766E+00	4,451E-09	0,0000	0,7071	-0,7071
Minimum:	-1,694E+05				0,7071	0,7071	0,0000

Strain Energy (J): 2,350E+01 Strain Energy of Distortion (J): 2,527E+00

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de las capas granulares del modelo C optimizado

BISAR 3.0 - Detailed Report																	
OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93																	
System 3: MODELO C																	
Position Number: 2		Layer Number: 2			X Coord (m): 0,000E+00			Y Coord (m): 0,000E+00			Z Coord (m): 3,800E-01						
Load No.	Distance to Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
			Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,093E-04	1,647E+05	1,647E+05	-8,566E+04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,958E-04	1,958E-04	-2,871E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Total Stresses (Pa)			XX:	1,647E+05	YY:	1,647E+05	ZZ:	-8,566E+04	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00			
Total Strains			XX:	1,958E-04	YY:	1,958E-04	ZZ:	-2,871E-04	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00			
Total Displacements (m)			UX:	0,000E+00	UY:	0,000E+00	UZ:	4,093E-04									
Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains																	
	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.										
Maximum:	1,647E+05	1,958E-04			0,0000	1,0000	0,0000										
Minimum:	1,647E+05	1,958E-04			1,0000	0,0000	0,0000										
Maximum:	-8,566E+04	-2,871E-04	1,252E+05	2,414E-04	0,0000	0,7071	-0,7071										
Minimum:	3,953E+04		1,252E+05	2,414E-04	0,0000	0,7071	-0,7071										
Minimum:	3,953E+04		7,813E-03	1,455E-11	0,7071	0,0000	0,7071										
Minimum:	1,647E+05				-0,7071	0,7071	0,0000										
Strain Energy (J):		4,455E+01		Strain Energy of Distortion (J):		4,030E+01											

Calculated: 05-Oct-2021 22:40:21

Print Date: 05-Oct-2021

Page: 9

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Datos paramétricos de entrada del Modelo D optimizado para aplicación con el Software Bisar

BISAR 3.0 - Detailed Report				
OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93				
System 4: MODELO D				

Layer Number	Thickness (m)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio	Shear Spring Compliance (m ² /N)
1	0,050	1,030E+09	0,30	0,000E+00
2	0,250	1,000E+09	0,35	0,000E+00
3		1,510E+08	0,40	

Load Number	Normal Stress (Pa)	Shear Stress (Pa)	Radius of Loaded Area (m)	Load - Position X (m)	Load - Position Y (m)	Shear Direction (°)
1	2,621E+05	0,000E+00	3,150E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Calculated: 05-Oct-2021 22:40:21

Print Date: 05-Oct-2021

Page: 10

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultado del concreto asfáltico del modelo D optimizado

BISAR 3.0 - Detailed Report																	
OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93																	
System 4: MODELO D																	
Position Number: 1		Layer Number: 1		X Coord (m): 0,000E+00			Y Coord (m): 0,000E+00			Z Coord (m): 5,000E-02							
Load	Distance to No. Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
			Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	5,034E-04	-2,702E+05	-2,702E+05	-2,543E+05	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-1,096E-04	-1,096E-04	-1,096E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Total Stresses (Pa)		XX:	-2,702E+05	YY:	-2,702E+05	ZZ:	-2,543E+05	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00				
Total Strains		XX:	-1,096E-04	YY:	-1,096E-04	ZZ:	-8,948E-05	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00				
Total Displacements (m)		UX:	0,000E+00	UY:	0,000E+00	UZ:	5,034E-04										
Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains																	
	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.										
Maximum:	-2,543E+05	-8,948E-05			0,0000	0,0000	1,0000										
Minimum:	-2,702E+05	-1,096E-04			1,0000	0,0000	0,0000										
Maximum:	-2,702E+05	-1,096E-04	7,963E+03	1,005E-05	0,0000	0,0000	1,0000										
Minimum:	-2,623E+05				0,0000	-0,7071	0,0000										
Minimum:	-2,622E+05		7,955E+03	1,004E-05	-0,7071	0,0000	0,0000										
Minimum:	-2,702E+05		7,875E+00	9,939E-09	0,7071	0,0000	0,0000										
					0,7071	-0,7071	0,0000										
					0,7071	0,7071	0,0000										
Strain Energy (J):		4,099E+01		Strain Energy of Distortion (J):			1,066E-01										

Calculated: 05-Oct-2021 22:40:21 Print Date: 05-Oct-2021 Page: 11

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)

Tabla: Resultados de las capas granulares del Modelo D optimizado

BISAR 3.0 - Detailed Report																	
OPTIMIZACION DEL PAVIMENTO RESULTANTE DEL METODO MECANICISTA AASHTO 93																	
System 4: MODELO D																	
Position Number: 2		Layer Number: 2		X Coord (m): 0,000E+00			Y Coord (m): 0,000E+00			Z Coord (m): 3,000E-01							
Load	Distance to No. Load Axis (m)	Theta (°)	Displacements (m)			Stresses (Pa)						Strains					
			Radial	Tangential	Vertical	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.	Radial	Tangential	Vertical	Rad./Tang.	Rad./Vert.	Tang./Vert.
1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,617E-04	2,671E+05	2,671E+05	-1,032E+05	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	2,097E-04	2,097E-04	-2,902E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Total Stresses (Pa)		XX:	2,671E+05	YY:	2,671E+05	ZZ:	-1,032E+05	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00				
Total Strains		XX:	2,097E-04	YY:	2,097E-04	ZZ:	-2,902E-04	YZ:	0,000E+00	XZ:	0,000E+00	XY:	0,000E+00				
Total Displacements (m)		UX:	0,000E+00	UY:	0,000E+00	UZ:	4,617E-04										
Principal Values and Directions of Total Stresses and Strains																	
	Normal Stress (Pa)	Normal Strain	Shear Stress (Pa)	Shear Strain	X Comp.	Y Comp.	Z Comp.										
Maximum:	2,671E+05	2,097E-04			0,0000	1,0000	0,0000										
Minimum:	2,671E+05	2,097E-04			1,0000	0,0000	0,0000										
Minimum:	-1,032E+05	-2,902E-04	1,852E+05	2,500E-04	0,0000	0,0000	1,0000										
Maximum:	8,193E+04				0,0000	0,7071	0,0000										
Minimum:	8,193E+04		1,852E+05	2,500E-04	0,7071	0,0000	0,0000										
Minimum:	2,671E+05		3,125E-02	4,366E-11	0,7071	0,0000	0,0000										
					-0,7071	0,7071	0,0000										
					0,7071	0,7071	0,0000										
Strain Energy (J):		7,100E+01		Strain Energy of Distortion (J):			6,172E+01										

Calculated: 05-Oct-2021 22:40:21 Print Date: 05-Oct-2021 Page: 12

Fuente: Software Bisar 3.0 (de uso libre)