

# Cuantificación del Efecto de las Cargas por Eje en los Pavimentos Flexibles Utilizando Líneas de Influencia

Juan Carlos Benavides Ruiz



Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Civil  
Maestría en Ingeniería de Pavimentos  
Popayán, Cauca  
2023

# Cuantificación del Efecto de las Cargas por Eje en los Pavimentos Flexibles Utilizando Líneas de Influencia

Juan Carlos Benavides Ruiz

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería civil con énfasis en pavimentos.

Director: Efraín de Jesús Solano Fajardo.

Ingeniero Civil

Magister en Vías Terrestres.

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Civil  
Maestría en Ingeniería de Pavimentos  
Popayán, Cauca  
2023

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

**Director.**

---

**Presidente del Jurado.**

---

**Jurado**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al ingeniero Efraín de Jesús Solano director de este trabajo por su valiosa y total colaboración, orientación y contribución en la elaboración de la herramienta computacional que permite analizar las líneas de influencia originada por los diferentes tipos de ejes y vehículos de carga.

Igualmente quiero agradecer al ingeniero Carlos Alberto Benavides Bastidas por sus importantes aportes en la ejecución y desarrollo de este trabajo de grado.

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	25
2	OBJETIVOS .....	26
2.1	Objetivo general .....	26
2.2	Objetivos específicos .....	26
3	METODOLOGÍA.....	27
3.1	Revisión bibliográfica sobre evaluación de las cargas sobre estructuras de pavimentos flexibles.....	27
3.2	Adquisición y determinación de variables necesarias para el proyecto de grado. ....	27
3.2.1	Adquisición y determinación de información de las configuraciones típicas de los diferentes tipos de camiones que circulan por las carreteras nacionales en Colombia.....	27
3.2.2	Determinación de las características geométricas de las configuraciones típicas de los diferentes tipos de ejes utilizadas por los vehículos de carga. ....	28
3.2.3	Determinación de rangos de tránsito representativos de la red vial nacional colombiana.....	28
3.2.4	Determinación de rangos de resistencias típicos de los suelos de sub rasante....	28
3.2.5	Determinación y selección de estructuras típicas.....	28
3.3	Evaluación del efecto de las cargas por eje representativas .....	29
3.4	Desarrollo de software.....	29
3.5	Elaboración de metodología .....	29
3.6	Análisis de resultados .....	29
4	ESTADO DEL ARTE.....	30
4.1	Introducción.....	30
4.2	Ensayo vial AASHO ROAD TEST .....	30
4.3	Factores de Equivalencia de Carga según método AASHTO .....	33

4.4	Tablas recomendadas por el método AASHTO para determinar los factores de equivalencia de carga por eje.....	34
4.5	Factores de equivalencia de carga según método SHELL .....	38
4.6	Método del Instituto del Asfalto.....	39
4.7	Factores de equivalencia de carga según método de Universidad Autónoma De México. 41	
4.8	Factores de equivalencia de carga según Ministerio de Transporte de Canadá. ....	41
4.9	Cuantificación de los factores de equivalencia de carga empleado la ley de la 4 <sup>a</sup> potencia.....	42
4.9.1	Recomendación de INVIAS 2008.....	43
4.9.2	Recomendación de manuales peruanos.....	44
4.9.3	Recomendación de AUSTROADS (2017).....	45
4.9.4	Recomendación de TRANSPORT RESEARCH LABORATORY (2022) .....	48
4.9.5	Recomendación de LABOTATOIRE CENTARL DE POINTS ET CHAUSSES (LCPC). 49	
4.10	Cuantificación utilizando el método mecanicista .....	49
4.11	Estudios Nacionales sobre factores de equivalencia de carga y factor daño vehicular. 50	
4.12	Estudios Internacionales sobre factores de equivalencia de carga y factor daño vehicular. 52	
5	CONCEPTOS GENERALES DEL ANALISIS ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES .....	54
5.1	Introducción.....	54
5.2	Requerimientos de la cuantificación de la variable tránsito para el análisis estructural de pavimentos .....	56
5.2.1	Tránsito promedio diario.....	57
5.2.2	Clasificación de los vehículos.....	57

5.2.3	Pesaje de vehículos.....	57
5.2.4	Factor de equivalencia de carga .....	58
5.2.5	Factor daño por vehículo.....	58
5.2.6	Factor de distribución por sentido.....	58
5.2.7	Factor de distribución por carril.....	58
5.2.8	Proyección general del tránsito .....	59
5.2.9	Proyección general del tránsito en el periodo de diseño utilizando series históricas de tránsito.....	59
5.2.10	Proyección general del tránsito en el periodo de diseño sin información de series históricas de tránsito .....	60
5.2.10.1	Modelo de crecimiento exponencial.....	60
5.2.10.2	Modelo de crecimiento lineal .....	61
5.3	Consideraciones de las condiciones climáticas para el dimensionamiento de pavimentos flexibles. ....	61
5.4	Parámetros de la caracterización dinámica de materiales viales requeridos para el dimensionamiento de un pavimento flexible .....	62
5.4.1	Módulos de mezclas asfálticas .....	62
5.4.2	Módulo resiliente de los materiales de las capas granulares.....	65
5.4.2.1	Expresiones recomendadas por Izzat, Lettier y Taylor. ....	66
5.4.3	módulo resiliente de suelos finos .....	67
5.4.4	Relaciones de poisson de los materiales viales .....	67
5.5	Modelo estructural de predimensionamiento de un pavimento flexible.....	68
5.6	Cálculo de esfuerzos y deformaciones .....	69
5.6.1	Parámetros de entrada de Software OPENPAVE .....	69
5.7	Determinación de esfuerzos y deformaciones admisibles según modelos de comportamiento o modelos de falla.....	72

5.7.1	Modelo de comportamiento para el control del agrietamiento del Instituto Norteamericano del Asfalto .....	72
5.7.2	Modelo de comportamiento para el control del agrietamiento por fatiga del método SHELL modificado por AUSTROADS 2017.....	73
5.7.3	Modelo de ahuellamiento del método del Instituto del Asfalto .....	73
5.7.4	Modelo de ahuellamiento del método SHELL.....	74
5.8	Proceso de comparación de solicitaciones críticas en el proceso de análisis estructural de pavimentos flexibles.....	74
6	DETERMINACIÓN DE MODELOS DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA EVALUAR EL EFECTO DE LAS CARGAS POR EJE .....	75
6.1	DETERMINACIÓN DE LOS RANGOS DE TRANSITO Y RESISTENCIA DE LA SUB RASANTE .....	75
6.1.1	Niveles de tránsito analizados. ....	75
6.1.2	Capacidad de soporte de Sub-Rasante .....	76
6.1.3	Condiciones de Serviciabilidad y Confiabilidad.....	77
6.1.4	Determinación de valores de números estructurales requeridos utilizando el método AASHTO 1993. ....	77
6.1.5	Agrupamiento de Valores de Números Estructurales .....	82
6.1.1	Rangos de las variables de diseño consultados según referencia de algunos estudios. 84	
6.1.2	Determinación del Número Estructural requerido para los valores representativos de las variables según los rangos establecidos en el estudio. ....	89
6.2	Prediseño de las estructuras representativas utilizando el Método AASHTO 1993. .	89
6.3	Diseño de las estructuras de pavimento flexible utilizando el método mecánico. empírico92	
6.3.1	Selección de temperaturas ambientales.....	92
6.3.2	Caracterización dinámica de las capas granulares .....	94

6.3.3	Caracterización dinámica de las mezclas asfálticas de concreto asfáltico .....	95
6.3.4	Determinación de los espesores de las estructuras según el método mecánico empírico. 100	
7	ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA Y FACTOR DAÑO DE LOS VEHÍCULOS PESADOS TÍPICOS EN COLOMBIA SEGÚN METODOLOGIA AASHTO.....	105
8	CALCULO DE FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA POR EJE Y FACTOR DAÑO VEHICULAR SEGÚN MÉTODO DE LA ELASTICA DE LA DEFORMADA .....	121
8.1	Descripción del procedimiento general planteado para determinar el factor daño utilizando las curvas elásticas de deformación. ....	121
8.2	Resultados del análisis de los factores daño de los vehículos convencionales de carga utilizando las curvas elásticas de deformación. ....	129
9	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	146
9.1	.....	146
9.2	.....	154
10	REFERENCIAS.....	175

### INDICE DE VARIABLES

$SV$	variación de pendiente, una medida de la irregularidad de la superficie del pavimento
$RD$	Desplazamientos verticales máximos del pavimento (Ahuellamientos)
$C$	Porcentaje
$P$	Parches
$p$	Índice de serviciabilidad
$W$	Numero de aplicaciones aplicadas
$\rho$	Número estimado de aplicaciones de carga para que la capacidad de servicio del pavimento disminuya a una serviciabilidad final de 1.5
$\beta$	Pendiente de la curva de serviciabilidad
$LJ$	Para ejes simples corresponde a la carga por eje en Kips Para ejes tándem corresponde a la carga por eje en Kips multiplicada por 0.57
$Ne$	Factor de conversión de carga por eje
$L$	Magnitud de carga por eje expresada en KN
$A$	Indice de agresividad
$P^*$	Carga de un determinado eje (simple , tandem, tridem)por eje
$P0$	Carga del eje de referencia simple de rueda doble de 130 kN y presión 662 Kpa
$\alpha^*$	Constante que depende del tipo de pavimento. Para un pavimento flexible el valor de la constante $\alpha^*=5$

$K^*$	Constante que depende del tipo de eje. Para un pavimento flexible, según el tipo de eje los valores son los siguientes . Eje simple $K^*=1$ , Eje tandem.75 y para Eje tridem $K^*=1.1$ .
$N$	Es el número de ejes equivalentes de 80 kN que circularán por el carril de diseño durante el período de diseño (n).
$N_o$	Es el número de ejes equivalentes de 80 kN que circularán por el carril de diseño en el año base o de puesta en servicio del pavimento
$r$	Es la tasa de crecimiento anual de tránsito de vehículos comerciales expresada en forma decimal:
$n$	Número de años del periodo de diseño.
$d$	Diferencia común = $N_o * r$
$M_r$	Modulo resiliente, psi
$P_a$	Presión atmosférica, psi
$\theta$	Primer invariante de esfuerzos = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ , psi
$\sigma_1$	Esfuerzo principal mayor, psi
$\sigma_2$	Esfuerzo principal intermedio = $\sigma_3$ en cilindros, psi
$\sigma_3$	Presión de confinamiento, psi
$\tau_{oct}$	Esfuerzo Octaedral, psi
$k_1, k_2, k_3$	Constantes de regresión. Donde $K_1 > 0$ , $K_2 > 0$ y $K_3 < 0$ .
CBR	Relación de soporte de California (CBR) del material granular, expresada en porcentaje.
$M_{r_b}$	Modulo resiliente de la capa de base granular, psi

$M_{r_{sb}}$	Modulo resiliente de la capa de subbase granular, psi
$M_{r_{ste}}$	Modulo resiliente de la subrasante, psi
$H_b$	Espesor de la capa granular de base, pulgadas
$H_{sb}$	Espesor la capa granular de subbase, pulgadas
$W_{18}$	Es el número de aplicaciones de carga por eje de magnitud 18 kilo-libras en el tiempo t.
$Z_r$	Coefficiente de desviación normal estándar.
$S_o$	Error estándar combinado por errores en la predicción del comportamiento y del tránsito
$\Delta PSI$	Pérdida del Índice de serviciabilidad. o diferencia entre los índices de serviciabilidad inicial y final deseados.
$S_N$	Número estructural: Parámetro que es función de los espesores de las capas de la estructura de pavimento ( $h_i$ ), coeficientes de aporte estructural de cada capa ( $a_i$ ) y de las condiciones de drenaje de los materiales granulares ( $m_i$ ). Se calcula con la expresión: $SN = a_1 h_1 + a_2 h_2 m_2 + a_3 h_3 m_3$
$N_f$	Número admisible de repeticiones de carga para causar el agrietamiento por fatiga.
$E_{CA}$	Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en psi
$\epsilon_t$	Deformación unitaria de tracción en los puntos críticos y calculada por el modelo de respuesta, en pulg/pulg
$V_b$	Contenido de porcentaje de asfalto efectivo en volumen (%)
$V_a$	Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla.

$k_{f1}$	Factor recomendado por el método para considerar las diferencias entre las condiciones de campo y de laboratorio = 18.4.
$k_{f2}$	Factor igual a 3.291
$k_{f3}$	Factor igual a 0.854
$\mu\epsilon_t$	Micro deformación unitaria de tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica calculada por el modelo de análisis
SF	(Shift factor Factor de cambio entre las condiciones de fatiga de laboratorio y la vida de fatiga en servicio. (Según AUSTROADS =6)
RF	(Reliability Factor) Factor de confiabilidad recomendado por la guía de diseño Australiana (38), para evaluar la falla por fatiga de la mezcla asfáltica según el nivel de confianza
$N_z$	Número admisible de repeticiones de carga por eje admisibles para el control del ahuellamiento.
$\epsilon_z$	Deformación unitaria vertical por compresión en la superficie de la subrasante obtenida en el modelo de análisis.
$IE^*I$	Módulo dinámico
$f_r$	Frecuencia de carga a la temperatura de referencia.
$\delta$	Valor mínimo del módulo dinámico.
$\delta+\alpha$	Valor máximo del módulo dinámico.
$\beta y \gamma$	Parámetros que describen la forma de la curva sigmoideal
$\eta$	viscosidad del cemento asfáltico en centipoises
$Tr$	Temperatura en grados rankine.

$G_t$	función representativa de la pérdida de capacidad de servicio
$P_t$	Índice de serviciabilidad final
$\beta_x$	Pendiente de la curva de serviciabilidad para una carga X kips determinada.
$\beta_{18}$	Es el valor de $\beta_x$ cuando $L_x$ es igual 18 kilolibras y $L_2$ es igual a 1
$L_x$	Magnitud de carga por eje en Kilolibras
$L_2$	Código por eje ( $L_2 = 1$ para eje simple rueda doble, $L_2 = 2 =$ para eje tándem de rueda doble, $L_2 = 3$ para eje trídem de rueda doble.)
$FEC$	factor de equivalencia de carga por eje
$FDVC$	factor daño por vehículo comercial
$Wtx$	Es el número de aplicaciones de carga por eje de magnitud X (kilolibras) en el tiempo t.
$W_{18}$	Es el número de aplicaciones de carga por eje de magnitud 18 kilo-libras en el tiempo t.
$i$	Corresponde a la línea de carga i analizada donde se determina la deformación de tracción.
$n_i$	Corresponde al número esperado de repeticiones de la línea de carga i
$N_i$	corresponde a el numero admisible de repeticiones para el control de la falla por agrietamiento originado por la deformación de tracción calculada bajo la línea de carga i

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, $P_t= 2.5$ .	35
Tabla 2. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes tándems, $P_t= 2.5$	36
Tabla 3..Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, $P_t= 2.5$ ..	37
Tabla 4. ASPHALT INSTITUTE´S EQUIVALENT AXLE LOAD FACTORS .....	40
Tabla 5.. Expresiones para la estimación de los factores de equivalencia de carga utilizando el criterio de la ley de la cuarta potencia .....	43
Tabla 6.Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE) para afirmados, Pavimentos Flexibles y Semirrígido Según MTC Perú .....	44
Tabla 7.Expresiones para la estimación de los factores de equivalencia de carga utilizando el criterio de la ley de la cuarta potencia en ejes de semieje de rueda doble según AUSTROADS 2017 .....	46
Tabla 8.Expresiones para la estimación de los factores de equivalencia de carga utilizando el criterio de la ley de la cuarta potencia en ejes de semieje de rueda simple según AUSTROADS 2017 .....	47
Tabla 9.. Standard Axles for Different Axle Load Groups- Segun TRL .....	48
Tabla 10.Factor de distribución por carril según NCHRP (NCHRP, 2004)).....	59
Tabla 11.Valores recomendados de relaciones de Poisson .....	67
Tabla 12.Factores de confiabilidad RF, por fatiga de la mezcla asfáltica.....	73
Tabla 13.Valores seleccionados de serviciabilidad y confiabilidad según niveles de tránsito.	77
Tabla 14 Valores de Número estructural requerido .....	78
Tabla 15. Valores agrupados por rangos del número estructural requerido. ....	82
Tabla 16.Categorías de tránsito seleccionadas .....	83
Tabla 17.Categorías de resistencia de subrasante seleccionadas .....	83
Tabla 18..Categorías de tránsito y resistencias asumidas por INVIAS (Instituto Nacional de Vías, 1998).....	85
Tabla 19.Rangos de numero de repeticiones de ejes Equivalente en el carril y periodo de diseño para vías pavimentadas .....	86
Tabla 20. Rangos de resistencia de subrasante Manual de Carreteras de la república de Perú. ....	86

Tabla 21.. Categorías de tránsito y Sub rasante asumidas por “A guide to the Structural Designo of bitumen Surfaced Roads in Tropical and Sub-tropical Regions” .....	87
Tabla 22.Rangos de tránsito en función de ejes sencillos equivalentes ( $\Sigma$ EE) .....	88
Tabla 23.Coeficiente estructural y de drenaje asumidos para el prediseño de las estructuras representativas.....	89
Tabla 24. Prediseño de estructuras metodología AASHTO.....	91
Tabla 25.Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos Colombia.....	93
Tabla 26.Rangos de temperatura asumidos y valores representativos de temperatura ambiente .....	94
Tabla 27. Clasificación de ciudades por regiones .....	96
Tabla 28. Valores de mezclas asfálticas con productos Humberto Quintero en la zona andina .....	97
Tabla 29. . Valores de mezclas asfálticas con productos Humberto Quintero en la Costa Caribe .....	97
Tabla 30. Valores de mezclas asfálticas con productos Humberto Quintero en la Zona Oriental .....	98
Tabla 31. Valores de mezclas asfálticas con productos Humberto Quintero en la Sur Occidente .....	98
Tabla 32. Resultados complementarios de modulo dinámico de mezclas hechas con materiales de Humberto Quintero .....	99
Tabla 33.. parámetros de la curva maestra de módulo dinámico asumidos en este estudio ..	100
Tabla 34. Resultados de este análisis estructural (Temperatura = 15 °C).....	102
Tabla 35. Resultados de este análisis estructural (Temperatura = 20 °C).....	103
Tabla 36. Resultados de este análisis estructural (Temperatura = 25 °C).....	104
Tabla 37. Vehículos analizados con sus respectivas cargas totales y discriminadas en cada eje. ....	106
Tabla 38.Hoja de Cálculo para el factor de equivalencia de carga para el vehículo C3-S3 por la metodología AASHTO-93 .....	109
Tabla 39. Estimación del Factor Daño del vehículo C2- Pequeño por la metodología AASHTO .....	111

Tabla 40. Estimación del Factor Daño del vehículo C2- Grande por la metodología AASHTO .....	113
Tabla 41. Estimación del Factor Daño del vehículo C3 por la metodología AASHTO .....	115
Tabla 42. Estimación del Factor Daño del vehículo C3-S2 por la metodología AASHTO...	117
Tabla 43. Estimación del Factor Daño del vehículo C3-S3 por la metodología AASHTO...	119
Tabla 44. Configuración vehicular y distribución de cargas por llanta .....	121
Tabla 45. Coordenadas y parámetros de las cargas por rueda para cada eje.....	122
Tabla 46. Coordenadas y parámetros de las cargas por rueda del eje equivalente .....	122
Tabla 47. Característica de los diferentes tipos de ejes analizados .....	123
Tabla 48. Información del modelo estructural .....	123
Tabla 49. Puntos críticos para el análisis estructural .....	124
Tabla 50. Resultados de la evaluación estructural para cada eje .....	124
Tabla 51. Ubicación de tablas y figuras correspondientes a consumos unitarios y factores daño obtenidos del análisis estructural de los vehículos .....	130
Tabla 52. Factor daño del análisis por tracción en la carpeta asfáltica y por compresión en la subrasante del camión C2 pequeño.....	131
Tabla 53. Factor daño del análisis por Compresión en la carpeta asfáltica y por compresión en la subrasante del camión C2 Grande.....	134
Tabla 54.. Factor daño del análisis por tracción en la carpeta asfáltica y por compresión en la subrasante del camión C3 .....	137
Tabla 55. Factor daño del análisis por tracción en la carpeta asfáltica y por compresión en la subrasante del camión C3-S2.....	140
Tabla 56. Factor daño del análisis por tracción en la carpeta asfáltica y por compresión en la subrasante del camión C3-S3.....	143
Tabla 57. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Simple Rueda Doble .....	147
Tabla 58. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Tándem Rueda Doble .....	149
Tabla 59. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Trídem Rueda Doble.....	151

Tabla 60. Factores daño por vehículo determinados según criterios de la cuarta potencia comparados con recomendaciones de Instituto del Asfalto.....	153
Tabla 61. Resultados de factores daño del camión C2- pequeño utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.....	156
Tabla 62. Resultados de factores daño del camión C2- grande utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.....	158
Tabla 63. Resultados de factores daño del camión C3 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.....	161
Tabla 64. Resultados de factores daño del camión C3-S2 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.....	163
Tabla 65. Resultados de factores daño del camión C3-S3 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.....	166
Tabla 66. Factores daño por vehículo determinados según criterios de la cuarta potencia comparados con recomendaciones de Instituto del Asfalto.....	170
Tabla 67. Factores daño por vehículo determinados según AASHTO y método mecanicista	172

## LISTADO DE FIGURAS

Figura. 1. Modelo de comportamiento de serviciabilidad	32
Figura. 2. Carta L conversión de carga por eje	38
Figura. 3. Diagrama para la estimación del factor de equivalencia de carga para ejes simples y Tandem	39
Figura. 4. Esquema del proceso de diseño según método racional	55
Figura. 5. Curva maestra Mezcla MDC 19 (Humberto Quintero O Y CIA SCA)	64
Figura. 6. modelo estructural de pavimento bajo la acción del semieje equivalente de 80 kN	68
Figura. 7. Parámetros estructurales de entrada Software OPEN PAVE	69
Figura. 8. Características de las cargas por rueda Software OPEN PAVE	70
Figura. 9. Información de los sitios de análisis dentro de la estructura y subrasante	70
Figura. 10. Parámetros de interés para la evaluación y análisis estructural.	71
Figura. 11 Valores de número estructural requerido para el primer rango de transito	79
Figura. 12 Valores de número estructural requerido para el segundo rango de transito	80
Figura. 13 Valores de número estructural requerido para el tercer rango de transito	81
Figura. 14. Gráfico de comportamiento del factor daño del vehículo C2- Pequeño por la metodología AASHTO	112
Figura. 15. Gráfico de comportamiento del factor daño del vehículo C2- Grande por la metodología AASHTO	114
Figura. 16. Gráfico de comportamiento del factor daño del vehículo C3 por la metodología AASHTO	116
Figura. 17. Gráfico de comportamiento del factor daño del vehículo C3-S2 por la metodología AASHTO	118
Figura. 18. Gráfico de comportamiento del factor daño del vehículo C3-S3 por la metodología AASHTO	120
Figura. 19 Ilustración de los puntos de análisis para evaluar los ejes tándem. (Tomada del libro de Yang Huang)	126
Figura. 20. Ilustración de los puntos de análisis para evaluar los ejes tridem. (Tomada del libro de Yang Huang)	126
Figura. 21 Gráfico de comportamiento del factor daño a tracción del vehículo C2- Pequeño por la metodología de la elástica de la deformada	132

Figura. 22. Gráfico de comportamiento del factor daño a Compresión del vehículo C2- Pequeño por la metodología de la elástica de la deformada	133
Figura. 23. Gráfico de comportamiento del factor daño a tracción del vehículo C2- Grande por la metodología de la elástica de la deformada	135
Figura. 24. Gráfico de comportamiento del factor daño a Compresión del vehículo C2- Grande por la metodología de la elástica de la deformada	136
Figura. 25. Gráfico de comportamiento del factor daño a tracción del vehículo C3 por la metodología de la elástica de la deformada	138
Figura. 26. Gráfico de comportamiento del factor daño a Compresión del vehículo C3 por la metodología de la elástica de la deformada	139
Figura. 27. Gráfico de comportamiento del factor daño a tracción del vehículo C3-S2 por la metodología de la elástica de la deformada	141
Figura. 28. Gráfico de comportamiento del factor daño a Compresión del vehículo C3-S2 por la metodología de la elástica de la deformada	142
Figura. 29. Gráfico de comportamiento del factor daño a tracción del vehículo C3-S3 por la metodología de la elástica de la deformada	144
Figura. 30. Gráfico de comportamiento del factor daño a Compresión del vehículo C3-S3 por la metodología de la elástica de la deformada	145
Figura. 31. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Simple Rueda Doble	148
Figura. 32. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Tándem Rueda Doble	150
Figura. 33. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Trídem Rueda Doble	152
<i>Figura. 34. Resultados promedio de factores daño del camión C3-S2 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito</i>	157
<i>Figura. 35. Resultados promedio de factores daño del camión C2- grande utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito</i>	159
<i>Figura. 36. Resultados promedio de factores daño del camión C3-S2 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito</i>	162

<i>Figura. 37. Resultados promedio de factores daño del camión C3-S2 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito</i>	164
Figura. 38. Resultados promedio de factores daño del camión C3-S3 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.	167
Figura. 39.Elástica de micro deformación (Tracción)	173
Figura. 40.Elástica de micro deformación (Compresión)	174

## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	32
Ecuación 2	32
Ecuación 3	33
Ecuación 4	33
Ecuación 5	33
Ecuación 6	33
Ecuación 7	33
Ecuación 8	33
Ecuación 9	38
Ecuación 10	39
Ecuación 11	41
Ecuación 12	41
Ecuación 13	41
Ecuación 14	41
Ecuación 15	42
Ecuación 16	42
Ecuación 17	43
Ecuación 18	43
Ecuación 19	43
Ecuación 20	43
Ecuación 21	44
Ecuación 22	44
Ecuación 23	44
Ecuación 24	44
Ecuación 25	44
Ecuación 26	44
Ecuación 27	46
Ecuación 28	46
Ecuación 29	46
Ecuación 30	46

Ecuación 31	47
Ecuación 32	47
Ecuación 33	47
Ecuación 34	47
Ecuación 35	49
Ecuación 36	49
Ecuación 37	60
Ecuación 38	61
Ecuación 39	66
Ecuación 40	66
Ecuación 41	66
Ecuación 42	66
Ecuación 43	66
Ecuación 44	66
Ecuación 45	67
Ecuación 46	68
Ecuación 47	72
Ecuación 48	72
Ecuación 49	73
Ecuación 50	73
Ecuación 51	74
Ecuación 52	74
Ecuación 53	90
Ecuación 54	94
Ecuación 55	94
Ecuación 56	96
Ecuación 57	100
Ecuación 58	107
Ecuación 59	107
Ecuación 60	107
Ecuación 61	108

Ecuación 62	108
Ecuación 63	108
Ecuación 64	127
Ecuación 65	127
Ecuación 66	127
Ecuación 67	128
Ecuación 68	128
Ecuación 69	128

# 1 INTRODUCCIÓN

Desde 1969, las entidades gubernamentales de Colombia han involucrado varios acuerdos comerciales con diferentes países tales como: el Pacto Andino de Naciones, el Grupo de las Tres G (G-3), el Tratado de Libre Comercio, entre otros (Macea, L. F. et al, 2013). Esto ha implicado un aumento en la demanda de transporte de carga que circula por la infraestructura vial. En consecuencia, los vehículos modernos capaces de soportar una mayor carga originan un deterioro prematuro en las carreteras pavimentadas.

Actualmente en Colombia se está implementando metodologías internacionales para el análisis de estos vehículos pesados durante el dimensionamiento de las estructuras de pavimento, estableciendo factores de equivalencia de carga por eje según los criterios obtenidos en el ensayo vial AASHO. Con base en esta información, se determinan los respectivos factores de daño de los diferentes camiones que circulan por las carreteras.

El análisis convencional de los vehículos de carga ha sido la metodología utilizada en el diseño de muchas carreteras en el país. Sin embargo, con el desarrollo de los estudios para la redacción del Manual de Diseño de Pavimentos se ha buscado en la nación una nueva concepción durante el dimensionamiento de las estructuras de pavimentos. Lo anterior ha originado especial interés en la nueva metodología conocida como MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide), la cual corresponde a un procedimiento más sofisticado para el diseño y análisis de los pavimentos basado en principios mecánico-empíricos. Esta nueva concepción de diseño en el caso particular de la variable tránsito contempla, entre otros aspectos, el análisis de las diferentes magnitudes de cargas por eje. Por lo tanto, en este proyecto de grado se pretende evaluar el efecto de las cargas por eje representativas y elaborar una metodología que permita cuantificar los efectos destructivos de los ejes de los vehículos pesados. Para esto, en este proyecto se planea desarrollar un software que permita analizar, por medio de las líneas de influencia de carga, el efecto de ejes tradicionales (simples, tándem, trídem) y los ejes de configuraciones diferentes con múltiples llantas y líneas.

El presente trabajo pretende dar a conocer un nuevo método para determinar los factores de equivalencia de carga utilizados en la cuantificación del tránsito equivalente de cualquier tipo de eje (multilínea). Adicionalmente, se pretende establecer un procedimiento para cuantificar (en el análisis estructural) el efecto de las cargas por eje cuando el tránsito se determine en términos de espectro de carga. En este aspecto, se planea considerar la acción de los ejes tradicionales y los ejes de configuraciones diferentes, además explicar los criterios y conceptos que se deben tener en cuenta con el fin de implementar este método de análisis en la estimación de la variable tránsito en el diseño racional de pavimentos.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Estimar por medio de líneas de influencia los factores de equivalencia de carga para determinar el tránsito equivalente y cuantificar el efecto de los diferentes tipos de ejes y vehículos dentro de las nuevas metodologías de dimensionamiento de los pavimentos flexible para que sean aplicables en las condiciones de materiales, de estructuras y de niveles de tránsito de Colombia.

### 2.2 Objetivos específicos

- Describir la metodología para determinar las líneas de influencia contemplando la configuración de diferentes tipos de ejes utilizados por los vehículos de carga típicos y vehículos especiales que circulan por las carreteras colombianas.
- Determinar para las condiciones de nuestro país los factores de equivalencia de carga usando las líneas de influencia según diferentes criterios de respuesta estructural como esfuerzos y deformaciones.
- Comparar los factores de equivalencia de carga obtenidos por medio de las líneas de influencia con los valores usados tradicionalmente en nuestro país y a nivel internacional utilizando diferentes metodologías
- Elaborar un software que permita por medio de la cuantificación y el trazado de las líneas de influencia estimar los factores de equivalencia de carga y valorar el efecto de las cargas que se implementa en las nuevas metodologías de dimensionamiento de los pavimentos flexibles.
- Elaborar una guía de alimentación del software para el cálculo de la elástica mediante ejemplos de aplicación para pavimentos flexibles.

## **3 METODOLOGÍA**

### **3.1 Revisión bibliográfica sobre evaluación de las cargas sobre estructuras de pavimentos flexibles.**

La revisión bibliográfica que se plantea llevar a cabo será la primera labor en el presente proyecto, ya que por medio de esta podremos conocer el estado del arte y el desarrollo que diferentes autores a nivel nacional e internacional han evaluado y han utilizado para cuantificar las cargas sobre las estructuras de los pavimentos flexibles.

En nuestro país podemos encontrar información relacionada con la evaluación de las cargas sobre estructuras de pavimentos flexibles en la Universidad del Cauca, Universidad de Los Andes, Universidad del Norte y Universidad Nacional, las cuales son actualmente los pilares en la ingeniería de pavimentos debido al desarrollo tecnológico que se ha podido implementar en el país gracias a las tecnologías desarrolladas en sus estudios y laboratorios.

### **3.2 Adquisición y determinación de variables necesarias para el proyecto de grado.**

Este proyecto de grado contemplará las variables necesarias para la evaluación de las cargas sobre la estructura de un pavimento flexible, es por eso que a continuación se expone la información necesaria que sirve como insumo principal para poder llevar a cabo el proyecto de grado contemplando las condiciones vehiculares en las carreteras colombianas.

#### **3.2.1 Adquisición y determinación de información de las configuraciones típicas de los diferentes tipos de camiones que circulan por las carreteras nacionales en Colombia**

Para este apartado se utilizará la información reglamentada por las diferentes entidades que regulan el transporte en Colombia como el Ministerio de Transportes.

### **3.2.2 Determinación de las características geométricas de las configuraciones típicas de los diferentes tipos de ejes utilizadas por los vehículos de carga.**

La determinación de las características de los diferentes tipos de ejes se realizará considerando los vehículos de carga que han sido utilizados en los últimos 10 años, ya que la evolución que ha tenido el transporte de carga por los diferentes corredores ha cambiado desde su inicio debido a la presencia de algunos nuevos vehículos que han permitido transportar mayor carga a lo largo del territorio nacional.

### **3.2.3 Determinación de rangos de tránsito representativos de la red vial nacional colombiana.**

Con el fin de establecer diferentes rangos de tránsito de ejes equivalentes que originan los vehículos durante el periodo de diseño en los diferentes corredores a nivel nacional, se realiza una sensibilización de la influencia de la variación de los rangos del tránsito con base en el estudio planteado y estos valores se compararan con los establecidos por INVIAS en su manual de diseño de pavimentos flexibles y algunos organismos internacionales.

### **3.2.4 Determinación de rangos de resistencias típicos de los suelos de sub rasante.**

Según el instituto geográfico Agustín Codazzi 1995 existen en Colombia 25 grupos de suelos bien definidos los cuales presentan variabilidad debido al gran número de condiciones (geológicas, topográficas y climáticas) que existen en el país, por tal razón para ejecutar este estudio se determinaran los rangos de resistencia para los suelos típicos de sub-rasante. Para esta actividad se consultan a nivel nacional e internacional los rangos de niveles de resistencia que se contemplan por diferentes organismos de investigación que plantean metodologías de diseño de pavimentos flexibles para ajustarlas a las condiciones de suelos de Colombia.

### **3.2.5 Determinación y selección de estructuras típicas.**

Con el fin de establecer modelos estructurales de pavimentos representativos de las carreteras colombianas, se determina para este estudio los espesores y las características dinámicas de cada una de las capas de los esquemas estructurales seleccionados obtenidos de las combinaciones y sensibilizaciones de las diferentes variables de diseño.

### **3.3 Evaluación del efecto de las cargas por eje representativas**

Luego de haber definido y determinado las variables necesarias para el desarrollo de este trabajo de grado, se evalúa según metodologías de AASHTO y mecánico empíricas los efectos de los vehículos pesados utilizando diferentes modelos estructurales.

### **3.4 Desarrollo de software**

Con el propósito de determinar las líneas de influencia de carga originadas por las diferentes cargas por eje de los vehículos típicos utilizados en el país, se desarrolla un programa de computador utilizando el software OpenPave que permite el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones sobre estructuras de pavimentos.

### **3.5 Elaboración de metodología**

Por medio de este trabajo de grado se establece una metodología que permita cuantificar los efectos destructivos de los ejes y de los vehículos pesados utilizando las líneas de influencia originadas por las cargas por eje, para que sean aplicables en el dimensionamiento de los pavimentos flexibles.

### **3.6 Análisis de resultados**

Finalmente, se realiza una evaluación y análisis de los resultados que permita ayudar a establecer el efecto de la circulación de los vehículos pesados sobre las estructuras de pavimento flexible.

## **4 ESTADO DEL ARTE**

### **4.1 Introducción**

Como resultado de los estudios a escala natural realizados por la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras (AASHO) entre los años 1956 a 1960, se popularizó en muchos países la cuantificación de la variable tránsito para el dimensionamiento de pavimentos en términos del tránsito equivalente, cuantificando todo el efecto de las cargas en el carril de diseño y en el periodo de diseño en términos de la acción de una carga de un eje simple de rueda doble en cada semieje, con una magnitud total del eje de 18 kips, 80 kN u 8.2 t, tendencia que se ha mantenido por más de 40 años y en los últimos años como resultados de los estudios de AASHTO publicados a partir del año 2002 en sus nuevas versiones de diseño de pavimentos, se ha difundido una nueva opción para cuantificar el tránsito de diseño considerando espectros de carga por eje y la determinación de repeticiones de carga por eje para el dimensionamiento de pavimentos.

En este capítulo con base en los resultados de una revisión bibliográfica, se presenta una síntesis de la evolución de los estudios realizados y las metodologías, recomendaciones y expresiones planteadas por diferentes entidades para poder determinar los factores de equivalencia de carga por eje que permiten determinar el efecto de una carga por eje para convertirla en una carga de referencia estandarizada como el eje equivalente de 80 kN, partiendo de los resultados del ensayo vial AASHO, las expresiones simplificadas y la metodología mecanicista. Igualmente, en este capítulo se consignan algunas experiencias, estudios y aplicaciones nacionales e internacionales realizadas en este campo.

### **4.2 Ensayo vial AASHO ROAD TEST**

Uno de los estudios más referenciados a nivel internacional, que ha servido como base para el soporte del dimensionamiento y análisis de pavimentos, es el ensayo vial “AASHO Road Test”, realizado en el estado de Illinois al Sur-Este de la ciudad de Chicago en la carretera entre las ciudades de Ottawa y Utica en Estados Unidos entre los años de 1956 a 1960. (Valle Rodas, 1971)

En este ensayo a escala real se planteó la construcción de 6 circuitos en forma de ojal, en los cuales se planteó el estudio de estructuras de pavimentos flexible y pavimentos rígidos utilizando diferentes tipos de materiales dentro de las 836 secciones estructurales construidas, y también se estudió el comportamiento de 16 puentes, de los cuales 4 se construyeron con concreto reforzado, 4 puentes con concreto pretensado y 8 puentes metálicos (Valle Rodas, 1971)

Para poder tener una referencia de la magnitud del estudio, en el campo específico de los estudios de pavimentos, se referencia la construcción de 836 secciones de pavimentos con longitudes de 4.60 m y 30.50 m con sus respectivas transiciones, de las cuales 486 secciones correspondieron a estructuras de pavimentos flexibles con diferentes tipos de materiales y espesores en las capas intermedias de subbase y base (granulares y estabilizadas) y en la capa de rodadura. Para evaluar los pavimentos rígidos se ensayaron 386 secciones.

Dentro de los objetivos del ensayo vial AASHO además de estudiar el comportamiento de los pavimentos y de los puentes bajo la acción del tránsito y clima para poder obtener especificaciones de materiales y guías para incorporarlas al dimensionamiento de estas estructuras, se destaca un objetivo que buscaba determinar el efecto de las diferentes magnitudes de carga por eje sobre las diferentes estructuras de pavimentos construidas con diferentes espesores y materiales, para lo cual las secciones estructurales fueron sometidas a cargas por eje sencillo en un rango 2000 a 30000 libras y para el eje tandem un rango entre 24000 a 48000 libras, con un tránsito actuando 18 horas diarias durante 6 días por semana con una velocidad promedio de 56 KPH, durante el tiempo de evaluación comprendido entre los años 1958 a 1960. (Valle Rodas, 1971)

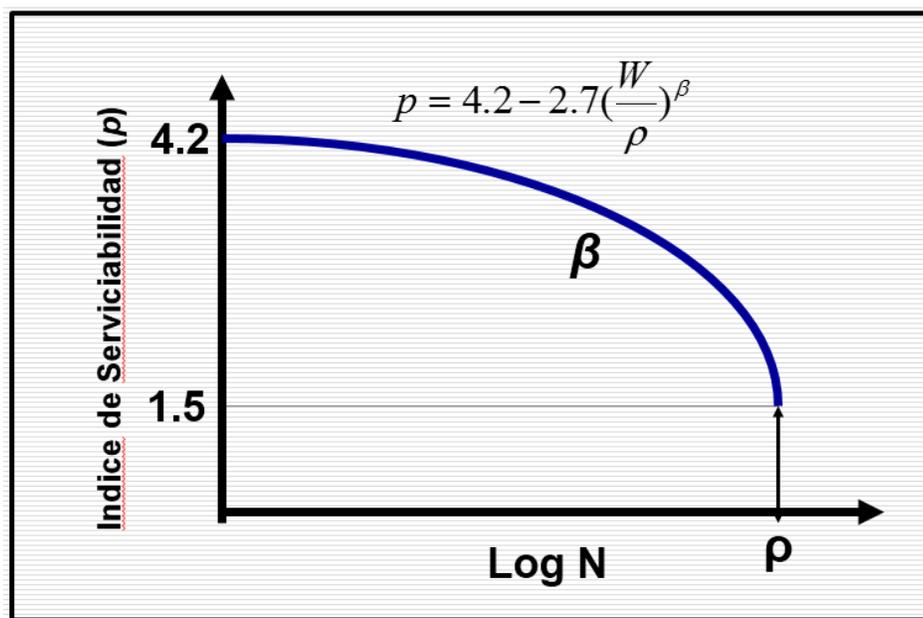
Para evaluar el comportamiento de los pavimentos bajo la acción de las cargas se realizaron análisis de la evolución de los deterioros de las secciones de pavimentos cada dos semanas y se estableció un parámetro llamado “índice de serviciabilidad” ( $\rho$ ), que permitió subjetiva y objetivamente calificar la evolución del comportamiento de las diferentes secciones estructurales a través del tiempo y bajo la acción de las diferentes cargas por eje en una escala entre 0 y 5, correspondiendo a un pavimento en condiciones pésimas cuando el valor varíe entre 0 y 1 y calificándose al pavimento con valores entre 4 y 5 cuando se encuentre en muy buenas condiciones. (Valle Rodas, 1971)

$$p = 5.03 - 1.9 * \log(1 + SV) - 1.38(RD)^2 - 0.01(C + P)^{0.5}$$

Ecuación 1

Con base en estos análisis periódicos se estableció un modelo de comportamiento de serviciabilidad, que para los pavimentos flexibles en forma gráfica se representa con el siguiente esquema y con la siguiente expresión general (Figura. 1).

Figura. 1. Modelo de comportamiento de serviciabilidad



Fuente: Elaboración propia adaptado de Valle Rodas, 1971

$$p = 4.2 - 2.7 \left(\frac{W}{\rho}\right)^\beta$$

Ecuación 2

Como resultado de este estudio además de permitir obtener los criterios para el dimensionamiento de los pavimentos flexibles y rígidos, considerando en el caso particular de los pavimentos flexibles, criterios de serviciabilidad, número estructural, resistencia de la subrasante y tránsito equivalente, se presentó un procedimiento para poder establecer la conversión del tránsito mixto de una vía en tránsito equivalente, utilizando inicialmente para los ejes tandem y tridem el procedimiento para realizar la conversión de las diferentes magnitudes de carga de estos dos tipos de eje en ejes equivalentes de 18 kips ó 80 kN.

### 4.3 Factores de Equivalencia de Carga según método AASHTO

Este método está basado principalmente en los resultados del ensayo vial AASHO realizado en los años 1958 a 1960, el cual permite determinar los factores de equivalencia de los ejes simples, tándem y tridem de rueda doble en las estructuras de pavimentos flexibles y rígidos (Valle Rodas, 1971).

Según los estudios de AASHTO, el factor de equivalencia de carga corresponde a un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por una magnitud de carga dada de un tipo de eje y la producida por el eje estándar de 80 kN (18 kips ó 8.2 t) y se expresa en forma simplificada mediante la siguiente relación (Valle Rodas, 1971):

$$FEC = \frac{\text{Número de ejes de 80 kN que producen una pérdida de serviciabilidad}}{\text{Número de ejes de 80 kN que producen la misma pérdida de serviciabilidad}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para determinar los factores de equivalencia de carga por eje en la estructura de pavimentos flexible, el método AASHTO recomienda las siguientes expresiones (Valle Rodas, 1976; AASHTO, 1972 & AASHTO, 1993).

$$FEC = \frac{W_{18}}{W_{tx}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right) = 4.79 \log(18 + 1) - 4.79 \log(L_x + L_2) + 4.33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$G_t = \log\left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5}\right) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.801(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$SN = a_1 h_1 + a_2 h_2 m_2 + a_3 h_3 m_3 \quad \text{Ecuación 8}$$

#### **4.4 Tablas recomendadas por el método AASHTO para determinar los factores de equivalencia de carga por eje.**

Como resultados del estudio realizado en el ensayo vial AASHTO, el método AASHTO en sus versiones de 1972, 1986, y 1993 publica una serie de tablas que contienen la información para poder determinar los factores de equivalencia de carga por eje originados por las diferentes magnitudes de carga de los ejes simples, tándem y trídem, con respecto al eje simple de rueda doble normalizado con una carga de 18 kips, (80 kN) y una presión de inflado de 80 psi. (AASHTO 1972, AASHTO 1986, AASHTO 1993)

La serie de tablas presentadas permite sensibilizar las siguientes variables y como referencia se presentan las tablas de factores de equivalencia de carga para los diferentes tipos de ejes para una serviciabilidad final de 2.5 y numero estructurales de 1 a 6. (AASHTO, 1896).

- Tipo de eje: simple rueda doble, tándem, tridem
- Índice de serviciabilidad final : 2, 2.5 y 3.0
- Numero estructural :1, 2,3,4, 5, 6
- Magnitudes de carga: variables

Tabla 1. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, Pt= 2.5

Carga por eje		SN					
(kips)	(KN)	1	2	3	4	5	6
2	8.9	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
4	17.8	0.003	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002
6	26.7	0.011	0.017	0.017	0.013	0.010	0.009
8	35.6	0.032	0.047	0.051	0.041	0.034	0.031
10	44.5	0.078	0.102	0.118	0.102	0.088	0.080
12	53.4	0.168	0.198	0.229	0.213	0.189	0.176
14	62.3	0.328	0.358	0.399	0.388	0.360	0.342
16	71.2	0.591	0.613	0.646	0.645	0.623	0.606
18	80	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	89	1.61	1.57	1.49	1.47	1.51	1.55
22	97.9	2.48	2.38	2.18	2.09	2.18	2.30
24	106.8	3.69	3.49	3.09	2.89	3.03	3.27
26	115.7	5.33	4.99	4.31	3.91	4.09	4.48
28	124.6	7.49	6.98	5.90	5.21	5.39	5.98
30	133.5	10.30	9.50	7.90	6.80	7.00	7.80
32	142.4	13.90	12.80	10.50	8.80	8.90	10.00
34	151.3	18.40	16.90	13.70	11.30	11.20	12.50
36	160	24.00	22.00	17.70	14.40	13.90	15.50
38	169.1	30.90	28.30	22.60	18.10	17.20	19.00
40	178	39.30	35.90	28.50	22.50	21.10	23.00
42	186.9	49.30	45.00	35.60	27.80	25.60	27.70
44	195.8	61.30	55.90	44.00	34.00	31.00	33.10
46	204.7	75.50	68.80	54.00	41.40	37.20	39.30
48	213.6	92.20	83.90	65.70	50.10	44.50	45.50
50	222.5	112.00	102.00	78.00	60.00	53.00	55.00

Fuente: AASHTO, 1896

Tabla 2. Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes tándems, Pt= 2.5

Carga por eje		SN					
(kips)	(KN)	1	2	3	4	5	6
2	8.9	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
4	17.8	0.0005	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003	0.0002
6	26.7	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
8	35.6	0.004	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003
10	44.5	0.008	0.013	0.011	0.009	0.007	0.006
12	53.4	0.015	0.024	0.023	0.018	0.014	0.013
14	62.3	0.026	0.041	0.042	0.033	0.027	0.024
16	71.2	0.044	0.065	0.07	0.057	0.047	0.043
18	80	0.07	0.07	0.0109	0.092	0.077	0.07
20	89	0.107	0.141	0.162	0.141	0.121	0.11
22	97.9	0.16	0.198	0.229	0.207	0.18	0.166
24	106.8	0.231	0.273	0.315	0.292	0.26	0.242
26	115.7	0.327	0.37	0.42	0.401	0.364	0.342
28	124.6	0.451	0.493	0.548	0.534	0.495	0.47
30	133.5	0.611	0.648	0.703	0.695	0.658	0.633
32	142.4	0.813	0.83	0.889	0.887	0.857	0.834
34	151.3	1.06	1.08	1.11	1.11	1.09	1.08
36	160	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	169.1	1.75	1.73	1.69	1.68	1.70	1.73
40	178	2.21	2.16	2.06	2.03	2.08	2.14
42	186.9	2.76	2.67	2.49	2.43	2.51	2.61
44	195.8	3.41	3.27	2.99	2.88	3.00	3.16
46	204.7	4.18	3.98	3.58	3.40	3.55	3.79
48	213.6	5.08	4.80	4.25	3.98	4.17	4.49
50	222.5	6.12	5.76	5.03	4.64	4.86	5.28
52	231.4	7.33	6.87	5.93	5.38	5.63	6.17
54	240.3	8.72	8.14	6.95	6.22	6.47	7.15
56	249.2	10.30	9.60	8.10	7.20	7.40	8.20
58	258.1	12.10	11.30	9.40	8.20	8.40	9.40
60	267	14.20	13.10	10.90	9.40	9.60	10.70
62	275.9	16.50	15.30	12.60	10.70	10.80	12.10
64	284.7	19.10	17.60	14.50	12.20	12.20	13.70
66	293.6	22.10	20.30	16.60	13.80	13.70	15.40
68	302.5	25.30	23.30	18.90	15.60	15.40	17.20
70	311.4	29.00	26.60	21.50	17.60	17.20	19.20
72	320.3	33.00	30.30	24.40	19.80	19.20	21.30
74	329.2	37.50	34.40	27.60	22.20	21.60	23.60
76	337.1	42.50	38.90	31.10	24.80	23.70	26.10
78	347	48.00	43.90	35.00	27.80	26.20	28.80
80	355.9	54.00	49.40	39.20	30.90	29.00	31.70
82	364.8	60.60	55.40	43.90	34.40	32.00	34.80
84	373.7	67.80	61.90	49.00	38.20	35.30	38.10
86	382.6	75.70	69.10	54.50	42.30	38.80	41.70
88	391.5	84.30	76.90	60.60	46.80	42.60	45.60
90	400.4	93.70	85.40	67.10	51.70	46.80	49.70

Fuente: AASHTO, 1896

Tabla 3..Factores de equivalencia de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, Pt= 2.5

Carga por eje		SN					
(kips)	(KN)	1	2	3	4	5	6
2	8.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	17.8	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
6	26.7	0.0006	0.0007	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003
8	35.6	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
10	44.5	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002
12	53.4	0.005	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003
14	62.3	0.008	0.012	0.01	0.008	0.006	0.006
16	71.2	0.012	0.019	0.018	0.013	0.011	0.01
18	80	0.018	0.029	0.028	0.021	0.017	0.016
20	89	0.027	0.042	0.042	0.032	0.027	0.024
22	97.9	0.038	0.058	0.06	0.048	0.04	0.036
24	106.8	0.053	0.078	0.084	0.068	0.057	0.051
26	115.7	0.072	0.103	0.114	0.095	0.08	0.072
28	124.6	0.098	0.133	0.151	0.128	0.109	0.099
30	133.5	0.129	0.169	0.195	0.17	0.145	0.133
32	142.4	0.169	0.123	0.247	0.22	0.191	0.175
34	151.3	0.22	0.266	0.31	0.28	0.25	0.23
36	160	0.28	0.329	0.38	0.35	0.31	0.29
38	169.1	0.35	0.403	0.46	0.44	0.39	0.37
40	178	0.44	0.49	0.55	0.53	0.49	0.46
42	186.9	0.54	0.59	0.66	0.64	0.60	0.57
44	195.8	0.67	0.71	0.78	0.77	0.72	0.69
46	204.7	0.81	0.85	0.92	0.91	0.87	0.84
48	213.6	0.98	1.02	1.07	1.07	1.03	1.01
50	222.5	1.17	1.20	1.24	1.25	1.22	1.20
52	231.4	1.40	1.41	1.44	1.44	1.43	1.41
54	240.3	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	249.2	1.95	1.93	1.90	1.90	1.91	1.93
58	258.1	2.29	2.25	2.17	2.16	2.20	2.24
60	267	2.67	2.60	2.48	2.44	2.51	2.58
62	275.9	3.09	3.00	2.82	2.76	2.85	2.95
64	284.7	3.57	3.44	3.19	3.10	3.22	3.36
66	293.6	4.11	3.94	3.61	3.47	3.62	3.81
68	302.5	4.71	4.49	4.06	3.88	4.05	4.30
70	311.4	5.38	5.11	4.57	4.32	4.52	4.84
72	320.3	6.12	5.79	5.13	4.80	5.03	5.41
74	329.2	6.93	6.54	5.74	5.32	5.57	6.04
76	337.1	7.84	7.37	6.41	5.88	6.15	6.71
78	347	8.83	8.28	7.14	6.49	6.78	7.43
80	355.9	9.92	9.28	7.95	7.15	7.45	8.21
82	364.8	11.10	10.40	8.80	7.90	8.20	9.00
84	373.7	12.40	11.60	9.80	8.60	8.90	9.90
86	382.6	13.80	12.90	10.80	9.50	9.80	10.90
88	391.5	15.40	14.30	11.90	10.40	10.60	11.90
90	400.4	17.10	15.80	13.20	11.30	11.60	12.90

Fuente: AASHTO, 1896

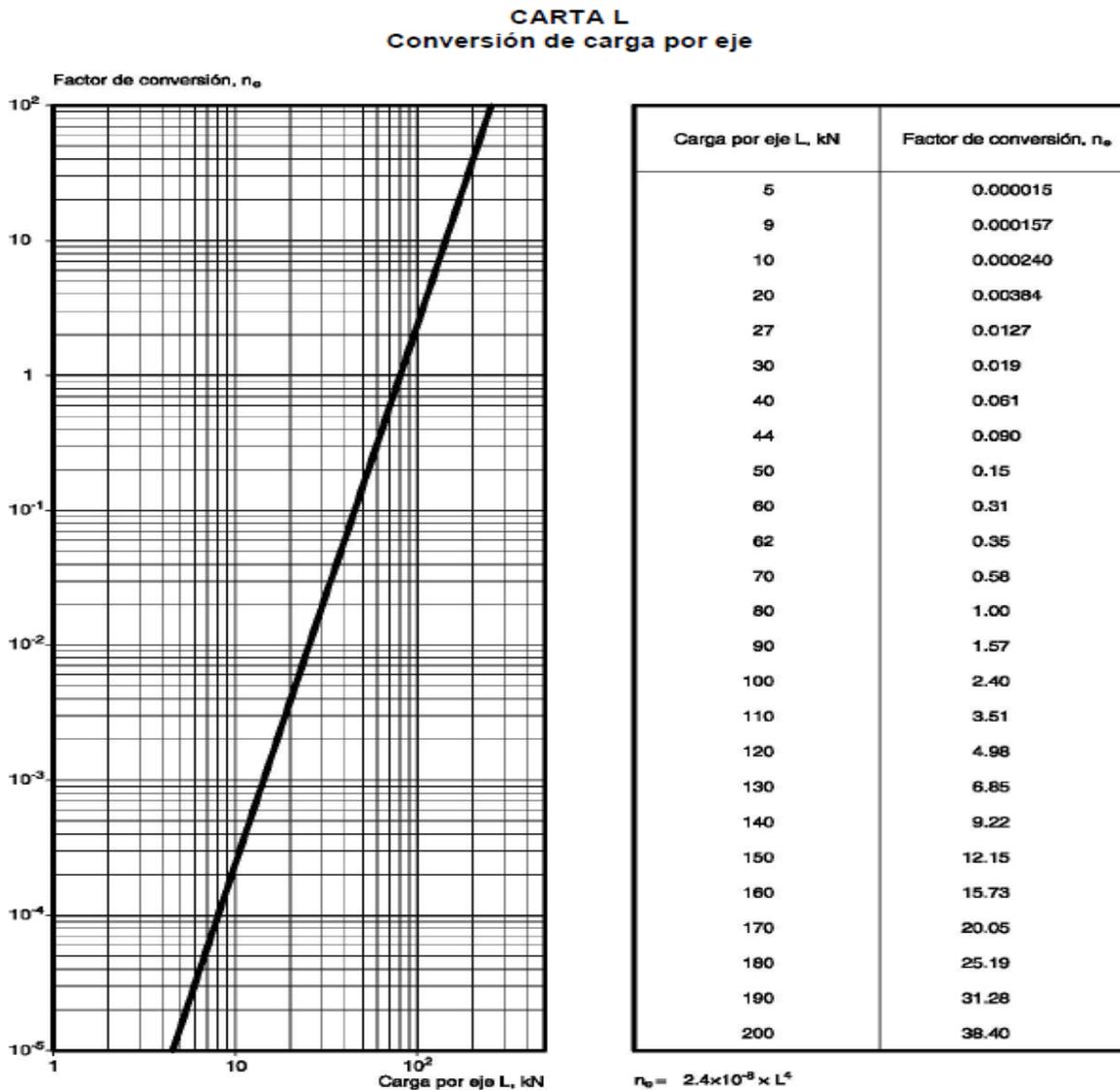
#### 4.5 Factores de equivalencia de carga según método SHELL

El documento del método SHELL publicado en el año de 1978 (SHELL, 1978), el cual sirvió como una metodología de referencia y de consulta en nuestro país para la realización de muchos diseños de pavimentos flexibles, consigna en dicha publicación que para transformar el efecto de las diferentes cargas por eje en ejes equivalentes a 80 kN, se utilice la siguiente expresión o los valores obtenidos de la Figura. 2.

$$Ne = 2.4 * 10^{-8} * L^4$$

Ecuación 9

Figura. 2. Carta L conversión de carga por eje



Fuente: SHELL, 1978

#### 4.6 Método del Instituto del Asfalto

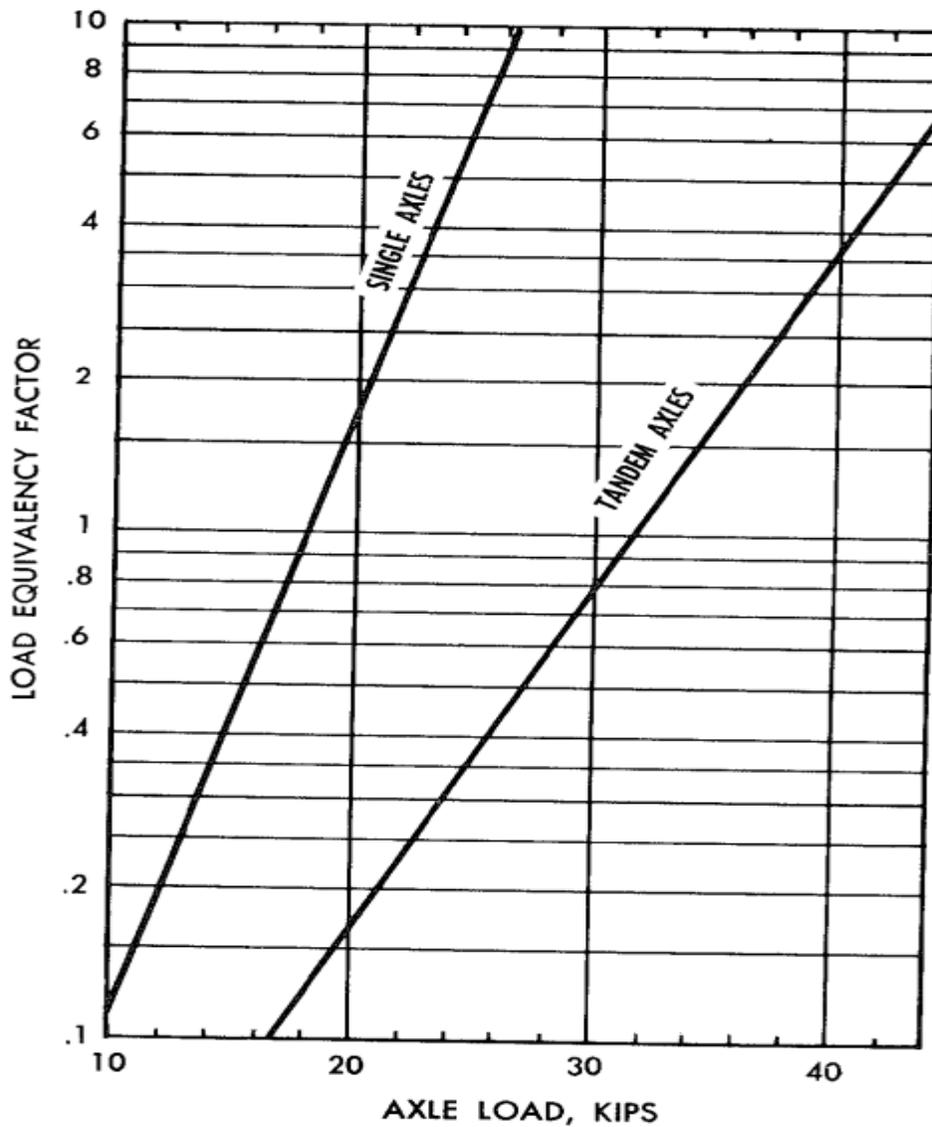
El método del Instituto del asfalto en sus primeras versiones (Asphalt Institute ,1969) consideró las siguientes expresiones y la siguiente Figura. 3 para determinar los factores de equivalencia de carga por eje originados por las cargas por eje de los ejes simples y tándem.

$$FEC = 10^{0.118*(Lj-18)}$$

Ecuación

10

Figura. 3. Diagrama para la estimación del factor de equivalencia de carga para ejes simples y Tandem



Fuente: Asphalt Institute ,1969

El método del Instituto del Asfalto en su método de diseño publicado en el año de 1981, plantea un nuevo procedimiento para determinar los factores de equivalencia de carga para los ejes simples, tanden y tridem, asumiendo los valores de factores de equivalencia de carga consignados en el método AASHTO de 1986, para unas condiciones particulares de número estructural fijo con un valor de SN=5 y una serviciabilidad final  $pt=2.5$ , información que se presenta sintetizada en la Tabla 4.

Tabla 4. ASPHALT INSTITUTE'S EQUIVALENT AXLE LOAD FACTORS

Axle load (lb)	EQUIVALENT AXLE LOAD FACTOR			Axle load (lb)	EQUIVALENT AXLE LOAD FACTOR		
	Single Axles	Tandem Axles	Tridem Axles		Single Axles	Tandem Axles	Tridem Axles
1,000	0.00002			41,000	23.27	2.29	0.54
2,000	0.00018			42,000	25.64	2.51	0.597
3,000	0.00072			43,000	28.22	2.76	0.658
4,000	0.00209			44,000	31	3	0.7723
5,000	0.005			45,000	34	3.27	0.793
6,000	0.01043			46,000	37.24	3.55	0.868
7,000	0.0196			47,000	40.74	3.85	0.948
8,000	0.0343			48,000	44.5	4.117	1.033
9,000	0.0562			49,000	48.54	4.51	1.12
10,000	0.0877	0.00688	0.002	50,000	52.88	4.86	1.22
11,000	0.1311	0.01008	0.002	51,000		5.23	1.32
12,000	0.189	0.0144	0.003	52,000		5.63	1.43
13,000	0.264	0.0199	0.005	53,000		6.04	1.54
14,000	0.36	0.027	0.006	54,000		6.47	1.66
15,000	0.478	0.036	0.008	55,000		6.93	1.78
16,000	0.623	0.0472	0.011	56,000		7.41	1.91
17,000	0.796	0.0608	0.014	57,000		7.92	2.05
18,000	1	0.0773	0.017	58,000		8.45	2.2
19,000	1.24	0.0971	0.022	59,000		9.01	2.35
20,000	1.51	0.1206	0.027	60,000		9.59	2.51
21,000	1.83	0.148	0.033	61,000		10.2	2.07
22,000	2.18	0.18	0.04	62,000		10.84	2.85
23,000	2.58	0.217	0.048	63,000		11.52	3.03
24,000	3.03	0.26	0.057	64,000		12.22	3.22
25,000	3.53	0.308	0.067	65,000		12.96	3.41
26,000	4.09	0.364	0.08	66,000		13.73	3.62
27,000	4.71	0.426	0.093	67,000		14.54	3.83
28,000	5.39	0.495	0.109	68,000		15.38	4.05
29,000	6.14	0.572	0.126	69,000		16.26	4.28
30,000	6.97	0.658	0.145	70,000		17.19	4.52
31,000	7.88	0.753	0.167	71,000		18.15	4.77
32,000	8.88	0.857	0.191	72,000		19.16	5.03
33,000	9.98	0.971	0.217	73,000		20.22	5.29
34,000	11.18	1.095	0.246	74,000		21.32	5.57
35,000	12.5	1.23	0.278	75,000		22.47	5.86
36,000	13.93	1.38	0.313	76,000		23.66	6.15
37,000	15.5	1.53	0.352	77,000		24.91	6.46
38,000	17.2	1.7	0.393	78,000		26.22	6.78
39,000	19.06	1.89	0.438	79,000		27.58	7.11
40,000	21.08	2.08	0.487	80,000		28.99	7.45

Fuente: Asphalt Institute, 1969

#### 4.7 Factores de equivalencia de carga según método de Universidad Autónoma De México.

Un estudio mexicano presentado en el año de 1988 por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes y el Instituto Mexicano del Transporte , presenta un procedimiento para determinar coeficientes de equivalencia de carga de los diferentes tipos de ejes y magnitudes de carga por eje, con respecto al eje simple de rueda doble estandarizado de 8.2 t (80 kN), utilizando el criterio desarrollado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) basado en la comparación de los daños que originan los esfuerzos verticales originados a diferentes profundidades de la estructura de pavimentos por una determinada carga por eje y la originada por el eje de referencia de 8.2 t (80 kN).

#### 4.8 Factores de equivalencia de carga según Ministerio de Transporte de Canadá.

El ministerio de Transporte de Canadá estableció un conjunto de modelos de factores de equivalencia de carga (LEF), después de un experimento llevado a cabo en todo el país durante la década de 1980. Estos modelos de LEF son los siguientes (Vásquez Montero, 2016):

Eje simple rueda simple	$LEF = 0.004836 * Load^{2.9093}$	Ecuación 11
Eje simple rueda dual	$LEF = 0.004836 * Load^{2.9093}$	Ecuación 12
Eje tándem – dual	$LEF = 0.004836 * Load^{2.9093}$	Ecuación 13
Eje trídem - dual	$LEF = 0.004836 * Load^{2.9093}$	Ecuación 14

Donde, Load es la carga en toneladas. La guía de diseño recomienda la calibración de los LEF a condiciones locales en caso de ser posible, ya que de región a región los factores varían.

#### 4.9 Cuantificación de los factores de equivalencia de carga empleado la ley de la 4ª potencia.

Un procedimiento simplificado muy utilizado para el cálculo del factor de equivalencia de carga por eje obtenido con base en un estudio desarrollado por Deacon (Huang, 2004), utilizando la teoría elástica sobre un modelo multicapa de pavimento, que permitió establecer el factor de equivalencia de carga por eje según la siguiente expresión utilizando un modelo de fatiga y relacionando la magnitud de deformación unitaria ocasionada por un eje de una carga determinada ( $\epsilon_x$ ) y la magnitud de la deformación unitaria originada por el eje estándar de referencia ( $\epsilon_{18}$ ).

$$FEC = \frac{Wt_{18}}{Wt_x} = \left( \frac{\epsilon_x}{\epsilon_{18}} \right)^4$$

Ecuación  
15

Considerando que las magnitudes de las deformaciones son directamente proporcionales a la magnitudes de las cargas por eje, utilizando la expresión de Deacon se ha planteado que existe una relación similar con las magnitud de la cargas obteniéndose la siguiente expresión simplificada para determinar los factores de equivalencia de carga conocida como “ la expresión de la cuarta potencia”, que relaciona en un determinado tipo de eje la magnitud de la carga por eje ( $L_x$ ) con respecto a la magnitud de la carga estandarizada de referencia en cada tipo de eje ( $L_s$ ). (Huang, 2004)

$$FEC = \frac{Wt_{18}}{Wt_x} = \left( \frac{L_x}{L_s} \right)^4$$

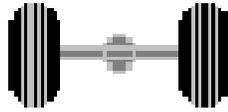
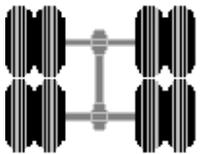
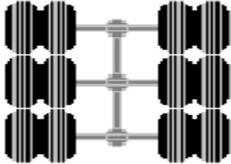
Ecuación  
16

Utilizando este criterio diferentes países han adoptado y considerado este procedimiento simplificado para obtener los factores de equivalencia, y han introducido variaciones en las magnitudes de carga de referencia para cada tipo de eje y también se han considerado algunas variaciones en los valores del exponente 4 por un valor dependiendo del modelo de fatiga adoptado.

#### 4.9.1 Recomendación de INVIAS 2008.

En la siguiente tabla se presentan las expresiones que tradicionalmente se ha utilizado en varios países y que fue adoptada en el manual de INVIAS del año 2008. Tabla 5.

Tabla 5.. Expresiones para la estimación de los factores de equivalencia de carga utilizando el criterio de la ley de la cuarta potencia

Sistema de eje	Esquema del eje	Fórmulas para el cálculo del factor de equivalencia
Simple de rueda simple		$FEC = \left[ \frac{\text{Carga por eje t}}{6.6 \text{ t}} \right]^4$ <p>Ecuación 17</p>
Simple de rueda doble		$FEC = \left[ \frac{\text{Carga por eje t}}{8.2 \text{ t}} \right]^4$ <p>Ecuación 18</p>
Tándem de rueda doble		$FEC = \left[ \frac{\text{Carga por eje t}}{15 \text{ t}} \right]^4$ <p>Ecuación 19</p>
Trídem de rueda doble		$FEC = \left[ \frac{\text{Carga por eje t}}{23 \text{ t}} \right]^4$ <p>Ecuación 20</p>

Fuente: Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías. (2008)

#### 4.9.2 Recomendación de manuales peruanos

Para poder establecer una comparación del manual colombiano con un país de condiciones similares, se revisó las expresiones utilizadas en los manuales peruanos para el dimensionamiento de pavimentos en vías de altos y bajos volúmenes de tránsito.

El Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito publicado por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones MTC de Perú en el año de 2008 considera expresiones similares a las consideradas por el Manual Colombiano.

El Manual de carreteras peruano del año 2013 publicado por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones MTC de Perú en su sección de suelos y pavimentos, para el cálculo de los factores de equivalencia de carga por eje plantea las siguientes expresiones, que han sido determinadas buscando correspondencia con las recomendaciones del apéndice D de la guía AASTO 1993. Tabla 6.

*Tabla 6. Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE) para afirmados, Pavimentos Flexibles y Semirrígido Según MTC Perú*

TIPO DE EJE	EJE EQUIVALENTE ( $EE_{8.2Tm}$ )
Eje simple de ruedas simples ( $EE_{s1}$ )	$EES1 = \left[ \frac{P}{6.6} \right]^4$ Ecuación 21
Eje simple de ruedas dobles ( $EE_{s2}$ )	$EES1 = \left[ \frac{P}{8.2} \right]^4$ Ecuación 22
Eje Tándem (1 eje ruedas dobles + 1 eje rueda simple) ( $EE_{TA1}$ )	$EES1 = \left[ \frac{P}{14.8} \right]^4$ Ecuación 23
Eje Tándem (2 ejes de ruedas dobles) ( $EE_{TA2}$ )	$EES1 = \left[ \frac{P}{15.1} \right]^4$ Ecuación 24
Eje Trídem (2 ejes ruedas dobles + 1 eje rueda simple) ( $EE_{TR1}$ )	$EES1 = \left[ \frac{P}{20.7} \right]^{3.9}$ Ecuación 25
Eje Trídem (3 ejes ruedas dobles) ( $EE_{TR2}$ )	$EES1 = \left[ \frac{P}{21.8} \right]^{3.9}$ Ecuación 26
P= Peso real por eje en toneladas	

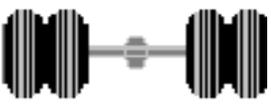
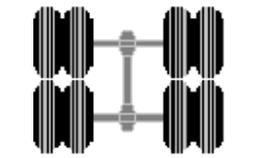
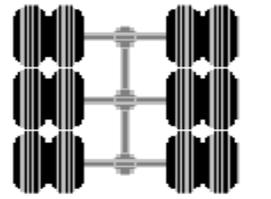
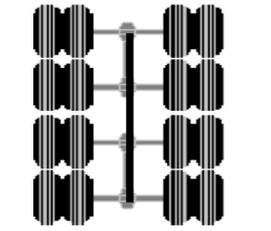
*Fuente: MTC peru*

Estas expresiones son similares a las consideradas en el año de 2008 dentro del Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito publicado por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones MTC de Perú.

#### **4.9.3 Recomendación de AUSTROADS (2017)**

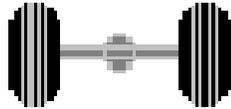
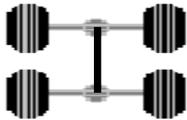
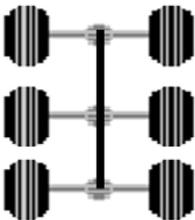
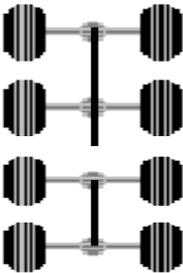
Según una nueva publicación del manual australiano para diseño de pavimentos del año 2017, se presenta un ajuste en las cargas de referencia para la obtención de los factores de equivalencia según este procedimiento, permitiendo un ajuste significativo en la determinación del factor de equivalencia de carga de los ejes trídems al disminuir la carga de referencia con respecto a la que tradicionalmente se venía utilizando en el país y además este método incluye a los ejes cuádruples, ejes que ya se están considerando en las nuevas configuraciones de los camiones de carga en algunos países suramericanos. El método australiano presenta además expresiones para evaluar el efecto de los ejes simples, tándem y trídems con rueda simple en cada semieje (Austroads, 2017).

Tabla 7. Expresiones para la estimación de los factores de equivalencia de carga utilizando el criterio de la ley de la cuarta potencia en ejes de semieje de rueda doble según AUSTROADS 2017

Sistema de eje	Esquema del eje	Fórmulas para el cálculo del factor de equivalencia
Simple de rueda doble		$FEC = \left( \frac{\text{Carga por eje kN}}{80 \text{ kN}} \right)^4$ Ecuación 27
Tándem de rueda doble		$FEC = \left( \frac{\text{Carga por eje kN}}{135 \text{ kN}} \right)^4$ Ecuación 28
Trídem de rueda doble		$FEC = \left( \frac{\text{Carga por eje kN}}{182 \text{ kN}} \right)^4$ Ecuación 29
Cuádruple de rueda doble.		$FEC = \left( \frac{\text{Carga por eje kN}}{226 \text{ kN}} \right)^4$ Ecuación 30

Fuente: Guide to Pavement Technology Part 2 . Austroads (2017)

Tabla 8. Expresiones para la estimación de los factores de equivalencia de carga utilizando el criterio de la ley de la cuarta potencia en ejes de semieje de rueda simple según AUSTROADS 2017

Sistema de eje	Esquema del eje	Fórmulas para el cálculo del factor de equivalencia
Simple de rueda simple		$FEC = \left( \frac{\text{Carga por eje kN}}{58 \text{ kN}} \right)^4 \text{ Ecuación 31}$
Tandem de rueda simple		$FEC = \left( \frac{\text{Carga por eje kN}}{98 \text{ kN}} \right)^4 \text{ Ecuación 32}$
Tridem de rueda simple		$FEC = \left( \frac{\text{Carga por eje kN}}{132 \text{ kN}} \right)^4 \text{ Ecuación 33}$
Cuádruple de rueda simple		$FEC = \left( \frac{\text{Carga por eje kN}}{164 \text{ kN}} \right)^4 \text{ Ecuación 34}$

Fuente: Guide to Pavement Technology Part 2. Austroads (2017)

#### 4.9.4 Recomendación de TRANSPORT RESEARCH LABORATORY (2022)

El Transport Research Laboratory (TRL) de gran Bretaña, en su documento Road Note 31. A guide to the structural design of surfaced roads in tropical and sub-tropical regions del año 2022, consigna para los diferentes tipos de ejes , unos valores iguales como cargas de referencia a los considerados por AUSTRROADS, para poder determinar los factores de equivalencia de carga por eje utilizando el método de la cuarta potencia en estructuras de pavimentos flexibles. Tabla 9

*Tabla 9.. Standard Axles for Different Axle Load Groups- Segun TRL*

TYRE TIPE	AXLE GROUP	STANDARD AXLE LOAD (kN)
Dual Tyre Axles	Single Axle with Dual Tyres (SADT)	80
	Tandem Axle with Dual Tyres (TADT)	135
	Triaxle with Dual Tyres (TRDT)	182
	Quad Axle with Dual Tyres (QADT)	226
Super – single (Wide Base) Tyre Axles	Single Axle with Single Tyres (SAST)	58
	Tandem Axle with Single Tyres (TAST)	98
	Triaxle with Single Tyres (TRST)	132
	Quad Axle with Single Tyres (QAST)	164

*Fuente: Transport Research Laboratory (TRL) (2022)*

#### 4.9.5 Recomendación de LABOTATOIRE CENTARL DE POINTS ET CHAUSSES (LCPC).

Este método de diseño de pavimentos francés para evaluar el efecto de las cargas por eje considera el concepto de la agresividad (A) de la carga de una determinada configuración de un eje (P), con respecto a la agresividad originada por un eje de referencia (Po) con unas características muy particulares considerando una carga por eje simple de rueda doble de 130 kN con presión de inflado de 662 kPa. (

Para determinar la agresividad (A) de una carga por eje (P), El Laboratorio Central de puentes y Caminos de Francia (LCPC), plantea la siguiente expresion:

$$A = K * \left( \frac{P *}{P0} \right)^{\alpha *}$$

Ecuación  
35

#### 4.10 Cuantificación utilizando el método mecanicista

Un nuevo procedimiento actualmente muy utilizado para poder determinar los factores de equivalencia de carga por eje, que permite suplir y complementar algunas limitaciones de los resultados del estudio de cargas por eje realizado en el ensayo vial AASHO y que además permite evaluar la acción de cualquier tipo de eje como los ejes multilíneas con configuraciones superiores a los ejes tándem y tridem, contempla el análisis del efecto de las cargas por eje utilizando el método mecanicista, que permite simulando sobre modelos elásticos multicapas determinar la acción de las diferentes configuraciones de cargas por eje (carga X kN) y del eje de referencia (carga 80 kN), calculando las respuestas de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en los puntos críticos de la estructura de pavimento, información que posteriormente sirve de base para analizar estas respuestas elásticas según unos modelos de falla, fatiga o de comportamiento, para determinar el número de repeticiones permitidas hasta alcanzar la falla, bajo la acción del eje analizado (carga X kN) y de la carga de referencia (80 kN), permitiendo así determinar el factor de equivalencia de carga utilizando la siguiente expresión general (Huang 2004):

$$FEC = \frac{\text{Número de repeticiones del eje de 80 kN que producen el deterioro del pavimento}}{\text{Número de repeticiones del eje de X kN que producen el deterioro del pavimento}}$$

Ecuación  
36

El método mecánico.- empírico tiene como ventajas que permite simular sobre diferentes estructuras de pavimentos construidas con diferentes tipos de materiales el efecto de cualquier configuración de eje considerando variaciones en el sistema de semieje, número de líneas de carga, espaciamientos longitudinales y transversales entre ruedas, presiones de contactos, magnitudes de cargas por rueda y además permiten establecer con diferentes modelos de falla de los materiales la equivalencia estructural de las cargas con respecto a un eje de referencia en cualquier nivel de la estructura y bajo diferentes criterios como esfuerzos, deformaciones y desplazamientos.

#### **4.11 Estudios Nacionales sobre factores de equivalencia de carga y factor daño vehicular.**

1.Universidad del Cauca. Instituto de Posgrado en Vías e Ingeniería Civil. 1987. Estudio del factor daño que producen los vehículos comerciales sobre el pavimento

Estudio que fue realizado por solicitud del Secretario Técnico del Ministerio de Obras Públicas y Transporte para conocer de manera general la variación de las cargas correspondientes a los vehículos comerciales y su relación con el comportamiento estructural del pavimento.

2.Estudio de los factores daño de los vehículos que circulan por las carreteras colombianas.1998. Alfonso Murgueítio Valencia, Carlos Alberto Benavides Bastidas, Efraín de Jesús Solano. XI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de pavimentos. Santafé de Bogotá Escuela Colombiana de Ingeniería. Santafé de Bogotá 1998.

Estudio que fue realizado para obtener los factores daño de los vehículos comerciales con base en los resultados de pesajes de 150000 vehículos, utilizando la información de pesajes realizados por el Instituto Nacional de Vías en diferentes sitios de la red vial nacional.

3. Universidad del Cauca. Instituto Nacional de Vías. 2004 Estudio sobre volúmenes de tránsito, pesaje y seguridad vial en carreteras por las cuales se movilizan vehículos que transportan caña de azúcar y bagazo de caña de azúcar, en jurisdicción de las regionales Valle del Cauca, Cauca y Risaralda del INVIAS.

En el año de 2003 el Instituto Nacional de Vías y la Universidad del Cauca, establecieron el convenio interadministrativo No. 315 de ese año, para evaluar el efecto de los vehículos cañeros, sobre las vías de los Departamentos del Cauca, Valle del Cauca y Risaralda, considerándose dentro de este estudio el efecto de las cargas de los vehículos cañeros en el deterioro de las estructuras de pavimento cuando transitan por la red vial de estas tres regionales del INVIAS.

4. Universidad del Cauca. ASOCAÑA 2011. Contrato de prestación de servicios inmateriales, suscrito entre la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia - ASOCAÑA y la UNIVERSIDAD DEL CAUCA

5. Universidad del Cauca. ASOCAÑA. 2017. Estudio sobre tránsito, seguridad vial y factor daño de la estructura de pavimentos en carreteras por las cuales se movilizan vehículos que transportan caña de azúcar y bagazo de caña de azúcar, en la red vial de los departamentos del Valle del Cauca. Cauca y Risaralda”

Dentro de estos estudios generales, se planteó un estudio particular para determinar el efecto destructivo de los trenes de vehículos cañeros que transitan por las vías de los departamentos del Valle del Cauca, Cauca y Risaralda, estableciéndose las características de los diferentes vehículos de transporte de caña, las características de los modelos estructurales de pavimento, la determinación de los factores de equivalencia de carga por eje y los factores daño por vehículo cañero y finalmente se establecen las conclusiones finales de la acción de estos vehículos cañeros.

6. Universidad del Cauca. ASOCAÑA. 2013. Estudio sobre tránsito, evaluación de pontones y factor daño de la estructura de pavimentos, en carreteras por las cuales se movilizan vehículos que transportan caña de azúcar en la red vial del departamento del Meta

En este estudio se contempló la evaluación del efecto de los vehículos cañeros sobre las estructuras de pavimentos sobre las vías del área de influencia de la explotación de la caña de azúcar en el departamento del Meta.

7. El Ingeniero Bernardo Caicedo Hormaza, en el año de 2007 presenta un trabajo titulado “Análisis del efecto sobre los pavimentos flexibles de trenes de carga de diferente tipología”, estudio realizado para la empresa BAVARIA, con el fin de solicitar al Instituto Nacional de Vías la autorización de circulación por algunos corredores de la red vial nacional de un tren de cargas compuesto por un tractocamión de 3 ejes, un semirremolque y un remolque, teniendo como base

referencia el efecto de estos trenes sobre estructuras flexibles y su respectiva comparación con los vehículos tradicionales de carga C3S3 y C3S2. En este estudio merece destacar que su análisis se realizó utilizando líneas de influencia de deformaciones de tracción en la capa asfáltica y de compresión en la subrasante originadas por los respectivos vehículos haciendo uso del programa ALIZE WIN del Laboratoire Central de Points et Chaussées de Francia.

#### **4.12 Estudios Internacionales sobre factores de equivalencia de carga y factor daño vehicular.**

A nivel internacional se han realizado muchos estudios para evaluar el efecto de las cargas por eje, utilizando diferentes metodologías y sensibilizando diferentes aspectos relacionados con las cargas por eje, configuraciones de los vehículos, modelos estructurales y acciones estáticas y dinámicas, pero teniendo el alcance de este trabajo de grado se citan como referencias internacionales los siguientes documentos. que proporcionan información importante utilizada en este proyecto.,

En el año de 2016, el ingeniero Carlos Javier Vásquez Montero, desarrolla un trabajo de tesis de Maestría en la Universidad Nacional de la Plata (Argentina), titulado “ Factores de equivalencia de daño en pavimentos flexibles Análisis para condiciones típicas de Argentina”, es un trabajo de investigación que pretende determinar factores daño de vehículos sobre estructuras de pavimento flexible utilizando como base teorías mecanicistas utilizando el software KENPAVE para el análisis estructural de pavimentos de la red vial de Argentina, considerando modelos estructurales, características de subrasante, y condiciones climáticas de este país.. Este trabajo se destaca porque presenta una revisión bibliográfica muy completa, un marco teórico bien estructurado y un excelente desarrollo técnico de su trabajo de investigación, que le permitió finalmente establecer las respectivas conclusiones de la determinación de los factores daño de la metodología racional y realizar la comparación de los resultados obtenidos con metodologías extranjeras y las recomendaciones de la metodología AASHTO.

En el año de 1992 se realizó el trabajo “ Effects Of Heavy Vehicle Characteristics On Pavement Response And Performance , realizado por el NCHRP (Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras) en colaboración con la Universidad de Cambridge, patrocinado por AASHTO en cooperación con la Federal Highway Administration de Estados Unidos. En este

estudio se realizó una evaluación de las cargas por eje sobre estructuras de pavimentos flexibles y rígidos, considerando diferentes aspectos relacionados con las cargas por eje como: tipo de eje, magnitudes de las cargas por eje, configuración de los ejes con sus espaciamientos longitudinales y transversales de las ruedas, presiones de contacto; Igualmente contempla el análisis de las condiciones de tipos de suelos de subrasante, materiales y espesores de las estructuras de pavimentos y se analizan los efectos climáticos, realizando los análisis basados en conceptos mecanicistas considerando las respuestas de esfuerzos y deformaciones con líneas de influencia y modelos de comportamiento de los pavimentos que permiten en los pavimentos flexibles controlar el agrietamiento de las capas asfálticas y el ahuellamiento de la subrasante , resultados que posteriormente los compara con resultados de estudios realizados con otras metodologías

# 5 CONCEPTOS GENERALES DEL ANALISIS ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

## 5.1 Introducción

Las metodologías modernas de diseño de pavimentos flexibles están enfocadas hacia la utilización de métodos mecánicos empíricos que parten de la determinación detallada de las variables de diseño como la variable tránsito, variable clima, resistencia de la subrasante y la caracterización dinámica de materiales, y sirven de base para establecer modelos estructurales que posteriormente son evaluados bajo la acción de las cargas por eje de los diferentes vehículos, para determinar las magnitudes de las respuestas estructurales de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en diferentes niveles de la estructura, que sirven como referencia para compararlos con valores admisibles de solicitaciones determinadas según modelos de falla o de comportamiento, que permiten establecer el dimensionamiento adecuado de la estructura de pavimento.

Entre los métodos mecanicistas para el diseño de pavimentos flexibles se citan los siguientes: SHELL (Shell International Petroleum Company Limited, 1978), Instituto Norteamericano del Asfalto (Asphalt Institute, 1991), Laboratoire Central des Points et Chaussées 1992, Federal Highway Administration de Estados Unidos (Department of Transportation Federal Highway Administration., 2007), Universidad de Nottingham (Grenfell, Airey y Thom, 2009), National Cooperative Highway Research Program de Estados Unidos (NCHRP, 2004), etc.

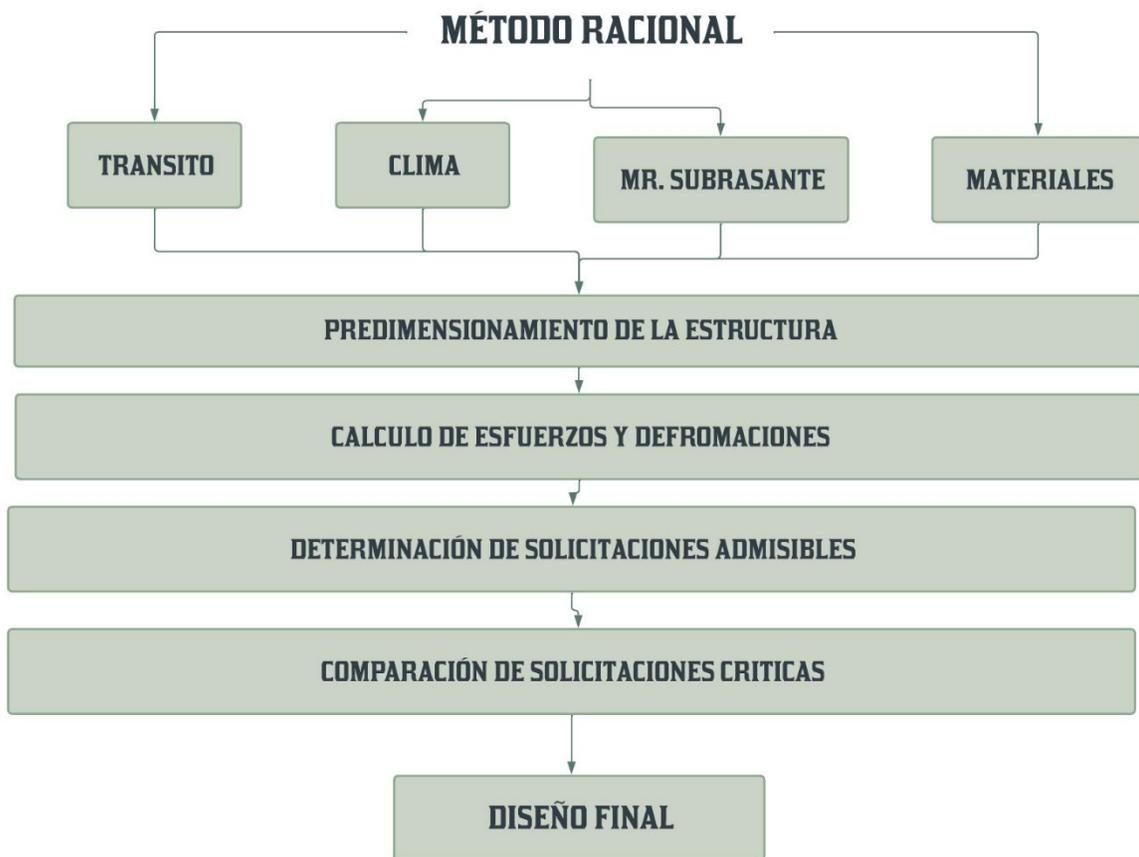
La metodología mecánico empírica de diseño de pavimentos flexibles contempla en forma general las siguientes etapas:

- Cuantificación de la variable tránsito
- Determinación de variable clima
- Caracterización dinámica de materiales
- Determinación de un modelo estructural
- Cálculo de solicitaciones de esfuerzos, deformaciones y deflexiones bajo la acción de las cargas

- Determinación de esfuerzos y deformaciones admisibles según modelos de comportamiento o modelos de falla
- Comparación de solicitaciones críticas
- Determinación de la estructura diseñada

En la Figura. 4 se presenta un esquema general del procedimiento de diseño mecánico empírico.

Figura. 4. Esquema del proceso de diseño según método racional



Fuente: Elaboración propia

## **5.2 Requerimientos de la cuantificación de la variable tránsito para el análisis estructural de pavimentos**

Teniendo en cuenta que la principal función de los proyectos de pavimentación de las carreteras, es permitir la circulación de los vehículos con rapidez, seguridad y economía, se plantea que además de las diferentes variables que inciden en el diseño y comportamiento de un pavimento, la ejecución de un estudio de la variable tránsito se considera relevante, debido a que permite establecer la acción de las diferentes magnitudes de carga que solicitarán a la estructura de pavimento en un determinado periodo de tiempo y se constituye en una información de interés para garantizar un adecuado diseño y comportamiento de las estructuras de pavimento.

Para la cuantificación de la variable tránsito según las diferentes metodologías de diseño de estructuras de pavimento se contemplan básicamente los siguientes aspectos:

- Información de tránsito promedio diario
- Información de clasificación de vehículos
- Información de pesajes de vehículos comerciales
- Información de configuración de ejes y de vehículos
- Información de factores de equivalencia de carga para cada tipo de eje y de cada vehículo
- Información de distribución del tránsito por sentido
- Información de distribución del tránsito por carril
- Información de tendencias y modelos de crecimiento del tránsito

Con esta información normalmente se realizan los análisis de proyección del tránsito en el periodo de diseño seleccionado, con el fin de cuantificar esta variable en términos de tránsito equivalente de una carga de referencia (normalmente 8.2 toneladas o 80 kN) y de repeticiones de carga por eje utilizando los espectros de carga según los requerimientos de las nuevas tendencias de diseño de pavimentos.

### **5.2.1 Tránsito promedio diario**

El tránsito promedio diario corresponde al valor promedio de los flujos de vehículos diarios evaluados en un periodo de tiempo determinado que puede ser una semana o un año, obteniéndose valores de tránsito promedio diario semanal (TPDS) o valores de tránsito promedio diario anual (TPDA), como resultados de conteos de vehículos utilizando mediciones manuales o mediciones continuas automáticas. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, División de Estudio y Fomento Habitacional, 2016).

### **5.2.2 Clasificación de los vehículos**

Normalmente, los vehículos se clasifican en tres categorías: autos, buses y camiones y para fines de la cuantificación de la variable tránsito en el diseño de pavimentos se requiere establecer la composición porcentual de las tres categorías generales de vehículos y conocer además en cada categoría la respectiva distribución porcentual de los diferentes tipos de buses y camiones.

### **5.2.3 Pesaje de vehículos**

Con el fin de conocer y controlar las magnitudes de las cargas por eje con las cuales circulan realmente los vehículos pesados, se realizan en diferentes vías importantes del país, en su mayoría concesionadas, pesajes de camiones utilizando básculas fijas localizadas próximas a estaciones de peaje. También se realizan en algunos sectores de la red vial nacional algunos pesajes utilizando balanzas portátiles

La información de los pesajes de vehículos es de gran utilidad para establecer los espectros de carga por eje en forma general o para cada tipo de vehículo, información utilizada tanto para la determinación del tránsito equivalente como también para cuantificar el tránsito en repeticiones de carga por eje, como se exige en las metodologías modernas de diseño de pavimentos

Un espectro de carga representa la distribución de frecuencias de las cargas en los diferentes rangos de carga, para cada tipo de eje (simple, tándem, tridem) y cada tipo de vehículo (Garnica ,

2004), información que se obtiene del procesamiento de un pesaje de vehículos y que, al combinarse con los estudios de proyección general del tránsito, se utiliza para calcular el número de repeticiones esperadas de cada carga representativa en cada tipo de eje, en el carril de diseño, durante el periodo de diseño

#### **5.2.4 Factor de equivalencia de carga**

Es un valor numérico que representa el daño relativo producido al pavimento por una configuración de carga por eje específica con respecto al daño producido por un eje estándar de 80kN.

#### **5.2.5 Factor daño por vehículo**

Es un parámetro que representa el mayor o menor daño que un vehículo comercial causa a un pavimento respecto al eje normalizado de 80 kN (8.2 t), representando el número de veces que pasa el eje normalizado de 80 kN (8.2 t), por cada paso del tipo de vehículo considerado.

#### **5.2.6 Factor de distribución por sentido**

El factor de distribución por sentido ( $F_d$ ), es un factor que permite determinar la distribución porcentual de los vehículos pesados en cada sentido de circulación, factor que se puede obtener directamente por información de un conteo de tránsito realizado en la vía o por información de estudios existentes en la zona.

#### **5.2.7 Factor de distribución por carril**

El factor de distribución por carril ( $F_c$ ), corresponde a la distribución de camiones entre los carriles con el mismo sentido. Para la determinación de este parámetro se tienen en cuenta el número de carriles en cada sentido, y el porcentaje de vehículos en cada sentido que circulan por el carril más solicitado por los vehículos pesados. Según la guía del National Cooperative Highway

Research Program (NCHRP, 2004) dependiendo del número de carriles en cada sentido se recomiendan los siguientes valores de factor de distribución por carril (Tabla 10)

*Tabla 10. Factor de distribución por carril según NCHRP (NCHRP, 2004)*

<b>Número total de carriles en cada dirección</b>	<b>Factor de distribución para el carril de diseño (<i>F<sub>c</sub></i>)</b>
1	1.00
2	0.90
3	0.60
4 o más	0.45

*Fuente: Transportation Research Board of the National Academies.*

### **5.2.8 Proyección general del tránsito**

Para realizar la proyección del tránsito, ya sea evaluada en términos de vehículos o de ejes equivalentes, según las recomendaciones del Manual de INVIAS del año 1998 (Instituto Nacional de Vías, 1998), se consideran dos opciones dependiendo de la calidad y cantidad de información de tránsito disponible para realizar dicha proyección. Las opciones consideradas en dicho manual corresponden a las siguientes condiciones.

### **5.2.9 Proyección general del tránsito en el periodo de diseño utilizando series históricas de tránsito.**

Este primer nivel se recomienda cuando en un proyecto vial se dispone de la información de una serie histórica de tránsito, recolectada a través de varios años, metodología que es viable aplicarse en la mayoría de las vías importantes del país donde el Instituto Nacional de Vías ha realizado periódicamente y en forma ininterrumpida unos conteos de tránsito en los diferentes sectores de la red vial nacional. Esta información es básica para establecer modelos de regresión que permiten predecir los niveles de tránsito en un determinado periodo de diseño con un determinado nivel de confiabilidad.

### **5.2.10 Proyección general del tránsito en el periodo de diseño sin información de series históricas de tránsito**

En el caso cuando no se posea una serie histórica de tránsito o no se dispone de suficientes datos históricos, para determinar el tránsito de diseño, el Manual de INVIAS del año 1998 (Instituto Nacional de Vías, 1998) plantea la realización de unos conteos de tránsito durante varios días de una semana y utilizar esta información como referencia para proyectarla hacía un periodo de diseño determinado, considerando modelos de crecimiento y estableciendo una tasa de crecimiento anual del tránsito.

En la estimación del tránsito para estas condiciones, según referencias, normalmente se consideran modelos de crecimiento anual del tipo exponencial y del tipo lineal, los cuales utilizan las siguientes expresiones:

#### **5.2.10.1 Modelo de crecimiento exponencial**

En el modelo exponencial se utiliza la siguiente expresión (Huang, Y. H., 2004).

$$N = (N_0) * \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

Ecuación

37

### 5.2.10.2 Modelo de crecimiento lineal

Para estimar el tránsito futuro según el modelo de crecimiento lineal se utiliza la siguiente expresión (Sobel M. A. et al , 2006).

$$N = \frac{n}{2} * [2 * N_0 + (n - 1) * d]$$

Ecuación  
38

## 5.3 Consideraciones de las condiciones climáticas para el dimensionamiento de pavimentos flexibles.

Para el proceso de análisis estructural y dimensionamiento de un pavimento es importante considerar la determinación de las condiciones de humedad, plasticidad y densidad de la subrasante para poder establecer la capacidad portante y la estabilidad volumétrica de los suelos de la capa subrasante, igualmente es importante conocer las condiciones de temperatura ambiente para estimar las temperaturas de las mezclas asfálticas en condiciones de servicio, y determinar el comportamiento de las mezclas asfálticas evaluadas según su módulo dinámico.

Actualmente la nueva metodología MEPDG (NCHRP, 2004), considera en forma muy detallada la acción de la variable clima, estableciendo procedimientos para determinar la variación de la resistencia de la subrasante y la determinación del comportamiento de los ligantes asfálticos y de las mezclas asfálticas afectados por las variaciones climáticas según la información de estaciones meteorológicas localizadas en las zonas de un proyecto.

Como referencia el nuevo método para evaluar la variable clima contempla los siguientes parámetros de entrada: (Department of Transportation Federal Highway Administration,2007; AASHTO, 2008).

Para contemplar el efecto de la temperatura considera los siguientes aspectos:

- Tiempo de salida y puesta del sol
- Radiación solar.
- Temperatura del aire.
- Porcentaje de luz solar.
- Velocidad del viento.
- Longitud y latitud.

Para considerar las condiciones de humedad tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Humedad relativa.
- Precipitación.
- Profundidad del nivel freático.

#### **5.4 Parámetros de la caracterización dinámica de materiales viales requeridos para el dimensionamiento de un pavimento flexible**

La caracterización dinámica de los materiales viales básicamente implica la determinación de los siguientes tres parámetros:

- Módulos dinámicos y módulos resilientes.
- Relación de Poisson.
- Leyes de fatiga o modelos de comportamiento de los materiales
- 

##### **5.4.1 Módulos de mezclas asfálticas**

En la caracterización dinámica de las mezclas asfálticas, con fines de dimensionamiento, análisis y evaluación estructural de los pavimentos flexibles, se considera la determinación de módulos resilientes y los módulos dinámicos, con el fin de conocer la relación que vincula las tensiones aplicadas y las deformaciones resultantes, para cada condición particular de temperatura y frecuencia de aplicación de cargas. (Benavides C.A, Chavarro E. 1992.)

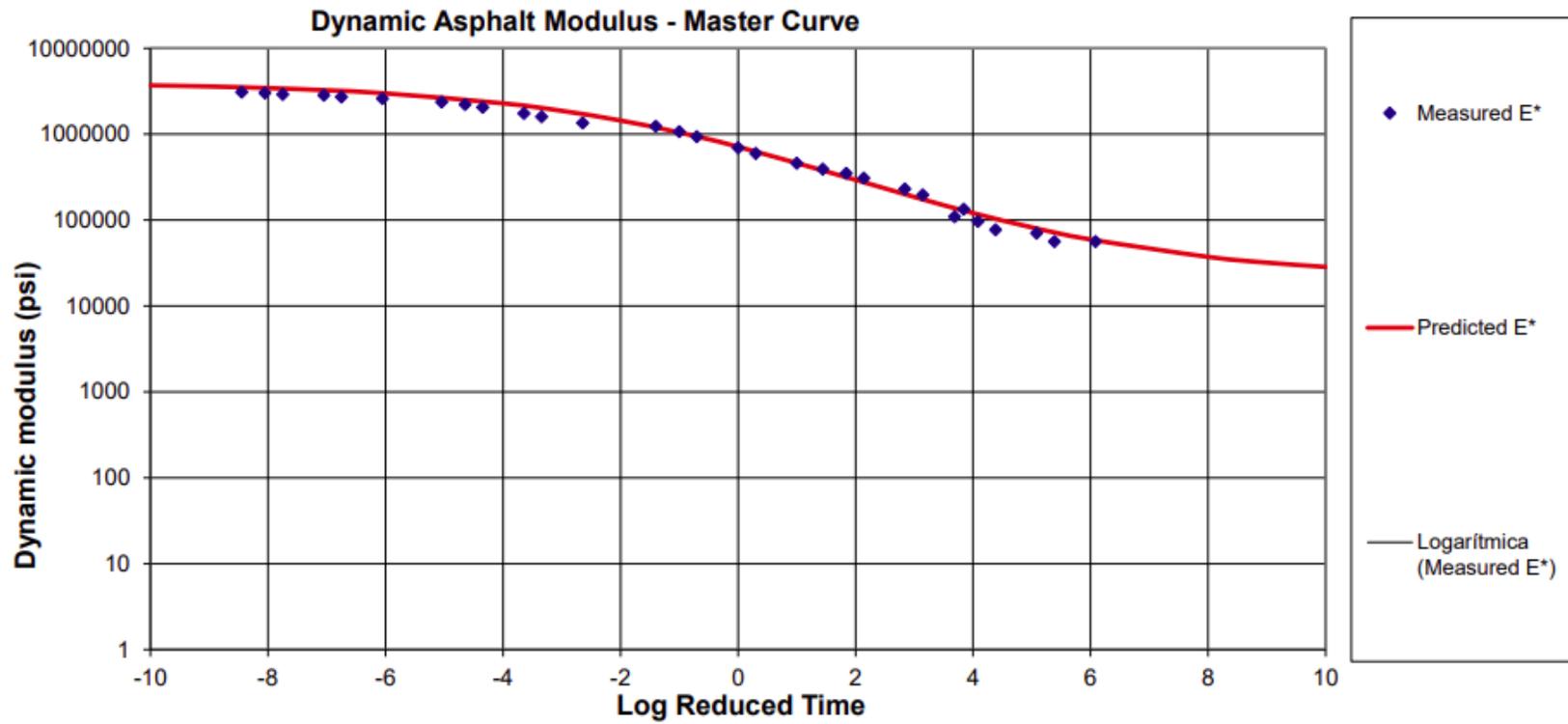
Los parámetros de modulo resiliente y modulo dinámico en un primer nivel se pueden obtener mediante ensayos de laboratorio según los protocolos establecidos en la norma INVIAS INV E – 749 – 22, utilizando el ensayo de tracción indirecta por compresión diametral sobre probetas cilíndricas tipo Marshall para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas (Ministerio de Transporte. Instituto Nacional de Vías, 2022) y para determinar en el laboratorio el módulo

dinámico se sigue el protocolo de la norma AASHTO T 342 (AASHTO, 2022) y NCHRP 1-28 (National Cooperative Highway Research Program, 2013). sometiendo a unas probetas cilíndricas a un ensayo de compresión en una máquina dinámica (NCHRP, 2004). En los dos ensayos las probetas se someten a unas cargas cíclicas bajo unas condiciones especificadas de temperatura y frecuencias de aplicación de cargas, información que sirve de referencia para poder establecer unos modelos reológicos llamados “curvas maestras” que permiten determinar valores de módulos para unas condiciones particulares de un proyecto.

La “**curva maestra**” corresponde a una gráfica que representa la variación del log del módulo dinámico versus la variación del logaritmo de tiempo de aplicación de las cargas o logaritmo de la frecuencia de aplicación de las cargas, para una temperatura de referencia dada, grafica que permite determinar valores de módulos en frecuencias o tiempos de carga que no se pueden obtener experimentalmente (NCHRP, 2004). En la Figura. 5 se muestra una curva maestra para una mezcla asfáltica densa en caliente de tamaño máximo del agregado de 19 mm (MDC 19) a una frecuencia de 10 Hz y una temperatura de 70 °F.

Figura. 5. Curva maestra Mezcla MDC 19 (Humberto Quintero O Y CIA SCA)

FRECUENCIA (Hz)	TEMPERATURA (°F)	VALOR DEL MODULO PREDICHO (psi)
10	70	1047102



Fuente: Humberto Quintero O Y CIA SCA

En un segundo nivel los módulos se pueden estimar en el caso de que no sea factible la realización de ensayos dinámicos, para lo cual se utilizan resultados de investigaciones realizadas a nivel internacional, las cuales permiten estimar los valores de módulos en función de las características de los componentes de la mezcla (ligante y agregados), del diseño volumétrico de la mezcla asfáltica, temperatura de la mezcla y frecuencia de aplicación de las cargas. En este nivel se citan como referencia las metodologías propuestas por Witczak (Witczak et al, 1999), la metodología del Instituto norteamericano del asfalto (Asphalt Institute ,1991) y la metodología SHELL (Shell International Petroleum Company Limited, 1978).

#### **5.4.2 Módulo resiliente de los materiales de las capas granulares**

La caracterización dinámica de los suelos granulares de base y subbase se realiza mediante la determinación de los parámetros de módulo resiliente y la relación de poisson.

El parámetro módulo resiliente permite determinar la respuesta de los materiales granulares bajo la acción de las cargas dinámicas, considerando la magnitud de los esfuerzos y deformaciones originados por la acción de las cargas del tránsito sobre la estructura de pavimento. Este parámetro según las recomendaciones de la metodología MEPDG (NCHRP, 2004), se puede determinar bajo tres niveles: un primer nivel a nivel de laboratorio utilizando ensayos triaxiales dinámicos según los protocolos del ensayo INVIAS INV E – 156– 20 (INVIAS, 2022), un segundo nivel estimarlos con base en correlaciones con ensayos de resistencia y un tercer nivel se pueden estimar con base en la clasificación de los suelos.

Como resultado del ensayo de laboratorio donde a una probeta cilíndrica se la somete a una ensayo triaxial dinámico aplicando cargas cíclicas para diferentes combinaciones de esfuerzos desviadores y esfuerzos horizontales, se obtiene un modelo de regresión múltiple contemplado en la nueva metodología de diseño MEPDG (NCHRP, 2004) y NCHRP 1-28A (National Cooperative Highway Research Program, 2013) , que permite establecer la variación del módulo resiliente, en función de la sumatoria de esfuerzos (invariante de tensiones  $\Theta$ ) y el esfuerzo octaedral ( $\sigma_{oct}$ ), modelo que se representa por la siguiente ecuación:

$$Mr = K1 * Pa \left( \frac{\theta}{Pa} \right)^{K2} \left( \frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{K3} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad \text{Ecuación 40}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad \text{Ecuación 41}$$

Para estimar el módulo resiliente, por medio de correlaciones con las propiedades de resistencia del material medidas en campo o laboratorio, una expresión muy utilizada es la propuesta por Transport Research Laboratory (TRRL) del reino unido (Powell, W. D., et al, 1984), expresión válida para los suelos con valores de CBR entre 12 y 80%,

$$Mr = 22.1 * (CBR)^{0.55} \quad \text{Ecuación 42}$$

#### 5.4.2.1 Expresiones recomendadas por Izzat, Lettier y Taylor.

Unas expresiones muy utilizadas para estimar los valores de los módulos resilientes de los materiales de subbase ( $Mr_{sb}$ ) y base granular ( $Mr_b$ ), son las recomendadas por Izzat, Lettier y Taylor, (Izzat, J.O., et al, 1967).

$$Mr_{sb} = Mr_{ste} * (1 + 7.18 * \text{Log}(H_{sb}) - 1.56 * \text{Log}(Mr_{ste}) * \text{Log}(H_{sb})) \quad \text{Ecuación 43}$$

$$Mr_b = Mr_{sb} * (1 + 10.52 * \text{Log}(H_b) - 2.10 * \text{Log}(Mr_{sb}) * \text{Log}(H_b)) \quad \text{Ecuación 44}$$

### 5.4.3 módulo resiliente de suelos finos

La caracterización dinámica de los suelos finos de subrasante también se realiza mediante la determinación de los parámetros de módulo resiliente y la relación de poisson. El módulo resiliente del suelo fino se determina en los diferentes niveles que establece la metodología MEPDG (NCHRP, 2004), en el primer nivel mediante un ensayo triaxial dinámico siguiendo el protocolo de ensayo y el respectivo análisis de resultados del ensayo establecido en las normas INVIAS INV E – 156– 20 (INVIAS, 2022), un segundo nivel estimado con base en correlaciones con ensayos de resistencia y un tercer nivel obtenido con base en la clasificación de los suelos.

Para estimar el módulo resiliente del suelo fino en MPa, por medio de correlaciones con las propiedades de resistencia medida según el ensayo CBR, se plantea la siguiente expresión propuesta por POWELL (Powell, W. D., et al, 1984), y recomendada por la metodología MEPDG (NCHRP, 2004), para los suelos finos con valores de CBR entre 2 y 12%.

$$Mr = 17.6 * (CBR)^{0.64}$$

Ecuación 45

### 5.4.4 Relaciones de poisson de los materiales viales

El parámetro relación de Poisson, que representa la relación entre la deformación transversal y la deformación axial bajo la acción de una carga de compresión o tracción, y que en los materiales viales varía en un rango entre 0.15 a 0.50, es un parámetro que la mayoría de las metodologías de diseño de pavimentos recomiendan que se asuman para realizar los análisis estructurales teniendo en cuenta su baja incidencia en el cálculo de esfuerzos y deformaciones. En la Tabla 11 se presentan valores típicos de la relación de Poisson para los diferentes materiales viales (NCHRP, 2004); (Meza Soto, M. J. ,2008).

Tabla 11. Valores recomendados de relaciones de Poisson

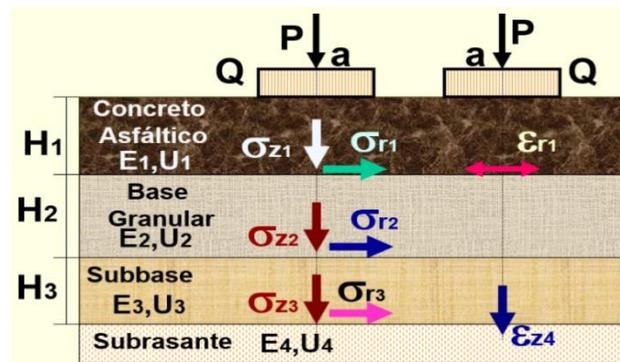
Material	Relación de Poisson
Concreto asfáltico	0.35
Base Granular	0.40
Subbase Granular	0.45
Subrasante fina	0.50

Fuente: Elaboración propia

## 5.5 Modelo estructural de predimensionamiento de un pavimento flexible

Los procesos de diseño requieren establecer un modelo estructural obtenido de un proceso de predimensionamiento que contemple para las diferentes capas de la estructura y la subrasante los resultados de la caracterización dinámica con los respectivos valores de módulos y relaciones de Poisson, los espesores de las capas superiores de la subrasante, y las características de las cargas por eje correspondientes a sus magnitudes de carga por llanta, presión de contacto, radio de carga y su respectiva configuración longitudinal y transversal. En la Figura. 6 se presenta un modelo estructural de un pavimento flexible bajo la acción del semieje equivalente de 80 kN.

Figura. 6. modelo estructural de pavimento bajo la acción del semieje equivalente de 80 kN



Fuente: Elaboración propia

Esta etapa de predimensionamiento se realiza normalmente utilizando los criterios y parámetros del método AASHTO-93, considerando los parámetros correspondientes a las características de resistencia de la subrasante, características de las capas estructurales, cuantificación del tránsito equivalente, condiciones climáticas y niveles de confiabilidad y serviciabilidad considerados de acuerdo a la importancia del proyecto de pavimentación.

En este proceso se utiliza el siguiente algoritmo de diseño para vincular los diferentes parámetros considerados por este método. (AASHTO, 1993).

$$\text{Log}(N) = Z_r \cdot S_o + 9.36 \text{Log}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \text{Log}(MR) - 8.07 \quad \text{Ecuación 46}$$

## 5.6 Cálculo de esfuerzos y deformaciones

El proceso de cálculo de esfuerzo y deformaciones en diferentes niveles de una estructura de pavimentos se realiza utilizando programas de computador elásticos multicapa o modelos más sofisticados utilizando elementos finitos.

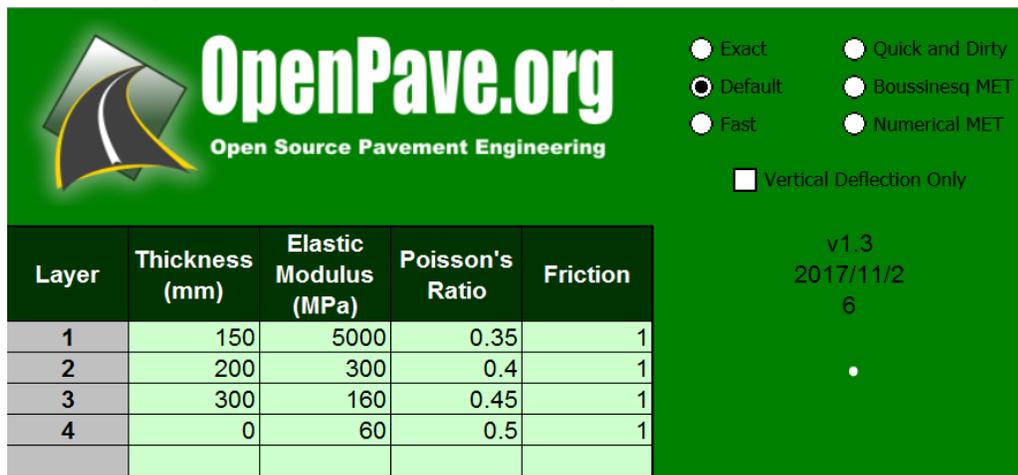
Entre los programas elásticos multicapas más utilizados, desarrollados en diferentes países se citan los siguientes: ALIZE III, BISAR , WESLEA , KENPAVE, OPENPAVE , WINJULEA .

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizó el programa OPENPAVE, software de código abierto desarrollado por Jeremy Lea de la Universidad California, Davis, el que permite evaluar los siguientes aspectos:

### 5.6.1 Parámetros de entrada de Software OPENPAVE

- Información de la estructura y de la subrasante correspondiente a espesores de capas, características mecánicas de los materiales y condiciones de adherencia entre capas. Figura. 7.

Figura. 7. Parámetros estructurales de entrada Software OPEN PAVE



The screenshot shows the OpenPave.org software interface. At the top left is the logo for OpenPave.org, which includes a stylized road graphic and the text "OpenPave.org" and "Open Source Pavement Engineering". To the right of the logo are several radio button options: "Exact", "Default", "Fast", "Quick and Dirty", "Boussinesq MET", and "Numerical MET". Below these options is a checkbox labeled "Vertical Deflection Only". In the center of the interface is a table with the following data:

Layer	Thickness (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction
1	150	5000	0.35	1
2	200	300	0.4	1
3	300	160	0.45	1
4	0	60	0.5	1

At the bottom right of the interface, the version number "v1.3" and the date "2017/11/26" are displayed.

Fuente: Elaboración propia en el Software Open Pave

- Tipo y configuración de cualquier tipo de eje que solicite a una estructura de pavimento, permitiendo introducir la información correspondiente a las coordenadas longitudinales y transversales de las diferentes ruedas que actúan superficialmente sobre la estructura de pavimento.
- Características de las cargas por rueda relacionadas con la magnitud de carga por rueda, presión de contacto y radio del área de contacto circular. Figura. 8

Figura. 8. Características de las cargas por rueda Software OPEN PAVE

Location	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)
1	0	0	20	560	106.6218
2	320	0	20	560	106.6218

Fuente: Elaboración propia en el Software Open Pave

- Información de los sitios de análisis dentro de la estructura y subrasante para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos (coordenadas tridimensionales de cada punto de análisis) Figura. 9.

Figura. 9. Información de los sitios de análisis dentro de la estructura y subrasante

Point	1	2	3	4	
X (mm)	0	160	0	160	
Y (mm)	0	0	0	0	
Z(mm)	150	150	650	650	
Layer	2	2	4	4	

Fuente: Elaboración propia en el Software Open Pave

- Parámetros de salida del Software OPENPAVE

Con estos datos de entrada el software calcula en los sitios seleccionados diferentes parámetros entre los cuales se seleccionan las magnitudes de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en diferentes direcciones, parámetros de interés para la evaluación y análisis estructural. (Figura. 10).

Los parámetros de interés desde el punto de vista estructural calculados por el software OPENPAVE corresponden a los valores de las deformaciones unitarias de tracción en las fibras inferiores de las capas asfálticas para analizar las fisuras por fatiga tipo

piel de cocodrilo, las deformaciones y esfuerzos de compresión vertical en las capas granulares y en la subrasante para analizar los ahuellamientos por capas y general de la estructura y los valores de desplazamiento vertical de la superficie del pavimento o valores de deflexión para analizar la respuesta elástica de las estructuras bajo la acción de las cargas.

Figura. 10. Parámetros de interés para la evaluación y análisis estructural.

Point	1	2	3	4
X (mm)	0	160	0	160
Y (mm)	0	0	0	0
Z(mm)	150	150	650	650
Layer	2	2	4	4
$\delta_x$ (mm)	-0.010097	0	-0.015758	0
$\delta_y$ (mm)	0	0	0	0
$\delta_z$ (mm)	0.369819	0.37903	0.271875	0.276952
$\sigma_{xx}$ (kPa)	-9.139608	-19.10637	-2.029632	-1.84223
$\sigma_{yy}$ (kPa)	-0.319293	-0.077211	-1.45607	-1.480415
$\sigma_{zz}$ (kPa)	-86.60989	-76.30952	-13.70891	-14.3863
$\tau_{xy}$ (kPa)	0	0	0	0
$\tau_{xz}$ (kPa)	14.67022	0	1.699229	0
$\tau_{yz}$ (kPa)	0	0	0	0
$\epsilon_{xx}$ ( $\mu\epsilon$ )	85.44022	38.16106	92.5476	101.5188
$\epsilon_{yy}$ ( $\mu\epsilon$ )	126.6017	126.9638	106.8866	110.5641
$\epsilon_{zz}$ ( $\mu\epsilon$ )	-276.0878	-228.787	-199.4342	-212.0829
$\gamma_{xy}$ ( $\mu\epsilon$ )	0	0	0	0
$\gamma_{xz}$ ( $\mu\epsilon$ )	136.9221	0	84.96144	0
$\gamma_{yz}$ ( $\mu\epsilon$ )	0	0	0	0
$\sigma_1$ (kPa)	-89.29487	-76.30952	-13.9511	-14.3863
$\sigma_2$ (kPa)	-6.454627	-19.10637	-1.787432	-1.84223
$\sigma_3$ (kPa)	-0.319293	-0.077211	-1.45607	-1.480415
$\tau_1$ (kPa)	3.067667	9.514582	0.165681	0.180908
$\tau_2$ (kPa)	41.42012	28.60157	6.081837	6.272033
$\tau_3$ (kPa)	44.48779	38.11616	6.247518	6.45294
$\epsilon_1$ ( $\mu\epsilon$ )	-288.6177	-228.787	-205.4892	-212.0829
$\epsilon_2$ ( $\mu\epsilon$ )	97.97013	38.16106	98.60259	101.5188
$\epsilon_3$ ( $\mu\epsilon$ )	126.6017	126.9638	106.8866	110.5641
$\gamma_1$ ( $\mu\epsilon$ )	28.63156	88.80277	8.284057	9.045378
$\gamma_2$ ( $\mu\epsilon$ )	386.5878	266.948	304.0918	313.6016
$\gamma_3$ ( $\mu\epsilon$ )	415.2194	355.7508	312.3759	322.647

Fuente: Elaboración propia en el Software Open Pavé

## 5.7 Determinación de esfuerzos y deformaciones admisibles según modelos de comportamiento o modelos de falla

Considerando que para evaluar el comportamiento de los pavimentos flexibles se consideran criterios de falla de fisuramiento por fatiga de las capas asfáltica y deformaciones permanentes en la estructura, es importante controlar estos deterioros por medio de la limitación de los valores de deformaciones y esfuerzos admisibles de acuerdo a la intensidad del tránsito previsto en el periodo de diseño.

Estos controles se obtienen utilizando modelos de falla o modelos de comportamiento o leyes de fatiga de los materiales viales que relacionan las magnitudes de las sollicitaciones (esfuerzos, deformación) para diferentes niveles de tránsito, obtenidos de estudios realizados en laboratorio, en pistas de ensayo y a nivel de campo en tramos de prueba, estudios que normalmente se adelantan en centros de alto nivel investigación.

En este trabajo para realizar los análisis estructurales se tendrán en cuenta los modelos de comportamiento recomendados por Instituto Norteamericano del Asfalto (Asphalt Institute ,1991), para el control del agrietamiento de las capas asfálticas y el ahuellamiento de la estructura.

### 5.7.1 Modelo de comportamiento para el control del agrietamiento del Instituto Norteamericano del Asfalto

La expresión recomendada por el Instituto Norteamericano del Asfalto para el control del agrietamiento de las capas asfálticas es la siguiente (Asphalt Institute ,1991) (NCHRP, 2004).

$$N_f = (0.00432 * K_1 * C) * \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^{K_2} * \left( \frac{1}{E_{CA}} \right)^{K_3} \quad \text{Ecuación 47}$$

$$C = 10^M \quad M = 4.84 \left( \frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.6875 \right) \quad \text{Ecuación 48}$$

### 5.7.2 Modelo de comportamiento para el control del agrietamiento por fatiga del método SHELL modificado por AUSTRROADS 2017.

El modelo de control del agrietamiento por fatiga de las capas asfálticas recomendado por el método SHELL y modificado según las recomendaciones del método australiano (AUSTRROADS 2017) es el siguiente:

$$N_f = \frac{SF}{RF} \left[ \frac{6918(0.856 * Vb + 1.08)}{E_{CA}^{0.36} * \mu \xi_t} \right]^5 \quad \text{Ecuación 49}$$

Tabla 12. Factores de confiabilidad RF, por fatiga de la mezcla asfáltica

Confiabilidad del proyecto.					
50%	80%	85%	90%	95%	97.5%
1.0	2.4	3.0	3.9	6.0	9.0

Fuente: AUSTRROADS 2017

### 5.7.3 Modelo de ahuellamiento del método del Instituto del Asfalto

El modelo de ahuellamiento total, recomendado por el método del Instituto Norteamericano del Asfalto es el siguiente (Asphalt Institute ,1991) (NCHRP, 2004).

$$N_z = (1.365 * 10^{-9}) * (\varepsilon_z)^{-4.477} \quad \text{Ecuación 50}$$

#### 5.7.4 Modelo de ahuellamiento del método SHELL

Los modelos de ahuellamiento total, recomendados por el método SHELL para niveles de confianza mayores al 85% y 95%, se presentan en las siguientes expresiones (Shell International Petroleum Company Limited, 1978):

$$N_z = 1.94 \cdot 10^{-7} \cdot (\varepsilon_z)^{-4} \quad \text{Para un nivel de confianza de 85\%}$$
$$N_z = 1.05 \cdot 10^{-7} \cdot (\varepsilon_z)^{-4} \quad \text{Para un nivel de confianza de 95\%}$$

Ecuación 51

#### 5.8 Proceso de comparación de solicitaciones críticas en el proceso de análisis estructural de pavimentos flexibles.

Una vez realizado el proceso de cálculo de los valores de las solicitaciones críticas utilizando el software elástico e igualmente establecido las solicitaciones admisibles obtenidas de los modelos de comportamiento, se realiza la comparación de estas solicitaciones o se establecen los porcentajes de consumo para cada criterio de análisis de fatiga de capas asfálticas y de ahuellamiento de la subrasante.

El porcentaje de consumo corresponde a la relación porcentual entre el número admisible de repeticiones de una determinada de carga esperada según el estudio de predicción del tránsito, relacionada con el número de repeticiones admisibles de una determinada carga obtenida de un modelo de comportamiento en función de la magnitud de solicitación originada por dicha carga.

$$\% \text{Consumo} = \frac{\text{Numero repeticiones de cargas esperadas}}{\text{Numero repeticiones de cargas admisibles}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 52}$$

## **6 DETERMINACIÓN DE MODELOS DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA EVALUAR EL EFECTO DE LAS CARGAS POR EJE**

Teniendo en cuenta que, en la red vial nacional pavimentada, varios proyectos de pavimentación se han construido utilizando las recomendaciones del “Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito” de INVIAS 1998 (Instituto Nacional de Vías, 1998), el cual fue soportado según los criterios del método AASHTO 1993 y verificado utilizando criterios del método mecanicista, se decidió en este estudio utilizar los criterios del método AASHTO de 1993. para realizar un análisis de sensibilización de las variables de tránsito expresada en el número de ejes equivalentes (N) y la resistencia de la subrasante cuantificada por el valor de módulo resiliente (Mr) para determinar el parámetro de Número Estructural (SN) requerido y con base en los resultados obtenidos de valores de número estructural establecer rangos de categorías de estas dos variables y posteriormente establecer una serie de estructuras, con la finalidad de que sirvan como referencia para la cuantificación de la acción de las cargas de los vehículos convencionales y extra dimensionados sobre las estructuras de pavimento, utilizando el método mecanicista que involucra la elástica de la deformada de la estructura de pavimento flexible bajo la aplicación de las cargas por eje de los diferentes vehículos considerados en este estudio.

### **6.1 DETERMINACIÓN DE LOS RANGOS DE TRANSITO Y RESISTENCIA DE LA SUB RASANTE**

#### **6.1.1 Niveles de tránsito analizados.**

Para la sensibilización de la variable tránsito se consideraron 24 valores de ejes equivalentes, agrupados en 3 categorías, teniendo en cuenta que esta variable en el proceso de análisis se cuantifica en forma logarítmica.

- Un primer grupo de menores niveles de tránsito equivalente con un rango comprendido entre 1,000,000 a 5,000,000 con incrementos de 500,000 equivalentes.
- Un segundo grupo de tránsitos equivalentes con un rango comprendido entre 5,000,000 a 15,000,000 con incrementos de 1,000,000 de ejes equivalentes
- Un tercer grupo de altos niveles de tránsito equivalente con un rango comprendido entre 15,000,000 a 40,000,000 con incrementos de 5,000,000 de ejes equivalentes.

### **6.1.2 Capacidad de soporte de Sub-Rasante**

Para la sensibilización de la capacidad de soporte de la subrasante, inicialmente se seleccionaron 19 valores de módulo resiliente, teniendo en cuenta las diferentes condiciones de resistencia que puede presentar una sub-rasante natural de suelos finos o granulares.

Para objeto de este estudio se consideró un valor mínimo de módulo resiliente de 3,000 PSI correspondiente a valores de resistencia CBR bajos del orden de 2% y como valor máximo se adoptó un módulo resiliente de 20,000 PSI correspondiente a una sub-rasante granular de muy buena capacidad con valores de resistencia CBR aproximados de 30%. La variación de los valores de resistencia de la subrasante se realizó con incrementos de 1000 PSI.

### 6.1.3 Condiciones de Serviciabilidad y Confiabilidad

Considerando los diferentes niveles de tránsito seleccionados, se establecieron unos valores para los parámetros de serviciabilidad inicial ( $P_o$ ) y final ( $P_f$ ) y de confiabilidad correspondientes a desviación normal ( $Z_r$ ) y error estándar global ( $S_o$ ) en cada grupo de tránsito, guardando correspondencia con las recomendaciones del método AASHTO (AASHTO, 1993). según la importancia de los proyectos de pavimentación. Los valores seleccionados de serviciabilidad y confiabilidad se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores seleccionados de serviciabilidad y confiabilidad según niveles de tránsito.

Nivel de tránsito millones de ejes equivalentes	Serviciabilidad		Confiabilidad		
	Inicial ( $P_o$ )	Final ( $P_f$ )	Nivel	Desviación normal ( $Z_r$ )	Error estándar ( $S_o$ )
1 a 5	4.2	2.5	85 %	-1.036	0.45
5 a 15	4.2	2.5	90 %	-1.282	0.45
15 a 40	4.2	3.0	95 %	-1.645	0.45

Fuente: Elaboración propia

### 6.1.4 Determinación de valores de números estructurales requeridos utilizando el método AASHTO 1993.

Una vez establecidos los valores de capacidad de soporte de la subrasante, los diferentes niveles de tránsito, y los parámetros de las variables de serviciabilidad y confiabilidad, se realizó utilizando el algoritmo de diseño del método AASHTO 1993, la determinación del número estructural requerido (SN) para las diferentes combinaciones de los parámetros seleccionados en el análisis de sensibilidad. Los resultados obtenidos de esta sensibilización se presentan en la Tabla 14.

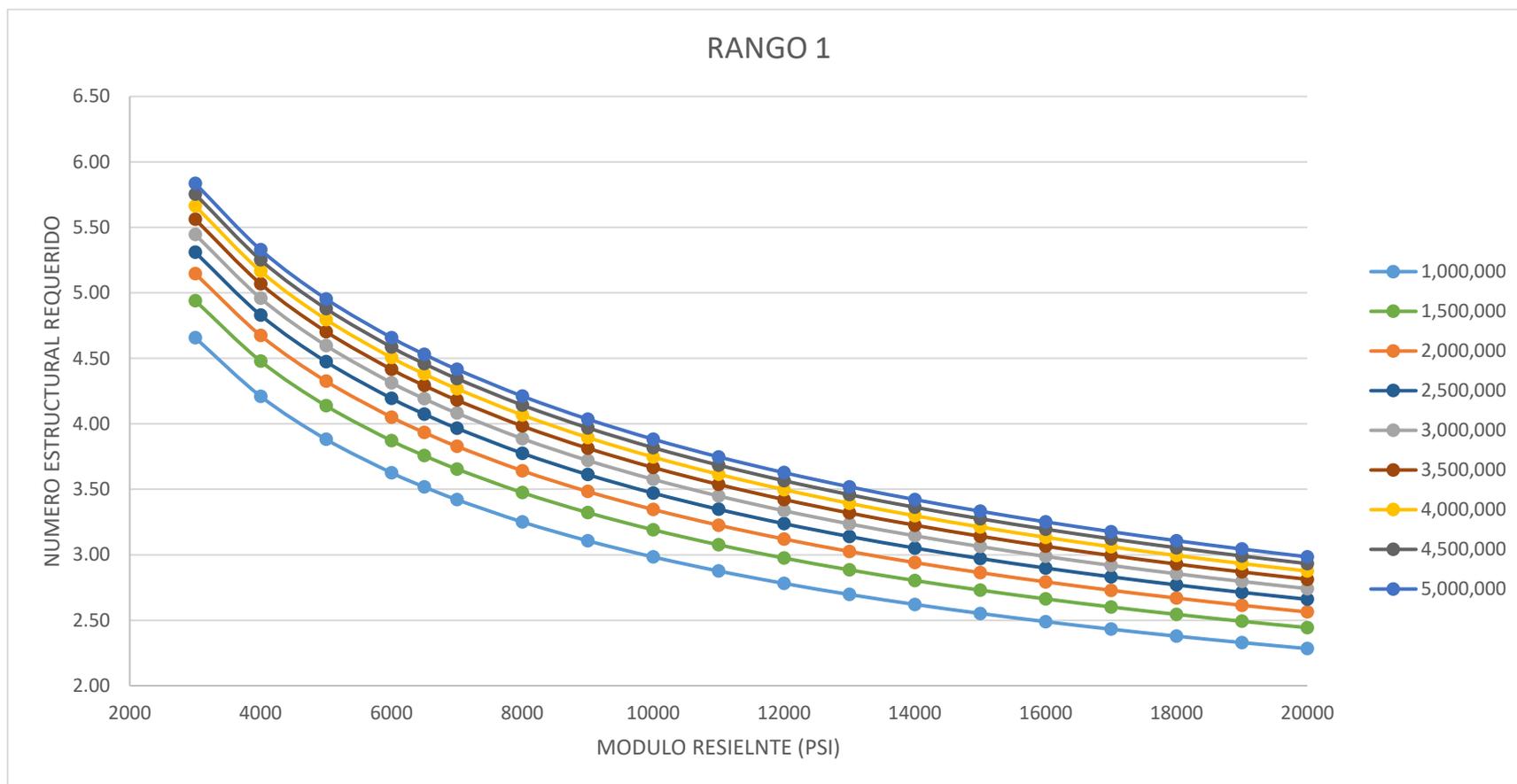
Tabla 14 Valores de Número estructural requerido

MODULO RESIELNTE (PSI)	3000	4000	5000	6000	6500	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	
<b>ESAL</b>																				
1,000,000	4.66	4.21	3.88	3.63	3.52	3.42	3.25	3.11	2.98	2.88	2.78	2.70	2.62	2.55	2.49	2.43	2.38	2.33	2.28	
1,500,000	4.94	4.48	4.14	3.87	3.76	3.65	3.47	3.32	3.19	3.08	2.97	2.88	2.80	2.73	2.66	2.60	2.54	2.49	2.44	
2,000,000	5.15	4.68	4.33	4.05	3.93	3.83	3.64	3.48	3.35	3.23	3.12	3.03	2.94	2.86	2.79	2.73	2.67	2.61	2.56	
2,500,000	5.31	4.83	4.47	4.19	4.08	3.97	3.78	3.61	3.47	3.35	3.24	3.14	3.05	2.97	2.90	2.83	2.77	2.71	2.66	
3,000,000	5.45	4.96	4.60	4.31	4.19	4.08	3.89	3.72	3.58	3.45	3.34	3.24	3.15	3.06	2.99	2.92	2.86	2.80	2.74	
3,500,000	5.56	5.07	4.70	4.42	4.29	4.18	3.98	3.81	3.67	3.54	3.42	3.32	3.23	3.14	3.07	2.99	2.93	2.87	2.81	
4,000,000	5.66	5.17	4.80	4.51	4.38	4.27	4.07	3.90	3.75	3.61	3.50	3.39	3.30	3.21	3.13	3.06	2.99	2.93	2.88	
4,500,000	5.75	5.25	4.88	4.59	4.46	4.35	4.14	3.97	3.82	3.68	3.57	3.46	3.36	3.28	3.20	3.12	3.05	2.99	2.93	
5,000,000	5.84	5.33	4.95	4.66	4.53	4.42	4.21	4.04	3.88	3.75	3.63	3.52	3.42	3.33	3.25	3.18	3.11	3.04	2.98	
5,000,000	6.04	5.52	5.14	4.83	4.71	4.59	4.38	4.20	4.04	3.90	3.78	3.67	3.57	3.47	3.39	3.31	3.24	3.17	3.11	
6,000,000	6.18	5.66	5.27	4.96	4.83	4.71	4.50	4.32	4.16	4.02	3.89	3.78	3.67	3.58	3.49	3.41	3.34	3.27	3.21	
7,000,000	6.31	5.78	5.38	5.07	4.94	4.82	4.61	4.42	4.26	4.12	3.99	3.87	3.77	3.67	3.58	3.50	3.43	3.36	3.29	
8,000,000	6.42	5.88	5.48	5.17	5.04	4.91	4.70	4.51	4.35	4.20	4.07	3.95	3.85	3.75	3.66	3.58	3.50	3.43	3.36	
9,000,000	6.52	5.97	5.57	5.26	5.12	5.00	4.78	4.59	4.43	4.28	4.15	4.03	3.92	3.82	3.73	3.65	3.57	3.50	3.43	
10,000,000	6.61	6.06	5.65	5.33	5.20	5.07	4.85	4.66	4.50	4.35	4.22	4.10	3.99	3.89	3.79	3.71	3.63	3.56	3.49	
11,000,000	6.69	6.13	5.73	5.41	5.27	5.14	4.92	4.73	4.56	4.41	4.28	4.16	4.05	3.95	3.85	3.77	3.69	3.61	3.54	
12,000,000	6.76	6.20	5.79	5.47	5.33	5.21	4.98	4.79	4.62	4.47	4.34	4.21	4.10	4.00	3.91	3.82	3.74	3.66	3.59	
13,000,000	6.83	6.27	5.86	5.53	5.39	5.26	5.04	4.85	4.68	4.52	4.39	4.27	4.15	4.05	3.96	3.87	3.79	3.71	3.64	
14,000,000	6.90	6.33	5.91	5.59	5.45	5.32	5.09	4.90	4.73	4.57	4.44	4.31	4.20	4.10	4.00	3.92	3.83	3.76	3.69	
15,000,000	6.96	6.39	5.97	5.64	5.50	5.37	5.14	4.95	4.77	4.62	4.48	4.36	4.25	4.14	4.05	3.96	3.88	3.80	3.73	
15,000,000	8.10	7.45	6.97	6.59	6.43	6.29	6.02	5.80	5.60	5.42	5.26	5.11	4.98	4.85	4.74	4.63	4.53	4.43	4.34	
20,000,000	8.39	7.72	7.23	6.85	6.68	6.53	6.27	6.04	5.83	5.65	5.49	5.34	5.20	5.08	4.96	4.85	4.75	4.65	4.56	
25,000,000	8.62	7.94	7.44	7.05	6.88	6.73	6.46	6.22	6.02	5.84	5.67	5.52	5.38	5.25	5.14	5.03	4.92	4.82	4.73	
30,000,000	8.82	8.12	7.61	7.22	7.05	6.89	6.62	6.38	6.17	5.99	5.82	5.67	5.53	5.40	5.28	5.17	5.06	4.97	4.87	
35,000,000	8.98	8.28	7.76	7.36	7.19	7.03	6.75	6.51	6.30	6.11	5.95	5.79	5.65	5.52	5.40	5.29	5.19	5.09	4.99	
40,000,000	9.13	8.42	7.89	7.49	7.31	7.15	6.87	6.63	6.42	6.23	6.06	5.90	5.76	5.63	5.51	5.40	5.29	5.19	5.10	

Fuente: Elaboración propia

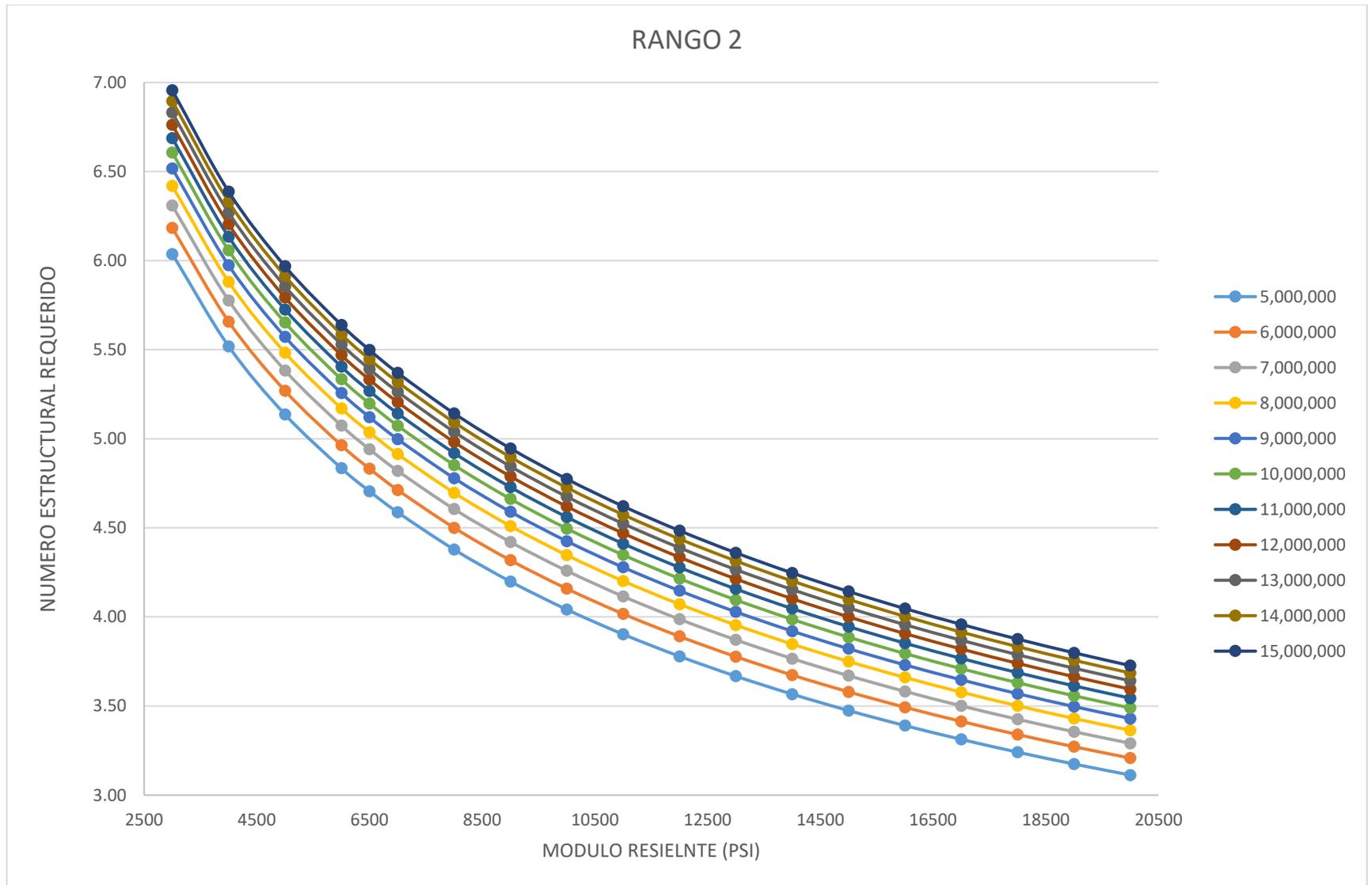
A continuación, en las siguientes Figura. 11, Figura. 12, Figura. 13, se presenta los gráficos de la tendencia de decrecimiento del número estructural requerido a medida que aumenta la resistencia de la sub-rasante para los diferentes niveles de tránsito considerados en cada nivel de tránsito .

Figura. 11 Valores de número estructural requerido para el primer rango de tránsito



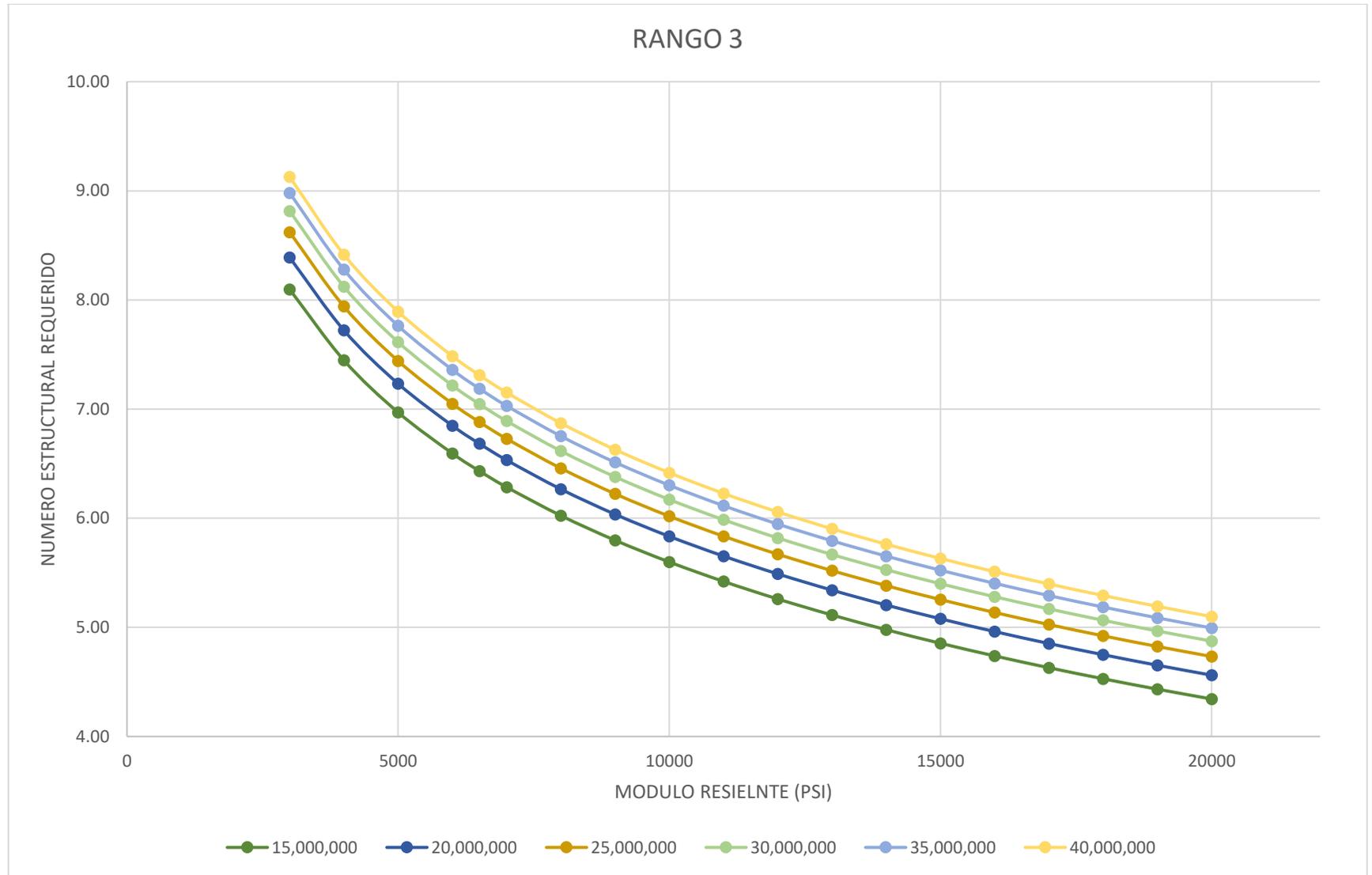
Fuente: Elaboración propia

Figura. 12 Valores de número estructural requerido para el segundo rango de transito



Fuente: Elaboración propia

Figura. 13 Valores de número estructural requerido para el tercer rango de tránsito



Fuente: Elaboración propia

### 6.1.5 Agrupamiento de Valores de Números Estructurales

Analizando los resultados de los valores calculados de número estructural requerido, determinados utilizando el algoritmo del método AASHTO para las diferentes combinaciones de las variables consideradas en la sensibilización (tránsito, capacidad portante de subrasante, serviciabilidad y confiabilidad), se agruparon categorías con valores de números estructurales similares con baja variabilidad, estableciendo en cada grupo el rango de variación y un valor promedio, con el fin de homogenizar los resultados obtenidos y que sirvan como referencia para establecer los modelos estructurales representativos que se utilizarán para evaluar el efecto de las cargas sobre las estructuras de pavimentos flexible. Información que se presenta sintetizada en la Tabla 15

Tabla 15. Valores agrupados por rangos del número estructural requerido.

MODULO RESILIENTE (PSI)		5000-6500			6500-8000			8000-10000			10000-12000			12000-15000			15,000 - 20,000		
		VALOR MAX	VALOR MIN	PROMEDIO	VALOR MAX	VALOR MIN	PROMEDIO	VALOR MAX	VALOR MIN	PROMEDIO	VALOR MAX	VALOR MIN	PROMEDIO	VALOR MAX	VALOR MIN	PROMEDIO	VALOR MAX	VALOR MIN	PROMEDIO
1,000,000	2,000,000	4.33	3.52	3.92	3.93	3.25	3.59	3.64	2.98	3.31	3.35	2.78	3.06	3.12	2.55	2.84	2.86	2.28	2.57
2,000,000	3,500,000	4.70	3.93	4.32	4.29	3.64	3.97	3.98	3.35	3.66	3.67	3.12	3.39	3.42	2.86	3.14	3.14	2.56	2.85
3,500,000	5,000,000	4.95	4.29	4.62	4.53	3.98	4.26	4.21	3.67	3.94	3.88	3.42	3.65	3.63	3.14	3.38	3.33	2.81	3.07
5,000,000	10,000,000	5.65	4.71	5.18	5.20	4.38	4.79	4.85	4.04	4.45	4.50	3.78	4.14	4.22	3.47	3.85	3.89	3.11	3.50
10,000,000	15,000,000	5.97	5.20	5.58	5.50	4.85	5.18	5.14	4.50	4.82	4.77	4.22	4.49	4.48	3.89	4.19	4.14	3.49	3.82
15,000,000	20,000,000	7.23	6.43	6.83	6.68	6.02	6.35	6.27	5.60	5.93	5.83	5.26	5.55	5.49	4.85	5.17	5.08	4.34	4.71
20,000,000	30,000,000	7.61	6.68	7.15	7.05	6.27	6.66	6.17	5.83	6.00	6.17	5.49	5.83	5.82	5.08	5.45	5.40	4.56	4.98
30,000,000	40,000,000	7.89	7.05	7.47	7.31	6.62	6.96	6.87	6.17	6.52	6.42	5.82	6.12	6.06	5.40	5.73	5.63	4.87	5.25

Fuente: Elaboración propia

Como resultado del agrupamiento de la información de tránsito y de capacidad de soporte de la subrasante en función del número estructural requerido, se establecen las siguientes categorías de cada variable analizada. En la Tabla 16, se presentan las categorías de tránsito seleccionadas y en Tabla 17 se presentan las categorías de resistencia de subrasante.

*Tabla 16. Categorías de tránsito seleccionadas*

Categorías de Tránsito	Rangos de tránsitos en ejes equivalentes
<b>T1</b>	$1000000 < N \leq 2000000$
<b>T2</b>	$2000000 < N \leq 3500000$
<b>T3</b>	$3500000 < N \leq 5000000$
<b>T4</b>	$5000000 < N \leq 10000000$
<b>T5</b>	$10000000 < N \leq 15000000$
<b>T6</b>	$15000000 < N \leq 20000000$
<b>T7</b>	$20000000 < N \leq 30000000$
<b>T8</b>	$30000000 < N \leq 40000000$

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 17. Categorías de resistencia de subrasante seleccionadas*

Categorías de Subrasante	Intervalo de módulo resiliente	
	PSI	MPa
<b>S1</b>	$5000 < Mr \leq 6500$	$34.5 < Mr \leq 45$
<b>S2</b>	$6500 < Mr \leq 8000$	$45 < Mr \leq 55$
<b>S3</b>	$8000 < Mr \leq 10000$	$55 < Mr \leq 70$
<b>S4</b>	$10000 < Mr \leq 12000$	$70 < Mr \leq 85$
<b>S5</b>	$12000 < Mr \leq 15000$	$85 < Mr \leq 100$
<b>S6</b>	$15000 < Mr \leq 20000$	$100 < Mr \leq 135$

*Fuente: Elaboración propia*

Para establecer las anteriores categorías de tránsito y de capacidad de soporte de la subrasante, se evaluó la incidencia de cada variable en los resultados del análisis estructural , pudiéndose establecer que para valores bajos de niveles de tránsito y de resistencia de la subrasante se obtiene una incidencia significativa en los valores de número estructural requeridos con pequeños incrementos de los valores de las dos variables y que a medida que los valores de las variables presentan mayores magnitudes, la incidencia de los incrementos es menor, permitiendo aumentar la amplitud de los respectivos rangos en cada categoría de cada variable analizada.

Para definir estos rangos se realizaron varios análisis del número estructural requerido mínimo y máximo, así como también el valor promedio para diferentes combinaciones, observando que los rangos establecidos tuviesen una magnitud de variabilidad mínima en su promedio, para este estudio se decidió considerar que en los rangos de igual nivel de tránsito pero diferente capacidad de soporte la diferencia en número estructural no fuese mayor a 1.30 y para diferentes niveles de tránsito e igual resistencia de la subrasante dicha diferencia en número estructural no supere un valor de 0.70.

#### **6.1.1 Rangos de las variables de diseño consultados según referencia de algunos estudios.**

Con el fin de comparar los resultados de los criterios considerados en este estudio para establecer las categorías representativas de niveles de tránsito y de capacidad de soporte de la subrasante, se presenta a continuación categorizaciones de las dos variables según 4 estudios tomados como referencia.

- **Rangos de variables según el manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito de 1998 de INVIAS.**

El manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito de 1998 de INVIAS (Instituto Nacional de Vías, 1998), considera con respecto a la variable tránsito las siguientes categorías en función de tránsito equivalente esperado en el carril de diseño durante el periodo de diseño Tabla 18.

Por otra parte, teniendo en cuenta los tipos de suelos y los valores de resistencia CBR de la subrasante, el manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito de 1998, considera para el catálogo de diseño estructural de pavimentos flexibles agrupar la información en 5 categorías las cuales se presentan en la Tabla 18.

*Tabla 18..Categorías de tránsito y resistencias asumidas por INVIAS (Instituto Nacional de Vías, 1998)*

CATEGORIAS DE TRANSITO			CATEGORIAS DE RESISTENCIA DE SUBRASANTE		
DESIGNACION	RANGO DE ESAL		CATEGORIA	INTERVALO DE % CBR	
T1	500,000	1,000,000	S1	3 %	5%
T2	1,000,000	2,000,000	S2	5%	7%
T3	2,000,000	4,000,000	S3	7%	10%
T4	4,000,000	6,000,000	S4	10 %	15%
T5	6,000,000	10,000,000	S5	≥ 15%	
T6	10,000,000	15,000,000			
T7	15,000,000	20,000,000			
T8	20,000,000	30,000,000			
T9	30,000,000	40,000,000			

*Fuente: Elaboración propia, ajustada de El manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito de 1998 de INVIAS (Instituto Nacional de Vías, 1998)*

- **Rangos de las variables de diseño según el Manual de Carreteras de la república de Perú.**

Por otra parte el Manual de Carreteras de la república de Perú (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014), en el documento “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” en su Sección: Suelos y Pavimentos en la Versión abril 2014 de Perú con respecto a la variable tránsito presenta una clasificación general en quince (15) rangos de numero de repeticiones de ejes

equivalentes en el carril y periodo de diseño para vías pavimentadas desde un tránsito bajo de 75,000 hasta un tránsito alto de 30'000,000 de ejes equivalentes. En la Tabla 19, extraída de dicho documento se presentan los rangos de tránsito expresado en ejes equivalentes.

*Tabla 19. Rangos de numero de repeticiones de ejes Equivalente en el carril y periodo de diseño para vías pavimentadas*

<b>Tipos Tráfico Pesado expresado en EE</b>	<b>Rangos de Tráfico Pesado</b>
TP 0	<75,000 EE <= 150,000 EE
TP 1	<150,000 EE <= 300,000 EE
TP 2	<300,000 EE <= 500,000 EE
TP 3	<500,000 EE <= 750,000 EE
TP 4	<750,000 EE <= 1'000,000 EE
TP 5	<1'000,000 EE <= 1'500,000 EE
TP 6	<1'500,000 EE <= 3'000,000 EE
TP 7	<3'000,000 EE <= 5'000,000 EE
TP 8	<5'000,000 EE <= 7'500,000 EE
TP 9	<7'500,000 EE <= 10'000,000 EE
TP 10	<10'000,000 EE <= 12'500,000 EE
TP 11	<12'500,000 EE <= 15'000,000 EE
TP 12	<15'000,000 EE <= 20'000,000 EE
TP 13	<20'000,000 EE <= 25'000,000 EE
TP 14	<25'000,000 EE <= 30'000,000 EE
TP 15	> 30'000,000 EE

*Fuente: Elaboración propia, ajustada de Manual de Carreteras de la república de Perú (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014).*

El manual de carreteras peruano en su Sección: Suelos y Pavimentos en la Versión abril 2014 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014), presenta la siguiente clasificación de las diferentes categorías de subrasante con las correspondientes variaciones de resistencia de la subrasante evaluada según el ensayo CBR. Tabla 20.

*Tabla 20. Rangos de resistencia de subrasante Manual de Carreteras de la república de Perú.*

<b>Categorías de Sub rasante</b>	<b>CBR</b>
So: Sub rasante inadecuada	CBR < 3%
S1: Sub rasante insuficiente	De CBR >= 3 % A CBR < 6%
S2: Sub rasante Regular	De CBR >= 6 % A CBR < 10%
S3: Sub rasante Buena	De CBR >= 10 % A CBR < 20%
S4: Sub rasante Muy Buena	De CBR >= 20 % A CBR < 30%
S5: Sub rasante Excelente	De CBR >= 30%

*Fuente: Elaboración propia, ajustada de Manual de Carreteras de la república de Perú (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014).*

➤ **Rangos de variables según Transport and Road Research Laboratory**

EL laboratorio de Investigaciones y Carreteras TRL de la Gran Bretaña en el documento “A guide to the Structural Designo of bitumen Surfaced Roads in Tropical and Sub-tropical Regions” (International Road Federation, 2004) presenta la clasificación del nivel de tránsito en 10 grupos considerando valores desde los 700,000 ESALS, hasta los 80,000,000 ejes equivalente y una clasificación de categorías de resistencia de subrasante en 5 grupos, los cuales comprende valores de CBR inferiores a 3 % para el primer grupo y mayores a 30% para el ultimo, en la siguiente Tabla 21, se presenta la calificación de los rangos de tránsito y resistencia utilizada por el TRL para el diseño de los pavimentos flexibles.

*Tabla 21.. Categorías de tránsito y Sub rasante asumidas por “A guide to the Structural Designo of bitumen Surfaced Roads in Tropical and Sub-tropical Regions”*

Traffic Classes (10 <sup>6</sup> ESAL)		CATEGORIAS DE RESISTENCIA DE SUBRASANTE		
DESIGNACION	RANGO DE ESAL	CATEGORIA	INTERVALO DE % CBR	
T1	For T1 and some categories of T2, use the LVR catalogue chart F	S1	< 3 %	
T2		S2	3%	4%
T3	0.7 – 1.5	S3	5%	7%
T4	1.5 – 3.0	S4	8 %	14%
T5	3.0 – 6.0	S5	15 %	30%
T6	6.0 - 10	S6	≥ 30%	
T7	10 - 17			
T8	17 - 30			
T9	30 - 50			
	50 – 80			

*Fuente: Elaboración propia, Adaptado de: A guide to the Structural Designo of bitumen Surfaced Roads in Tropical and Sub-tropical Regions (International Road Federation, 2004)*

- **Rangos de las variables de diseño la Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México.**

Finalmente, la secretaria de comunicaciones y transporte de México por medio de su catálogo de secciones estructurales de pavimentos para las carreteras de la república mexicana (Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012) presenta para considerar la variable tránsito 5 rangos en función del número de ejes equivalentes (ESALS), los cuales se presentan en la Tabla 22

*Tabla 22. Rangos de tránsito en función de ejes sencillos equivalentes ( $\Sigma$  EE)*

<b>Rangos de tránsito en función de ejes sencillos equivalentes (<math>\Sigma</math> EE)</b>				
<b><math>\Sigma</math> EE 1</b>	<b><math>\Sigma</math> EE 2</b>	<b><math>\Sigma</math> EE 3</b>	<b><math>\Sigma</math> EE 4</b>	<b><math>\Sigma</math> EE 5</b>
$\leq 10,000,000$	$> 10,000,000 -$ $\leq 20,000,000$	$> 20,000,000 -$ $\leq 40,000,000$	$> 40,000,000 -$ $\leq 80,000,000$	$> 80,000,000$

*Fuente: Elaboración propia, Adaptado del catálogo de secciones estructurales de pavimentos para las carreteras de la república mexicana (Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012)*

Finalmente evaluando los rangos de las variables de tránsito y de capacidad de la subrasante seleccionados en el análisis realizado con base en números estructurales requeridos y los rangos establecidos en estos cuatro estudios de referencia nacional e internacional, se puede establecer que hay una buena correspondencia y que proporcionan un soporte válido a los rangos establecidos de las dos variables para la continuación del estudio contemplado en este trabajo de grado.

### 6.1.2 Determinación del Número Estructural requerido para los valores representativos de las variables según los rangos establecidos en el estudio.

Una vez definidos los rangos de resistencia y niveles de tránsito, se consideraron unos valores representativos en cada rango para estas dos variables con el propósito de poder estimar por la metodología AASHTO 1993, el requerimiento estructural expresado con base en el número estructural (SN) requerido para cada combinación de las variables consideradas en este estudio y conservando las condiciones previamente establecidas para las variables de serviciabilidad y de confiabilidad.

### 6.2 Prediseño de las estructuras representativas utilizando el Método AASHTO 1993.

Una vez realizada la sensibilización de los valores representativos de cada rango y calculado el número estructural requerido para cada combinación de resistencia de la subrasante y niveles de tránsito, se realizó un predimensionamiento de las estructuras de pavimento flexible acatando el criterio del método AASHTO 1993 de protección de capas y considerando los siguientes parámetros generales del método con respecto a coeficientes estructurales de capas ( $a_i$ ) y coeficientes de drenaje ( $m_i$ ).Tabla 23

Tabla 23. Coeficiente estructural y de drenaje asumidos para el prediseño de las estructuras representativas

Capa	Coeficiente estructural ( $a_i$ )	Coeficiente de drenaje ( $m_i$ )
Concreto asfáltico	0.44	-
Base granular	0.14	1
Sub-Base granular	0.11	0.9

Fuente: Elaboración propia

Para la determinación de los espesores de las estructuras de pavimentos flexibles utilizando capas asfálticas como recubrimiento superficial y capas granulares de materiales de base y subbase como capas intermedias apoyadas sobre la subrasante, que en conjunto combinando los espesores y coeficientes de aporte estructural y de drenaje de cada material garanticen los números estructurales requeridos, se utilizó para su verificación la siguiente recomendación del método AASHO 1993 que permite determinar el número estructural proporcionado por un modelo estructural de pavimento flexible.

$$SN \text{ proporcionado} = a_1 h_1 + a_2 h_2 m_2 + a_3 h_3 m_3 \quad \text{Ecuación 53}$$

Para poder obtener valores consistentes entre los números estructurales requeridos y números estructurales proporcionados, luego de varias iteraciones de prediseño, se estableció una diferencia máxima entre los dos números estructurales de un valor de 0.27 por exceso y un valor de 0.18 por defecto, con el fin de garantizar los requerimientos de los niveles de tránsito, de resistencia de subrasante y de las variables de confiabilidad y serviciabilidad contempladas en esta metodología. Los resultados de este prediseño y las correspondientes verificaciones estructurales se presentan sintetizados en la Tabla 24.

Tabla 24. Prediseño de estructuras metodología AASHTO

TRANSITO		MR STE	5000.00	6500.00	8000.00	10000.00	12000.00	15000.00	20000.00
		CA	BG	SB	SN CALCULADO	SN REQUERIDO			
2,000,000	CA	13	12	11.0	10.0	10.0	9.0	9.0	
	BG	15	15	15	15	15	15	15	
	SB	30	30	30	25	20	15	15	
	SN CALCULADO	4.25	4.07	3.90	3.53	3.34	2.97	2.97	
	SN REQUERIDO	4.33	3.93	3.64	3.35	3.12	2.86	2.56	
3,500,000	CA	14	13.0	13.0	13.0	12.0	12.0	11.0	
	BG	20	20	20	15	15	15	15	
	SB	30	30	25	25	20	15	15	
	SN CALCULADO	4.70	4.52	4.33	4.05	3.69	3.49	3.32	
	SN REQUERIDO	4.70	4.29	3.98	3.67	3.42	3.14	2.81	
5,000,000	CA	15	14.0	14.0	13.0	13.0	13.0	13.0	
	BG	20	20	20	20	20	15	15	
	SB	30	30	30	20	20	15	15	
	SN CALCULADO	4.87	4.70	4.70	4.13	4.13	3.66	3.66	
	SN REQUERIDO	4.95	4.53	4.21	3.88	3.63	3.33	2.98	
10,000,000	CA	21	20.0	20.0	19.0	18.0	17.0	17.0	
	BG	20	20	20	20	20	15	15	
	SB	30	30	25	25	20	20	15	
	SN CALCULADO	5.91	5.74	5.54	5.37	5.00	4.55	4.36	
	SN REQUERIDO	5.65	5.20	4.85	4.50	4.22	3.89	3.49	
15,000,000	CA	22	21.0	21.0	21.0	20.0	19.0	18.0	
	BG	25	25	20	20	20	15	15	
	SB	30	30	30	20	20	15	15	
	SN CALCULADO	6.36	6.19	5.91	5.52	5.35	4.70	4.53	
	SN REQUERIDO	5.97	5.50	5.14	4.77	4.48	4.14	3.73	
20,000,000	CA	26	23.0	22.0	22.0	22.0	21.0	21.0	
	BG	30	25	25	20	20	20	15	
	SB	30	30	30	25	20	20	15	
	SN CALCULADO	7.33	6.53	6.36	5.89	5.69	5.52	5.05	
	SN REQUERIDO	7.23	6.68	6.27	5.83	5.49	5.08	4.56	
30,000,000	CA	28	25.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	
	BG	30	25	25	25	20	20	15	
	SB	30	30	30	25	20	20	15	
	SN CALCULADO	7.67	6.88	6.70	6.51	6.04	6.04	5.57	
	SN REQUERIDO	7.61	7.05	6.62	6.17	5.82	5.40	4.87	
40,000,000	CA	29	27.0	26.0	26.0	26.0	25.0	25.0	
	BG	30	25	25	25	20	20	15	
	SB	35	35	30	25	20	20	20	
	SN CALCULADO	8.04	7.42	7.05	6.86	6.39	6.21	5.94	
	SN REQUERIDO	7.89	7.31	6.87	6.42	6.06	5.63	5.10	

Fuente: Elaboración propia

### **6.3 Diseño de las estructuras de pavimento flexible utilizando el método mecánico-empírico**

Considerando que este estudio propone establecer los factores de equivalencia de carga por eje de diferentes vehículos pesados para condiciones de clima, tránsito y resistencia de subrasante típicas de Colombia, por medio de la metodología mecánica – empírica , utilizando modelos de deterioro recomendados por el Instituto del Asfalto (Asphalt institute, 1991) se realizó un diseño de las estructuras de pavimento flexible utilizando la metodología mecánica – empírica, partiendo de las estructuras anteriormente prediseñadas por la metodología AASHTO 1993, y complementando los análisis considerando la variable clima sensibilizando la incidencia de los cambios de temperatura de la capa asfáltica en la respuesta estructural de los pavimentos flexibles. El proceso de diseño desarrollado en esta etapa del estudio contempló los siguientes aspectos:

#### **6.3.1 Selección de temperaturas ambientales**

Con el fin de establecer rangos representativos de las variaciones de la temperatura ambiente a nivel nacional, se tomó como referencia registros climáticos de varias ciudades capitales de los diferentes departamentos de Colombia, que sirvan como base para realizar la sensibilización de la temperatura en las características dinámicas de las capas asfálticas., Los registros climáticos para las diferentes ciudades seleccionadas, se consultaron en la página web del IDEAM ( IDEAM., 2012)., recopilando la información relacionada con valores promedio de precipitación y valores de temperatura promedio, temperatura máxima y temperatura mínima, datos que se presentan sintetizados en la Tabla 25.

Tabla 25. Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos Colombia

CIUDAD	PROEDIO DE LLUVIA (mm)	TEMPERATURA PROMEDIO (°q)	TEMPERATURA MAXIMA TEMPERATURA PROMEDIO (°C)	TEMPERATURA MINIMA TEMPERATURA PROMEDIO (°C)
PASTO	796	12.8	16-17	9.5
TUNJA	645	12.9	25-26	17-18
BOGOTA	797	13.1	18-20	8-10
POPAYAN	2121	18.7	24-25	12-14
LEBRIJA (APTO PALONEGRO)	1184	20.9	25-26	17-18
PEREIRA	2301	21.2	26-27	16-17
MEDELLIN	1685	21.5	26-28	17-18
ARMENIA	2163	21.8	26	16-17
MOCOA	3832	22.9	26-28	19-20
IBAGUE	1691	23.2	28-30	19-20
PALMIRA	894	23.5	29-31	18-19
CALI	1483	23.9	30-31	19-20
CUCUTA	878	25.5	30-33	21-24
VILLAVICENCIO	4383	25.5	28-32	20-22
SAN JOSE DEL GUAVIARE	2628	25.7	30-33	22
LETICIA	3296	25.8	29-32	21-23
MITU	3256	26	29-32	21-22
FLORENCIA	3700	26.1	29-33	21-22
QUIBDO	7815	26.1	30-31	22-23
PUERTO INIRIDA	3208	26.6	30-33	23
ARA UCA	1804	26.8	28-35	20-23
SOLEDAD	822	26.9	31-32	23-25
YOPAL	2270	26.9	31-35	21-23
CARTAGENA	1008	27	31-33	24-25
NEIVA	1346	27	32-35	22-23
COROZAL	1099	27.1	31-35	21-23
SANTA MARTA	501	27.3	31-34	22-25

Fuente: Elaboración propia

Evaluando las condiciones climáticas de las diferentes regiones del país se agruparon los registros de temperatura en tres categorías y para cada una de ellas se estableció un valor representativo de temperatura que permitiera caracterizar cada grupo para posteriormente considerarlo en la estimación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica. La categorización de los valores de temperatura ambiente con su rango y su valor representativo se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26. Rangos de temperatura asumidos y valores representativos de temperatura ambiente

Categoría de Temperatura ambiente	Rango de temperatura °C	Valor representativo de temperatura ambiente °C
T ambiente 1	12.8 - 18.7	15
T ambiente 2	18.7 - 22.9	20
T ambiente 3	22.9 - 28.6	25

Fuente: Elaboración propia

### 6.3.2 Caracterización dinámica de las capas granulares

Para la caracterización dinámica de los materiales granulares, se utilizaron los criterios de los métodos AASHTO 1993 y MEPDG (NCHRP, 2004). para estimar las relaciones de Poisson y los módulos resilientes que pueden desarrollar estos materiales, dentro de los modelos estructurales considerados en este estudio.

Para determinar los módulos resilientes, que desarrollan los materiales granulares en las condiciones de servicio, se consideraron las siguientes expresiones planteadas por Izzat, Lettier, y Taylor (Izzat, J.O., et al, 1967) , que permiten estimar el módulo de los materiales granulares en función de los espesores de las capas y la resistencia de la capa de soporte.

$$Mr_{sb} = Mr_{ste} * (1 + 7.18 * \text{Log}(H_{sb}) - 1.56 * \text{Log}(Mr_{ste}) * \text{Log}(H_{sb})) \quad \text{Ecuación 54}$$

$$Mr_b = Mr_{sb} * (1 + 10.52 * \text{Log}(H_b) - 2.10 * \text{Log}(Mr_{sb}) * \text{Log}(H_b)) \quad \text{Ecuación 55}$$

Dentro de este estudio, en el proceso de diseño mecánico empírico se establecieron para los materiales granulares, límites de valores de módulo resiliente, bajo consideraciones de su estado tensional ya que estos materiales desarrollan su capacidad de respuesta estructural dependiendo de la magnitud de los esfuerzos bajo la cual están sometidos dentro de la estructura de pavimento, por esta razón para el material de sub-base se asumió un rango comprendido entre 75 MPa y 200 MPa y para el material de la capa de base granular se estableció un valor mínimo de 200 MPa y un valor máximo de 320 MPa.

Las relaciones de Poisson asumidas para estos materiales corresponden a un valor de 0.45 para subbase granular y un valor de 0.40 para el material de la capa granular.

### **6.3.3 Caracterización dinámica de las mezclas asfálticas de concreto asfáltico**

Teniendo en cuenta las recomendaciones de la metodología MEPDG (NCHRP, 2004) para determinar la caracterización dinámica de las mezclas asfálticas y considerando los avances tecnológicos del país en este proceso de caracterización de ligantes bituminosos y mezclas asfálticas, se planteó la necesidad de determinar los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas utilizando resultados de ensayos de laboratorio realizados con máquinas dinámicas que permitan sensibilizar la variación del módulo dinámico para diferentes condiciones de temperatura de la mezclas asfáltica y diferentes frecuencias de aplicación de las cargas tal como lo establece la norma NCHRP 1-28 de AASHTO (National Cooperative Highway Research Program, 2013).

Para poder disponer de información de resultados de pruebas dinámicas obtenidos en ensayos de laboratorio de módulo dinámico y leyes de fatiga, se solicitó la colaboración y participación de la empresa “Humberto Quintero O Y CIA SCA”, para adquirir resultados de laboratorio de pruebas dinámicas de mezclas densas en caliente con granulometrías de tamaños máximos del agregado de 19 mm (MDC-19) y de 25 mm (MDC-.25) combinadas con cemento asfáltico tipo AC 60-70, información valiosa que se utilizó como referencia para poder establecer las curvas maestras que representen la variación del módulo dinámico en función de la frecuencia de aplicación de las cargas para ciertas condiciones de temperatura de la mezcla y poder así caracterizar en el más alto

nivel jerárquico las mezclas asfálticas, utilizando como referencia el siguiente modelo sigmoideal recomendado por la metodología MEPDG (NCHRP, 2004)

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log tr)}} \quad \text{Ecuación 56}$$

La información de caracterización dinámica de las mezclas asfálticas MDC-19 utilizando ligante asfáltico tipo AC 60-70, proporcionada por la empresa “Humberto Quintero O Y CIA SCA”, se presenta sintetizada para las siguientes cuatro regiones principales del país: región Andina, región Caribe, región Oriental y región Sur Occidental, donde se desarrollan la mayoría de los proyectos de pavimentación y abarcan la mayoría de las ciudades capitales de los departamentos de Colombia. En la Tabla 27, se presentan las diferentes regiones y las ciudades correspondientes a cada zona

Tabla 27. Clasificación de ciudades por regiones

<b>Región</b>	<b>Ciudades de cada región</b>			
Región Andina	Tunja	Pereira	Ibague	Quibdo
	Bogota	Medellin	Cucuta	Neiva
	Lebrija	Armenia	Florencia	
Región Caribe	Soledad	Corozal	Riohacha	Valledupar
	Cartagena	Santa Marta	Monteria	Puerto Carreño
Región Oriente	Villavicencio	Leticia	Puerto Inirida	
	Guaviare	Mitu	Arauca	Yopal
Región Sur Occidente	Pasto	Mocoa	Cali	
	Popayan	Palmira		

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la caracterización dinámica de las mezclas asfálticas MDC 19 y MDC 25 proporcionados por la empresa “Humberto Quintero O Y CIA SCA”, para cada región se presentan sintetizadas en las siguientes tablas Tabla 28, Tabla 29, Tabla 30, Tabla 31, donde se presentan los resultados de módulo dinámico para temperaturas de 20°C y 40°C para frecuencia de 10Hz (AASHTO T 342) que representa una velocidad de los vehículos pesados del orden de 50 a 60 KPH y también se presentan los coeficientes de la curva maestra según el modelo sigmoideal (AASHTO R 62) y los resultados de los ensayos de resistencia a la fatiga a flexión en 4 puntos (AASHTO 321).

Tabla 28. Valores de mezclas asfálticas con productos Humberto Quintero en la zona andina

<b>VALORES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON PRODUCTOS HUMBERTO QUINTERO EN LA ZONA ANDINA</b>			
ENSAYO	DESCRIPCIÓN DEL PARAMETRO	Mezcla MDC-19 + Cemento Asfáltico Normalizado 60/70	
		Fuente de los materiales: Fusca - Cundinamarca	Fuente de los materiales: La Virginia - Risaralda
MÓDULO DINÁMICO (AASHTO T 342)	Módulo Dinámico (20°C, 10 Hz) (Mpa)	6,102	5,676
	Módulo Dinámico (40°C, 10 Hz) (Mpa)	1,996	2,040
CURVA MAESTRA DE MÓDULOS DINÁMICOS (AASHTO R 62)	Delta	3.2570	3.8457
	Alpha	3.2206	2.5193
	Beta	-1.2636	-1.1482
	Gamma	-0.3064	-0.3206
	C	1.7954	1.8791
	A	9.0580	9.0580
	VTS	-2.9834	-2.9834
RESISTENCIA A LA FATIGA A FLEXIÓN EN 4 PUNTOS (AASHTO T 321)	Ciclos de soporte con 200 µε de deformación (No. Ciclos)	374,178	722,743
	Deformación esperada para 1 millón de ciclos de soporte E <sub>s</sub> (µε)	158	185
	Pendiente de la ley de Fatiga A <sub>1</sub>	-0.2047	-0.2221
	Estimación de la ley de Fatiga A <sub>0</sub>	7.8931	8.2881

Fuente: Humberto Quintero O Y CIA SCA

Tabla 29. . Valores de mezclas asfálticas con productos Humberto Quintero en la Costa Caribe

<b>VALORES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON PRODUCTOS HUMBERTO QUINTERO EN LA COSTA CARIBE</b>					
ENSAYO	DESCRIPCIÓN DEL PARAMETRO	Mezcla MDC-25 + Cemento Asfáltico Normalizado 60/70		Mezcla MDC-19 + Cemento Asfáltico Normalizado 60/70	
		Fuente de los materiales: Matitas - La Guajira	Fuente de los materiales:	Fuente de los materiales: San Onofre - Sucre	Fuente de los materiales: El Copey - Cesar
MÓDULO DINÁMICO (AASHTO T 342)	Módulo Dinámico (20°C, 10 Hz) (Mpa)	5,149		5,626	4,774
	Módulo Dinámico (40°C, 10 Hz) (Mpa)	1,284		1,586	1,103
CURVA MAESTRA DE MÓDULOS DINÁMICOS (AASHTO R 62)	Delta	3.1723		4.5520	4.0097
	Alpha	3.3121		2.0274	2.4349
	Beta	-1.1392		-0.1754	-0.6477
	Gamma	0.2877		-0.4643	-0.3876
	C	2.1166		1.1917	1.4621
	A	9.0580		10.8012	10.8012
	VTS	-2.9834		-3.6076	-3.6076
RESISTENCIA A LA FATIGA A FLEXIÓN EN 4 PUNTOS (AASHTO T 321)	Ciclos de soporte con 200 µε de deformación (No. Ciclos)	138,800		220,241	310,821
	Deformación esperada para 1 millón de ciclos de soporte E <sub>s</sub> (µε)	129		147	156
	Pendiente de la ley de Fatiga A <sub>1</sub>	-0.2233		-0.2214	-0.2235
	Estimación de la ley de Fatiga A <sub>0</sub>	7.9423		8.0471	8.1363

Fuente: Humberto Quintero O Y CIA SCA

Tabla 30. Valores de mezclas asfálticas con productos Humberto Quintero en la Zona Oriental

<b>VALORES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON PRODUCTOS HUMBERTO QUINTERO EN LA ZONA ORIENTAL</b>			
ENSAYO	DESCRIPCIÓN DEL PARAMETRO	Mezcla MDC-19 + Cemento Asfáltico Normalizado 60/70	
		Fuente de los materiales: Yopal - Casanare	Fuente de los materiales: Castilla La Nueva - Meta
MÓDULO DINÁMICO (AASHTO T 342)	Módulo Dinámico (20°C, 10 Hz) (Mpa)	6,235	6,375
	Módulo Dinámico (40°C, 10 Hz) (Mpa)	1,203	1,988
CURVA MAESTRA DE MÓDULOS DINÁMICOS (AASHTO R 62)	Delta	3.6620	3.4029
	Alpha	2.8169	3.1014
	Beta	-1.0140	-1.2410
	Gamma	0.3867	0.2629
	C	1.6324	1.6833
	A	10.6119	10.9060
	VTS	-3.5407	-3.6500
RESISTENCIA A LA FATIGA A FLEXIÓN EN 4 PUNTOS (AASHTO T 321)	Ciclos de soporte con 200 µε de deformación (No. Ciclos)	74,276	92,293
	Deformación esperada para 1 millón de ciclos de soporte E <sub>s</sub> (µε)	110	124
	Pendiente de la ley de Fatiga A <sub>1</sub>	-0.2172	-0.2087
	Estimación de la ley de Fatiga A <sub>0</sub>	7.7009	7.7004

Fuente: Humberto Quintero O Y CIA SCA

Tabla 31. Valores de mezclas asfálticas con productos Humberto Quintero en la Sur Occidente

<b>VALORES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON PRODUCTOS HUMBERTO QUINTERO EN LA ZONA SUR OCCIDENTE</b>			
ENSAYO	DESCRIPCIÓN DEL PARAMETRO	Mezcla MDC-19 + Cemento Asfáltico Normalizado 60/70	
		Fuente de los materiales: Yumbo - Valle del Cauca	Fuente de los materiales: Pasto - Nariño
MÓDULO DINÁMICO (AASHTO T 342)	Módulo Dinámico (20°C, 10 Hz) (Mpa)	6,908	5,313
	Módulo Dinámico (40°C, 10 Hz) (Mpa)	1,803	1,708
CURVA MAESTRA DE MÓDULOS DINÁMICOS (AASHTO R 62)	Delta	3.6955	3.8873
	Alpha	2.7408	2.5080
	Beta	-1.2271	-0.9894
	Gamma	-0.3675	-0.3181
	C	2.0140	1.4557
	A	9.0580	10.9284
	VTS	-2.9834	-3.6520
RESISTENCIA A LA FATIGA A FLEXIÓN EN 4 PUNTOS (AASHTO T 321)	Ciclos de soporte con 200 µε de deformación (No. Ciclos)	629,226	74,154
	Deformación esperada para 1 millón de ciclos de soporte E <sub>s</sub> (µε)	166	132
	Pendiente de la ley de Fatiga A <sub>1</sub>	-0.1699	-0.1551
	Estimación de la ley de Fatiga A <sub>0</sub>	7.4606	7.0255

Fuente: Humberto Quintero O Y CIA SCA

Como complemento de la información suministrada por Humberto Quintero O Y CIA SCA, se presentan sintetizado en la Tabla 32, cuatro resultados adicionales de ensayos de módulo dinámico para temperaturas de 20°C y 40°C para frecuencia de 10Hz (AASHTO T 342) que representa una velocidad de los vehículos pesados del orden de 50 a 60 KPH y también se presentan los coeficientes de la curva maestra según el modelo sigmoideal (AASHTO R 62)..

*Tabla 32. Resultados complementarios de modulo dinámico de mezclas hechas con materiales de Humberto Quintero*

ENSAYO	DESCRIPCIÓN DEL PARAMETRO	Mezcla MDC-25 + (CA PEN 60/70)	Mezcla MDC-19 + (CA PEN 60/70)	Mezcla MDC-25 + (CA PEN 60/70)	Mezcla MDC-19 + (CA PEN 60/70)
<b>MÓDULO DINÁMICO (AASHTO T342)</b>	<b>MÓDULO DINÁMICO (20° C, 10 Hz) (Mpa)</b>	8,388	7,216	7,639	7,733
	<b>MÓDULO DINÁMICO (40° C, 10 Hz) (Mpa)</b>	1,478	1,433	2,003	2,073
<b>CURVA MAESTRA DE MÓDULOS DINAMICOS (AASHTO R62)</b>	<b>Delta</b>	3.4103	3.587	2.5062	4.3272
	<b>Alpha</b>	3.2141	3.0344	4.1612	2.2737
	<b>Beta</b>	-1.1743	-1.0027	-1.4183	-0.7158
	<b>Gamma</b>	0.3506	0.3238	0.2662	0.3538
	<b>C</b>	1.7735	1.8686	1.7339	1.9048
	<b>A</b>	-3.657	-3.657	-3.399	-3.399
	<b>VTS</b>	10.912	10.912	10.2	10.2

*Fuente: Humberto Quintero O Y CIA SCA*

Evaluando los resultados de la caracterización dinámica de las mezclas asfálticas proporcionados por la empresa Humberto Quintero O Y CIA SCA, a las diferentes fuentes de materiales de cada región se estableció bajo una temperatura de referencia de 21.1 °C los siguientes parámetros de la curva maestra de módulo dinámico que se presentan en la Tabla 33 para una mezcla MDC-19 utilizando un ligante bituminosos tipo AC 60-70 .

Tabla 33.. parámetros de la curva maestra de módulo dinámico asumidos en este estudio

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	c	A	VTS	Temperatura Referencia (oC) :	Velocidad de Diseño (km/h)
3.40304	-1.20380	0.29545	3.18475	1.86905	10.20000	-3.399	21.1	60.0

Fuente: Elaboración propia

Con respecto al ligante seleccionado AC 60-70 se considera el siguiente modelo reológico de regresión que relaciona el logaritmo (logaritmo de la viscosidad) en centipoises versus el logaritmo de la temperatura en grados Rankine:

$$\log(\log \eta) = 10.2 - 3.339 * \log(\text{Tr}) \quad \text{Ecuación 57}$$

La relación de Poisson asumida para la mezcla de concreto asfáltico corresponden a un valor de 0.35.

#### 6.3.4 Determinación de los espesores de las estructuras según el método mecánico empírico.

Con el propósito de realizar el ajuste a las estructuras inicialmente propuestas por la metodología AASHTO 1993 y realizar el dimensionamiento final de las estructuras de pavimento flexible según el método mecánico-empírico, contemplando las variables requeridas por el método y evaluando la tres condiciones representativas de temperatura ambiente, se realizó un análisis estructural con el software multicapa OPENPAVE (OpenPAVE, 2021) actuando sobre las diferentes estructuras la carga del eje equivalente de 80 kN, con el fin de determinar las magnitudes de las sollicitaciones críticas (deformaciones unitarias) que permitan controlar la fisuración de la fibra inferior de las capas asfálticas y el ahuellamiento de la superficie de la subrasante

considerando los modelos de deterioro recomendados por el método del Instituto del Asfalto (Asphalt Institute,1991).

Los resultados de este análisis estructural con los respectivos valores de las variables de diseño, los espesores obtenidos, los valores de las solicitaciones calculadas y los valores de porcentajes de consumo obtenidos en cada criterio de análisis se presentan sintetizados para las tres condiciones de temperatura en las siguientes tablas. ( Tabla 34, Tabla 35, Tabla 36)

Tabla 34. Resultados de este análisis estructural (Temperatura = 15 °C)

Temperatura aire (C)	Tránsito (ESAL)	Módulo Resiliente Subrasante de Diseño (psi)	Espesor MAC (cm)	Espesor BG (cm)	Espesor SB (cm)	Módulo Resiliente BG (psi)	Módulo Resiliente SB (psi)	Temp mezcla (C)	Módulo MAC (psi)	Deformación unit tangencial	Deformación unit vertical	Repeticiones Fatiga INA	Repeticiones Def Permanente INA	Consumo Fatiga INA	Consumo Def Permanente INA
15	2,000,000	5000	10	20	30	34079	12558	18.9	942692	1.96E-04	4.13E-04	2016524	1,931,550.66	99%	104%
15	2,000,000	6500	10	15	30	35389	15086	18.9	942692	1.97E-04	3.99E-04	1986810	2,257,520.47	101%	89%
15	2,000,000	8000	10.0	15	30	39010	17360	18.9	942692	1.85E-04	3.48E-04	2408962	4,129,511.77	83%	48%
15	2,000,000	10000	9.0	15	25	41982	19335	19.0	940272	1.93E-04	3.65E-04	2128810	3,342,934.74	94%	60%
15	2,000,000	12000	9.0	15	20	44067	20781	19.0	940272	1.87E-04	3.64E-04	2329926	3,382,723.41	86%	59%
15	2,000,000	15000	9.0	15	15	46412	22697	19.0	940272	1.81E-04	3.55E-04	2606692	3,808,127.49	77%	53%
15	2,000,000	20000	8.0	15	15	46412	27256	19.0	937651	1.88E-04	3.25E-04	2314320	5,635,492.20	86%	35%
15	3,500,000	5000	12	20	30	34079	12558	18.8	946980	1.67E-04	3.54E-04	3398500	3,860,244.69	103%	91%
15	3,500,000	6500	12.0	20	30	38678	15086	18.8	946980	1.56E-04	3.00E-04	4265307	8,069,189.82	82%	43%
15	3,500,000	8000	11.0	20	25	41378	16669	18.9	944924	1.62E-04	3.13E-04	3718111	6,694,337.15	94%	52%
15	3,500,000	10000	11.0	15	25	41982	19335	18.9	944924	1.65E-04	3.09E-04	3562346	7,078,224.68	98%	49%
15	3,500,000	12000	11.0	15	20	44067	20781	18.9	944924	1.60E-04	3.06E-04	3878393	7,388,576.18	90%	47%
15	3,500,000	15000	10.0	15	15	46412	22697	18.9	942692	1.68E-04	3.24E-04	3351571	5,727,664.47	104%	61%
15	3,500,000	20000	10.0	15	15	46412	27256	18.9	942692	1.61E-04	2.72E-04	3818132	12,544,412.77	92%	28%
15	5,000,000	5000	14	20	30	34079	12558	18.8	950611	1.43E-04	3.04E-04	5624056	7,557,878.31	89%	66%
15	5,000,000	6500	13.0	20	30	38678	15086	18.8	948872	1.44E-04	2.79E-04	5466879	11,172,784.80	91%	45%
15	5,000,000	8000	12.0	20	30	42517	17360	18.8	946980	1.48E-04	2.63E-04	5081289	14,520,910.56	98%	34%
15	5,000,000	10000	12.0	20	20	44227	18424	18.8	946980	1.45E-04	2.79E-04	5351539	11,191,286.99	93%	45%
15	5,000,000	12000	12.0	20	20	46412	20781	18.8	946980	1.40E-04	2.50E-04	6029932	18,246,157.02	83%	27%
15	5,000,000	15000	12.0	15	15	46412	22697	18.8	946980	1.44E-04	2.71E-04	5566801	12,637,984.38	90%	40%
15	5,000,000	20000	11.0	15	15	46412	27256	18.9	944924	1.49E-04	2.49E-04	4934751	18,539,605.07	101%	27%
15	10,000,000	5000	19	20	30	34079	12558	18.7	957315	1.01E-04	2.15E-04	10885517	35,653,632.91	92%	28%
15	10,000,000	6500	18.0	20	30	38678	15086	18.7	956213	1.01E-04	1.98E-04	10675391	51,685,896.77	94%	19%
15	10,000,000	8000	18.0	20	25	41378	16669	18.7	956213	9.82E-05	1.89E-04	11806619	63,428,552.14	85%	16%
15	10,000,000	10000	17.0	20	25	45651	19335	18.7	954999	9.98E-05	1.78E-04	11200834	83,856,708.01	89%	12%
15	10,000,000	12000	17.0	20	20	46412	20781	18.7	954999	9.82E-05	1.74E-04	11805238	92,044,552.77	85%	11%
15	10,000,000	15000	17.0	15	20	46412	23944	18.7	954999	9.84E-05	1.68E-04	11,733,511	109,060,364.09	85%	9%
15	10,000,000	20000	16.0	15	15	46412	27256	18.7	953665	1.02E-04	1.67E-04	10,319,855	112,109,432.99	97%	9%
15	15,000,000	5000	20	25	30	36406	12558	18.7	958311	9.04E-05	1.88E-04	15481629	65,321,687.64	97%	23%
15	15,000,000	6500	19.0	25	30	41229	15086	18.7	957315	9.07E-05	1.72E-04	15302838	97,879,044.99	98%	15%
15	15,000,000	8000	19.0	20	30	42517	17360	18.7	957315	9.05E-05	1.65E-04	15401824	116,442,915.09	97%	13%
15	15,000,000	10000	19.0	20	20	44227	18424	18.7	957315	8.90E-05	1.69E-04	16268463	106,641,970.33	92%	14%
15	15,000,000	12000	19.0	20	20	46412	20781	18.7	957315	8.61E-05	1.53E-04	18167464	166,322,686.69	83%	9%
15	15,000,000	15000	18.0	20	20	46412	23944	18.7	956213	8.95E-05	1.44E-04	16,040,008	213,588,247.90	94%	7%
15	15,000,000	20000	18.0	15	15	46412	27256	18.7	956213	8.91E-05	1.44E-04	16,244,655	213,672,580.86	92%	7%
15	20,000,000	5000	22	25	30	36406	12558	18.6	960009	8.01E-05	1.67E-04	22996069	109,716,464.79	87%	18%
15	20,000,000	6500	21.0	25	30	41229	15086	18.6	959207	8.03E-05	1.53E-04	22840492	163,307,180.22	88%	12%
15	20,000,000	8000	20.0	25	30	45237	17360	18.7	958311	8.15E-05	1.44E-04	21719474	215,977,733.90	92%	9%
15	20,000,000	10000	20.0	20	25	45651	19335	18.7	958311	8.22E-05	1.47E-04	21119911	196,139,849.30	95%	10%
15	20,000,000	12000	20.0	20	20	46412	20781	18.7	958311	8.09E-05	1.43E-04	22322761	220,876,971.21	90%	9%
15	20,000,000	15000	19.0	20	20	46412	23944	18.7	957315	8.38E-05	1.35E-04	19867870	284,754,601.79	101%	7%
15	20,000,000	20000	19.0	15	15	46412	27256	18.7	957315	8.34E-05	1.35E-04	20210690	290,610,379.62	99%	7%
15	30,000,000	5000	24	25	30	36406	12558	18.6	961350	7.14E-05	1.50E-04	33532270	180,273,913.90	89%	17%
15	30,000,000	6500	23.0	25	30	41229	15086	18.6	960721	7.14E-05	1.37E-04	33472718	266,397,960.69	90%	11%
15	30,000,000	8000	22.0	25	30	45237	17360	18.6	960009	7.24E-05	1.29E-04	32019705	351,776,247.30	94%	9%
15	30,000,000	10000	22.0	25	25	46412	19335	18.6	960009	7.08E-05	1.22E-04	34496323	450,519,765.21	87%	7%
15	30,000,000	12000	22.0	20	20	46412	20781	18.6	960009	7.16E-05	1.27E-04	33230664	380,374,157.64	90%	8%
15	30,000,000	15000	21.0	20	20	46412	23944	18.6	959207	7.40E-05	1.20E-04	29907566	494,440,250.87	100%	6%
15	30,000,000	20000	21.0	15	15	46412	27256	18.6	959207	7.34E-05	1.18E-04	30664678	522,727,114.29	98%	6%
15	40,000,000	5000	25	25	35	37338	13029	18.6	961898	6.67E-05	1.35E-04	41987387	291,583,375.73	95%	14%
15	40,000,000	6500	24.0	25	35	42200	15622	18.6	961350	6.67E-05	1.23E-04	41965856	437,633,560.77	95%	9%
15	40,000,000	8000	24.0	25	30	45237	17360	18.6	961350	6.47E-05	1.16E-04	46401008	560,708,053.81	86%	7%
15	40,000,000	10000	23.0	25	25	46412	19335	18.6	960721	6.69E-05	1.16E-04	41652401	573,074,096.12	96%	7%
15	40,000,000	12000	23.0	20	20	46412	20781	18.6	960721	6.75E-05	1.20E-04	40272724	493,415,603.95	99%	8%
15	40,000,000	15000	23.0	20	20	46412	23944	18.6	960721	6.57E-05	1.07E-04	44193361	832,905,547.46	91%	5%
15	40,000,000	20000	23.0	15	20	46412	28431	18.6	960721	6.45E-05	9.74E-05	46774807	1,243,845,727.25	86%	3%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35. Resultados de este análisis estructural (Temperatura = 20 °C)

Temperatura aire (C)	Tránsito (ESAL)	Módulo Resiliente Subrasante de Diseño (psi)	Espesor MAC (cm)	Espesor BG (cm)	Espesor SB (cm)	Módulo Resiliente BG (psi)	Módulo Resiliente SB (psi)	Temp mezcla (C)	Módulo MAC (psi)	Deformación unit tangencial	Deformación unit vertical	Repeticiones Fatiga INA	Repeticiones Def Permanente INA	Consumo Fatiga INA	Consumo Def Permanente INA
20	2,000,000	5000	13	15	30	31078	12558	24.0	635690	2.08E-04	9.74E-05	2327911	1,951,686.16	86%	102%
20	2,000,000	6500	12	15	30	35389	15086	24.0	633467	2.07E-04	3.76E-04	2348292	2,946,869.27	85%	68%
20	2,000,000	8000	11.0	15	30	39010	17360	24.1	631083	2.10E-04	3.53E-04	2268206	3,904,962.65	88%	51%
20	2,000,000	10000	10.0	15	25	41982	19335	24.1	628527	2.15E-04	3.67E-04	2089450	3,287,115.25	96%	61%
20	2,000,000	12000	10.0	15	20	44067	20781	24.1	628527	2.09E-04	3.66E-04	2295693	3,298,319.74	87%	61%
20	2,000,000	15000	9.0	15	15	46412	22697	24.2	625789	2.15E-04	3.88E-04	2093068	2,563,767.52	96%	78%
20	2,000,000	20000	9.0	15	15	46412	27256	24.2	625789	2.08E-04	3.24E-04	2335604	5,726,441.23	86%	35%
20	3,500,000	5000	14	20	30	34079	12558	23.9	637763	1.79E-04	3.41E-04	3753244	4,561,450.51	93%	77%
20	3,500,000	6500	13.0	20	30	38678	15086	24.0	635690	1.79E-04	3.08E-04	3802077	7,147,468.24	92%	49%
20	3,500,000	8000	13.0	20	25	41378	16669	24.0	635690	1.73E-04	2.98E-04	4278300	8,261,394.77	82%	42%
20	3,500,000	10000	13.0	15	25	41982	19335	24.0	635690	1.75E-04	2.95E-04	4099079	8,753,253.35	85%	40%
20	3,500,000	12000	12.0	15	20	44067	20781	24.0	633467	1.82E-04	3.15E-04	3574139	6,530,382.48	98%	54%
20	3,500,000	15000	12.0	15	15	46412	22697	24.0	633467	1.76E-04	3.06E-04	3994362	7,429,535.64	88%	47%
20	3,500,000	20000	11.0	15	15	46412	27256	24.1	631083	1.82E-04	2.77E-04	3612899	11,488,861.78	97%	30%
20	5,000,000	5000	15	20	30	34079	12558	23.9	639695	1.67E-04	3.19E-04	4694821	6,120,946.09	107%	82%
20	5,000,000	6500	14.0	20	30	38678	15086	23.9	637763	1.67E-04	2.89E-04	4742998	9,523,320.94	105%	53%
20	5,000,000	8000	14.0	20	30	42517	17360	23.9	637763	1.58E-04	2.54E-04	5680463	17,117,203.67	88%	29%
20	5,000,000	10000	13.0	20	20	44227	18424	24.0	635690	1.66E-04	2.88E-04	4831927	9,707,907.43	103%	52%
20	5,000,000	12000	13.0	20	20	46412	20781	24.0	635690	1.60E-04	2.58E-04	5459901	15,902,939.84	92%	31%
20	5,000,000	15000	13.0	15	15	46412	22697	24.0	635690	1.65E-04	2.83E-04	4992094	10,458,737.96	100%	48%
20	5,000,000	20000	13.0	15	15	46412	27256	24.0	635690	1.58E-04	2.39E-04	5666146	22,545,585.26	88%	22%
20	10,000,000	5000	21	20	30	34079	12558	23.7	648742	1.14E-04	2.21E-04	10008486	31,570,458.26	100%	32%
20	10,000,000	6500	20.0	20	30	38678	15086	23.8	647504	1.14E-04	2.02E-04	10153081	47,901,347.31	98%	21%
20	10,000,000	8000	20.0	25	41378	16669	23.8	647504	1.10E-04	1.93E-04	11293842	58,153,289.01	89%	17%	
20	10,000,000	10000	19.0	20	25	45651	19335	23.8	646166	1.11E-04	1.80E-04	11064010	80,358,301.36	90%	12%
20	10,000,000	12000	18.0	20	20	46412	20781	23.8	644722	1.16E-04	1.87E-04	9538179	66,513,365.66	105%	15%
20	10,000,000	15000	18.0	15	20	46412	23944	23.8	644722	1.17E-04	1.82E-04	9364720	76,015,181.07	107%	13%
20	10,000,000	20000	18.0	15	15	46412	27256	23.8	644722	1.13E-04	1.69E-04	10299311	105,529,731.48	97%	9%
20	15,000,000	5000	22	25	30	36406	12558	23.7	649887	1.03E-04	1.94E-04	14143326	57,452,060.82	106%	26%
20	15,000,000	6500	21.0	25	30	41229	15086	23.7	648742	1.02E-04	1.75E-04	14407576	89,738,906.13	104%	17%
20	15,000,000	8000	21.0	20	30	42517	17360	23.7	648742	1.02E-04	1.69E-04	14459943	104,911,400.05	104%	14%
20	15,000,000	10000	21.0	20	20	44227	18424	23.7	648742	1.00E-04	1.74E-04	15299668	92,913,684.98	98%	16%
20	15,000,000	12000	20.0	20	20	46412	20781	23.8	647504	1.03E-04	1.66E-04	14175146	112,838,621.86	106%	13%
20	15,000,000	15000	20.0	20	20	46412	23944	23.8	647504	1.00E-04	1.47E-04	15433949	194,146,861.79	97%	8%
20	15,000,000	20000	20.0	15	15	46412	27256	23.8	647504	1.00E-04	1.49E-04	15486043	184,624,503.16	97%	8%
20	20,000,000	5000	24	25	30	36406	12558	23.7	651912	9.20E-05	1.75E-04	20307086	90,703,996.27	98%	22%
20	20,000,000	6500	23.0	25	30	41229	15086	23.7	650942	9.14E-05	1.58E-04	20756306	140,711,746.43	96%	14%
20	20,000,000	8000	22.0	25	30	45237	17360	23.7	649887	9.21E-05	1.48E-04	20262372	193,203,485.80	99%	10%
20	20,000,000	10000	22.0	20	25	45651	19335	23.7	649887	9.31E-05	1.52E-04	19581907	168,854,392.81	102%	12%
20	20,000,000	12000	22.0	20	20	46412	20781	23.7	649887	9.15E-05	1.49E-04	20684175	186,586,599.44	97%	11%
20	20,000,000	15000	21.0	20	20	46412	23944	23.7	648742	9.44E-05	1.39E-04	18698461	249,545,983.50	107%	8%
20	20,000,000	20000	21.0	15	15	46412	27256	23.7	648742	9.42E-05	1.40E-04	18837117	241,388,429.03	106%	8%
20	30,000,000	5000	26	25	30	36406	12558	23.7	653615	8.27E-05	1.58E-04	28731714	140,678,625.05	104%	21%
20	30,000,000	6500	25.0	25	30	41229	15086	23.7	652802	8.21E-05	1.44E-04	29479212	216,692,320.76	102%	14%
20	30,000,000	8000	24.0	25	30	45237	17360	23.7	651912	8.26E-05	1.34E-04	28907443	296,846,100.45	104%	10%
20	30,000,000	10000	24.0	25	25	46412	19335	23.7	651912	8.08E-05	1.27E-04	31145032	374,570,121.80	96%	8%
20	30,000,000	12000	24.0	20	20	46412	20781	23.7	651912	8.19E-05	1.34E-04	29761295	300,899,118.30	101%	10%
20	30,000,000	15000	24.0	20	20	46412	23944	23.7	651912	7.97E-05	1.19E-04	32547314	510,886,750.36	92%	6%
20	30,000,000	20000	24.0	15	15	46412	27256	23.7	651912	7.92E-05	1.18E-04	33144116	516,733,197.71	91%	6%
20	40,000,000	5000	28	25	35	37338	13029	23.7	655028	7.37E-05	1.36E-04	41969304	276,997,406.54	95%	14%
20	40,000,000	6500	27.0	25	35	42200	15622	23.7	654356	7.31E-05	1.23E-04	43166341	430,960,103.59	93%	9%
20	40,000,000	8000	26.0	25	30	45237	17360	23.7	653615	7.44E-05	1.22E-04	40685922	448,253,357.58	98%	9%
20	40,000,000	10000	26.0	25	25	46412	19335	23.7	653615	7.27E-05	1.16E-04	43918089	570,199,892.13	91%	7%
20	40,000,000	12000	26.0	20	20	46412	20781	23.7	653615	7.36E-05	1.21E-04	42228652	473,686,680.70	95%	8%
20	40,000,000	15000	25.0	20	20	46412	23944	23.7	652802	7.55E-05	1.13E-04	38876460	641,066,564.31	103%	6%
20	40,000,000	20000	25.0	15	20	46412	28431	23.7	652802	7.44E-05	1.04E-04	40774942	930,086,789.36	98%	4%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Resultados de este análisis estructural (Temperatura = 25 °C)

Temperatura aire (C)	Tránsito (ESAL)	Módulo Resiliente Subrasante de Diseño (psi)	Espesor MAC (cm)	Espesor BG (cm)	Espesor SB (cm)	Módulo Resiliente BG (psi)	Módulo Resiliente SB (psi)	Temp mezcla (C)	Módulo MAC (psi)	Deformación unit tangencial	Deformación unit vertical	Repeticiones Fatiga INA	Repeticiones Def Permanente INA	Consumo Fatiga INA	Consumo Def Permanente INA
25	2,000,000	5000	14	15	30	31078	12558	29.1	414507	2.42E-04	4.31E-04	2013311	1,591,868.70	99%	126%
25	2,000,000	6500	13	15	30	35389	15086	29.1	412551	2.39E-04	3.88E-04	2131178	2,540,903.53	94%	79%
25	2,000,000	8000	12.0	15	30	39010	17360	29.2	410468	2.38E-04	3.61E-04	2153690	3,537,125.77	93%	57%
25	2,000,000	10000	11.0	15	25	41982	19335	29.3	408251	2.41E-04	3.72E-04	2071797	3,078,995.28	97%	65%
25	2,000,000	12000	11.0	15	20	44067	20781	29.3	408251	2.34E-04	3.73E-04	2289320	3,057,413.73	87%	65%
25	2,000,000	15000	10.0	15	15	46412	22697	29.3	405892	2.40E-04	3.91E-04	2115279	2,464,004.38	95%	81%
25	2,000,000	20000	10.0	15	15	46412	27256	29.3	405892	2.33E-04	3.27E-04	2321148	5,509,392.20	86%	36%
25	3,500,000	5000	15	20	30	34079	12558	29.0	416344	2.10E-04	3.57E-04	3240778	3,722,820.87	108%	94%
25	3,500,000	6500	15.0	20	30	38678	15086	29.0	416344	1.94E-04	3.02E-04	4170488	7,877,160.10	84%	44%
25	3,500,000	8000	14.0	20	25	41378	16669	29.1	414507	1.98E-04	3.10E-04	3897354	7,004,592.24	90%	50%
25	3,500,000	10000	14.0	15	25	41982	19335	29.1	414507	2.01E-04	3.07E-04	3701462	7,232,603.59	95%	48%
25	3,500,000	12000	14.0	15	20	44067	20781	29.1	414507	1.96E-04	3.06E-04	4062699	7,395,666.83	86%	47%
25	3,500,000	15000	13.0	15	15	46412	22697	29.1	412551	2.01E-04	3.18E-04	3751627	6,184,393.42	93%	57%
25	3,500,000	20000	13.0	15	15	46412	27256	29.1	412551	1.94E-04	2.67E-04	4199709	13,496,980.79	83%	26%
25	5,000,000	5000	17	20	30	34079	12558	29.0	419688	1.85E-04	3.18E-04	4820922	6,213,941.59	104%	80%
25	5,000,000	6500	17.0	20	30	38678	15086	29.0	419688	1.72E-04	2.70E-04	6145134	12,891,773.51	81%	39%
25	5,000,000	8000	16.0	20	30	42517	17360	29.0	418069	1.72E-04	2.50E-04	6128747	18,186,011.24	82%	27%
25	5,000,000	10000	15.0	20	20	44227	18424	29.0	416344	1.82E-04	2.82E-04	5369187	10,608,091.32	93%	47%
25	5,000,000	12000	15.0	20	20	46412	20781	29.0	416344	1.73E-04	2.53E-04	6084201	17,375,418.29	82%	29%
25	5,000,000	15000	15.0	15	15	46412	22697	29.0	416344	1.78E-04	2.79E-04	5537419	11,133,630.63	90%	45%
25	5,000,000	20000	14.0	15	15	46412	27256	29.1	414507	1.83E-04	2.51E-04	5114772	18,029,652.38	98%	28%
25	10,000,000	5000	24	20	30	34079	12558	28.8	428485	1.25E-04	2.20E-04	10718628	32,184,449.08	93%	31%
25	10,000,000	6500	23.0	20	30	38678	15086	28.8	427468	1.23E-04	1.99E-04	11269288	50,926,380.19	89%	20%
25	10,000,000	8000	22.0	20	25	41378	16669	28.8	426378	1.25E-04	2.00E-04	10611127	49,090,404.40	94%	20%
25	10,000,000	10000	21.0	20	25	45651	19335	28.9	425211	1.25E-04	1.85E-04	10750484	70,774,415.91	93%	14%
25	10,000,000	12000	21.0	20	20	46412	20781	28.9	425211	1.23E-04	1.82E-04	11319235	75,178,925.82	88%	13%
25	10,000,000	15000	21.0	15	20	46412	23944	28.9	425211	1.24E-04	1.78E-04	11040131	84,437,311.02	91%	12%
25	10,000,000	20000	20.0	15	15	46412	27256	28.9	423963	1.27E-04	1.75E-04	10054745	89,790,355.94	99%	11%
25	15,000,000	5000	25	25	30	36406	12558	28.8	429433	1.12E-04	1.93E-04	15047715	57,708,959.89	100%	26%
25	15,000,000	6500	24.0	25	30	41229	15086	28.8	428485	1.11E-04	1.74E-04	15862696	93,588,037.55	95%	16%
25	15,000,000	8000	24.0	20	30	42517	17360	28.8	428485	1.10E-04	1.68E-04	15903372	107,988,426.25	94%	14%
25	15,000,000	10000	23.0	20	20	44227	18424	28.8	427468	1.14E-04	1.83E-04	14230973	74,682,078.41	105%	20%
25	15,000,000	12000	23.0	20	20	46412	20781	28.8	427468	1.10E-04	1.65E-04	16044433	117,717,160.63	93%	13%
25	15,000,000	15000	22.0	20	20	46412	23944	28.8	426378	1.13E-04	1.53E-04	14619802	162,596,779.98	103%	9%
25	15,000,000	20000	22.0	15	15	46412	27256	28.8	426378	1.14E-04	1.57E-04	14490642	145,752,503.37	104%	10%
25	20,000,000	5000	27	25	30	36406	12558	28.8	431133	1.02E-04	1.77E-04	20837084	85,510,502.18	96%	23%
25	20,000,000	6500	26.0	25	30	41229	15086	28.8	430315	9.99E-05	1.59E-04	22024308	137,755,305.69	91%	15%
25	20,000,000	8000	25.0	25	30	45237	17360	28.8	429433	9.98E-05	1.47E-04	22153469	195,861,104.75	90%	10%
25	20,000,000	10000	25.0	20	25	45651	19335	28.8	429433	1.01E-04	1.53E-04	21305517	166,186,680.22	94%	12%
25	20,000,000	12000	25.0	20	20	46412	20781	28.8	429433	9.93E-05	1.50E-04	22511105	180,713,897.08	89%	11%
25	20,000,000	15000	24.0	20	20	46412	23944	28.8	428485	1.02E-04	1.39E-04	20678668	250,533,727.93	97%	8%
25	20,000,000	20000	24.0	15	15	46412	27256	28.8	428485	1.02E-04	1.42E-04	20641436	231,112,301.71	97%	9%
25	30,000,000	5000	29	25	30	36406	12558	28.7	432593	9.23E-05	1.63E-04	28521606	124,960,300.29	105%	24%
25	30,000,000	6500	29.0	25	30	41229	15086	28.7	432593	8.65E-05	1.41E-04	35288650	239,637,471.42	85%	13%
25	30,000,000	8000	28.0	25	30	45237	17360	28.7	431892	8.62E-05	1.30E-04	35696453	339,315,940.78	84%	9%
25	30,000,000	10000	27.0	25	25	46412	19335	28.8	431133	8.84E-05	1.29E-04	32937378	353,168,969.95	91%	8%
25	30,000,000	12000	27.0	20	20	46412	20781	28.8	431133	8.98E-05	1.37E-04	31246250	272,150,186.22	96%	11%
25	30,000,000	15000	26.0	20	20	46412	23944	28.8	430315	9.20E-05	1.27E-04	28935539	378,797,465.07	104%	8%
25	30,000,000	20000	26.0	15	15	46412	27256	28.8	430315	9.19E-05	1.29E-04	29070339	358,504,568.13	103%	8%
25	40,000,000	5000	31	25	35	37338	13029	28.7	433835	8.28E-05	1.41E-04	40597827	237,117,941.70	99%	17%
25	40,000,000	6500	30.0	25	35	42200	15622	28.7	433240	8.13E-05	1.27E-04	43108422	382,726,645.04	93%	10%
25	40,000,000	8000	30.0	25	30	45237	17360	28.7	433240	7.85E-05	1.20E-04	48409961	481,367,193.89	83%	8%
25	40,000,000	10000	29.0	25	25	46412	19335	28.7	432593	8.03E-05	1.19E-04	44994934	507,583,332.02	89%	8%
25	40,000,000	12000	29.0	20	20	46412	20781	28.7	432593	8.15E-05	1.25E-04	42898443	402,375,223.14	93%	10%
25	40,000,000	15000	28.0	20	20	46412	23944	28.7	431892	8.33E-05	1.16E-04	40045707	562,371,335.76	100%	7%
25	40,000,000	20000	28.0	15	15	46412	27256	28.7	431892	8.30E-05	1.17E-04	40474336	544,789,189.21	99%	7%

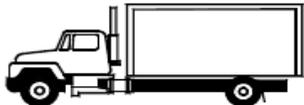
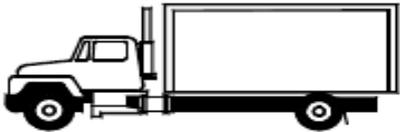
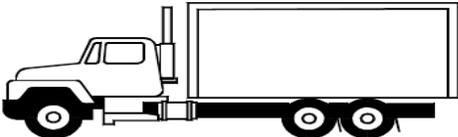
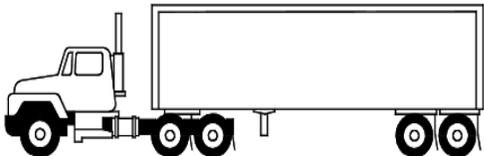
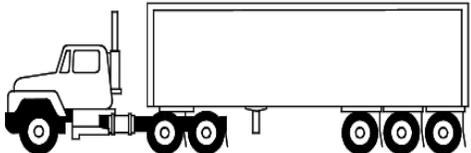
Fuente: Elaboración propia

## **7 ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA Y FACTOR DAÑO DE LOS VEHÍCULOS PESADOS TÍPICOS EN COLOMBIA SEGÚN METODOLOGIA AASHTO.**

Utilizando como referencia los modelos de estructuras de pavimento flexible anteriormente determinadas y considerando los criterios y parámetros establecidos por el método AASHTO para determinar los factores de equivalencia de carga para los ejes simple rueda doble, tándem rueda doble y trídem rueda doble, se realizó el cálculo de los factores de equivalencia de carga por eje (FEC) y de factor daño por vehículo (FD), utilizando las siguientes expresiones recomendadas por esta metodología (AASHTO, 1993).y siguiendo los pasos que se describen a continuación

- Obtener para cada vehículo pesado seleccionado en este estudio, el peso total del vehículo en condiciones cargadas y la respectiva distribución de las magnitudes de carga por eje en cada tipo de eje de acuerdo a la configuración del vehículo. Esta información se determinó considerando los valores de pesos máximos vehiculares y valores máximos de carga legales por eje regulados en la resolución 1782 de mayo de 2009 (Ministerio de Transporte, 2009), del Ministerio de Transporte colombiano.

Tabla 37. Vehículos analizados con sus respectivas cargas totales y discriminadas en cada eje.

VEHICULO	Peso Total t	Tipo de Eje			
		Delantero SRS t	Trasero SRD t	Tandem RD t	Tridem RD t
<b>Camión C2p</b> 	8.5	2.5	6	-	-
<b>Camión C2G</b> 	17	6	11	-	-
<b>Camión C3</b> 	28	6	-	22	-
<b>Camión C3S2</b> 	48	6	-	21/21	-
<b>Camión C3S3</b> 	52	6	-	22	24

Fuente: Elaboración propia

- Establecer la magnitud de carga y configuración del eje equivalente. Conservando las recomendaciones del método AASHTO, la carga de referencia corresponde a un eje simple de semieje rueda doble, con magnitud de carga por eje de 18 Kips o 80 kN.
- Determinar para cada uno de los modelos estructurales de pavimento flexible obtenidos para las diferentes condiciones de las variables tránsito, resistencia de la subrasante y temperatura ambiente, el parámetro de número estructural (SN), considerando los respectivos espesores ( $h_i$ ) y coeficientes estructurales ( $a_i$ ) y de drenaje ( $m_i$ ), de cada una de las capas constituyentes del modelo. (AASHTO, 1993).

$$SN \text{ proporcionado} = a_1 h_1 + a_2 h_2 m_2 + a_3 h_3 m_3 \quad \text{Ecuación 58}$$

- Calcular considerando el índice de serviciabilidad final ( $p_t$ ), la función representativa de la pérdida de capacidad de servicio ( $G_t$ ), que permite relacionar la pérdida de capacidad de servicio de un pavimento en un determinado momento, con respecto a la pérdida total potencial cuando el índice de serviciabilidad final llega a un valor de 1.5. (AASHTO, 1993).

$$G_t = \log \left( \frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5} \right) \quad \text{Ecuación 59}$$

- Calcular para cada magnitud de carga y tipo de eje y para el eje estándar los parámetros ( $\beta_x$ ) y ( $\beta_{18}$ ), que representan la pendiente de la curva de serviciabilidad, ocasionada por cada carga actuando sobre un determinado modelo estructural. (AASHTO, 1993).

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.801(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad \text{Ecuación 60}$$

- Calcular el factor de equivalencia de carga por eje ( $FEC$ ), relacionando los números de repeticiones de carga del eje estándar de 18 Kips ( $W_{18}$ ) con respecto al número de repeticiones de carga de un determinado tipo y magnitud de carga por eje seleccionado ( $W_{tx}$ ). (AASHTO, 1993).

$$FEC = \frac{W_{18}}{W_{tx}}$$

Ecuación 61

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right) = 4.79 \log(18 + 1) - 4.79 \log(L_x + L_2) + 4.33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

Ecuación 62

- Considerando la configuración de cada vehículo y los respectivos valores calculados de factores de equivalencia de carga por eje ( $FEC$ ), se calculó en cada modelo estructural el factor daño por vehículo (FD), acumulando los factores de equivalencia de carga de los ejes correspondientes a cada vehículo analizado. (AASHTO, 1993).

$$FACTOR\ DAÑO = \sum_{i=1}^n FEC_i$$

Ecuación 63

Para facilitar el proceso de cálculo se elaboró la siguiente hoja electrónica que permite realizar paso a paso el procedimiento anteriormente consignado (Tabla 38)

Tabla 38. Hoja de Cálculo para el factor de equivalencia de carga para el vehículo C3-S3 por la metodología AASHTO-93

## FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA MÉTODO AASHTO 1993

CAPA	ESPESOR (cm)	ESPESOR (pulg)	$a_i$	$m_i$	SN
CARPETA	12.5	4.92	0.44	-	5.02
BASE	20	7.87	0.14	1	
SUBBASE	45	17.72	0.11	0.9	

FUNCION DE COMPORTAMIENTO				
Po	4.2	$Gt = \log \left( \frac{4.2 - P_t}{4.2 - 1.5} \right)$	<b>Gt =</b>	-0.201
Pt	2.5			

VEHÍCULO: C3S3					
EJE		ESTANDAR	1	2	3
TIPO DE EJE		SRD	SRS	TANDEM	TRIDEM
CARGA (T)		8.2	6	22	24
CARGA (KIPS)	$L_x$	18.08	13.23	48.50	52.91
CÓDIGO DE EJE	$L_2$	1	-	2	3
$\beta_x$	$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} * L_2^{3.23}}$	0.4995	-	0.6461	0.4923
$\beta_{18}$	$\beta_{18} = 0.40 + \frac{0.081(18 + 1)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} * 1^{3.23}}$	0.4995			
$\log \left( \frac{W_{tx}}{W_{t18}} \right) =$	$\log \left( \frac{W_{tx}}{W_{t18}} \right) = 4.79 \log(18 + 1) - 4.79 \log(L_x + L_2) + 4.33 \log L_2 + \frac{Gt}{\beta_x} - \frac{Gt}{\beta_{18}}$	-0.009	-	-0.639	-0.185
FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA	$FEC = \frac{1}{10^{\log \left( \frac{W_{tx}}{W_{t18}} \right)}}$	1.0	0.68	4.35	1.53
FACTOR DAÑO VEHICULAR (FDV)	$\sum_{i=1}^n FEC_i$	<b>6.56</b>			

Fuente: Elaboración propia

La información sintetizada de los resultados de los valores de los factores daño obtenidos para cada vehículo seleccionado en este estudio, actuando en los diferentes modelos estructurales analizados, según las diferentes categorías de tránsito, resistencia de la subrasante y condiciones de temperatura ambiente, se presentan en las siguientes tablas: Tabla 39, Tabla 40, Tabla 41, Tabla 42, Tabla 43, donde se pueden visualizar los valores de factor daño obtenidos en cada modelo, el rango de variación en cada nivel de tránsito al sensibilizar la resistencia de la subrasante y un valor promedio en cada categoría de tránsito.

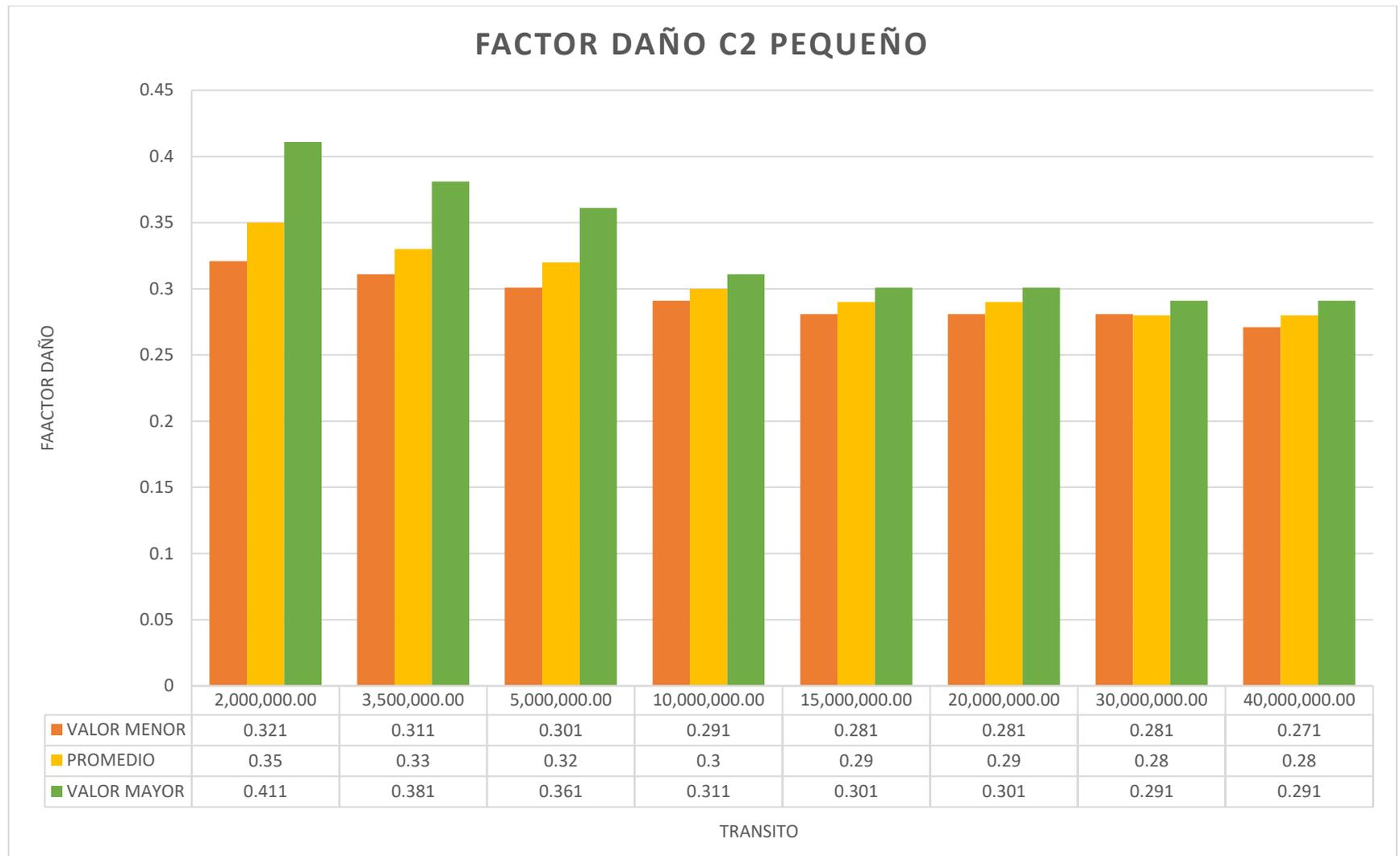
En las figuras: Figura. 14, Figura. 15, Figura. 16, Figura. 17, Figura. 18. Se presenta la representación gráfica de los valores de factor daño obtenidos para cada vehículo.

Tabla 39. Estimación del Factor Daño del vehículo C2- Pequeño por la metodología AASHTO

CAMION C2 PEQUEÑO							
TRANSITO	MODULO SUBRASANTE (psi)	FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO	
2,000,000.00	5000	0.331	0.331	0.321	0.321	0.34	
	6500	0.331	0.331	0.321			
	8000	0.331	0.331	0.331			
	10000	0.341	0.341	0.341	A		
	12000	0.341	0.341	0.341	0.341		
	15000	0.341	0.341	0.341			
3,500,000.00	20000	0.341	0.341	0.341	0.301	0.33	
	5000	0.321	0.311	0.311			
	6500	0.321	0.311	0.301			
	8000	0.331	0.321	0.311			
	10000	0.341	0.331	0.321			A
	12000	0.341	0.341	0.331			0.341
15000	0.341	0.341	0.341				
5,000,000.00	20000	0.341	0.341	0.341	0.301	0.32	
	5000	0.311	0.311	0.301			
	6500	0.311	0.311	0.301			
	8000	0.321	0.311	0.301			
	10000	0.331	0.321	0.311			A
	12000	0.331	0.321	0.311			0.341
15000	0.341	0.341	0.331				
10,000,000.00	20000	0.341	0.341	0.331	0.281	0.3	
	5000	0.291	0.291	0.281			
	6500	0.291	0.291	0.281			
	8000	0.301	0.291	0.291			
	10000	0.301	0.291	0.291			A
	12000	0.301	0.301	0.291			0.321
15000	0.311	0.311	0.301				
15,000,000.00	20000	0.321	0.311	0.301	0.281	0.29	
	5000	0.291	0.281	0.281			
	6500	0.291	0.281	0.281			
	8000	0.291	0.291	0.281			
	10000	0.301	0.291	0.291			A
	12000	0.301	0.291	0.291			0.311
15000	0.301	0.291	0.291				
20,000,000.00	20000	0.311	0.301	0.301	0.281	0.3	
	5000	0.291	0.291	0.281			
	6500	0.291	0.291	0.281			
	8000	0.301	0.291	0.281			
	10000	0.311	0.301	0.291			A
	12000	0.311	0.301	0.291			0.341
15000	0.321	0.311	0.301				
30,000,000.00	20000	0.341	0.331	0.311	0.281	0.29	
	5000	0.291	0.281	0.281			
	6500	0.291	0.281	0.281			
	8000	0.291	0.291	0.281			
	10000	0.291	0.291	0.281			A
	12000	0.301	0.301	0.291			0.331
15000	0.311	0.301	0.291				
40,000,000.00	20000	0.331	0.311	0.301	0.281	0.29	
	5000	0.281	0.281	0.281			
	6500	0.281	0.281	0.281			
	8000	0.291	0.281	0.281			
	10000	0.291	0.281	0.281			A
	12000	0.301	0.291	0.281			0.311
15000	0.301	0.291	0.291				
	20000	0.311	0.301	0.291			

Fuente: Elaboración propia

Figura. 14. Gráfico de comportamiento del factor daño del vehículo C2- Pequeño por la metodología AASHTO



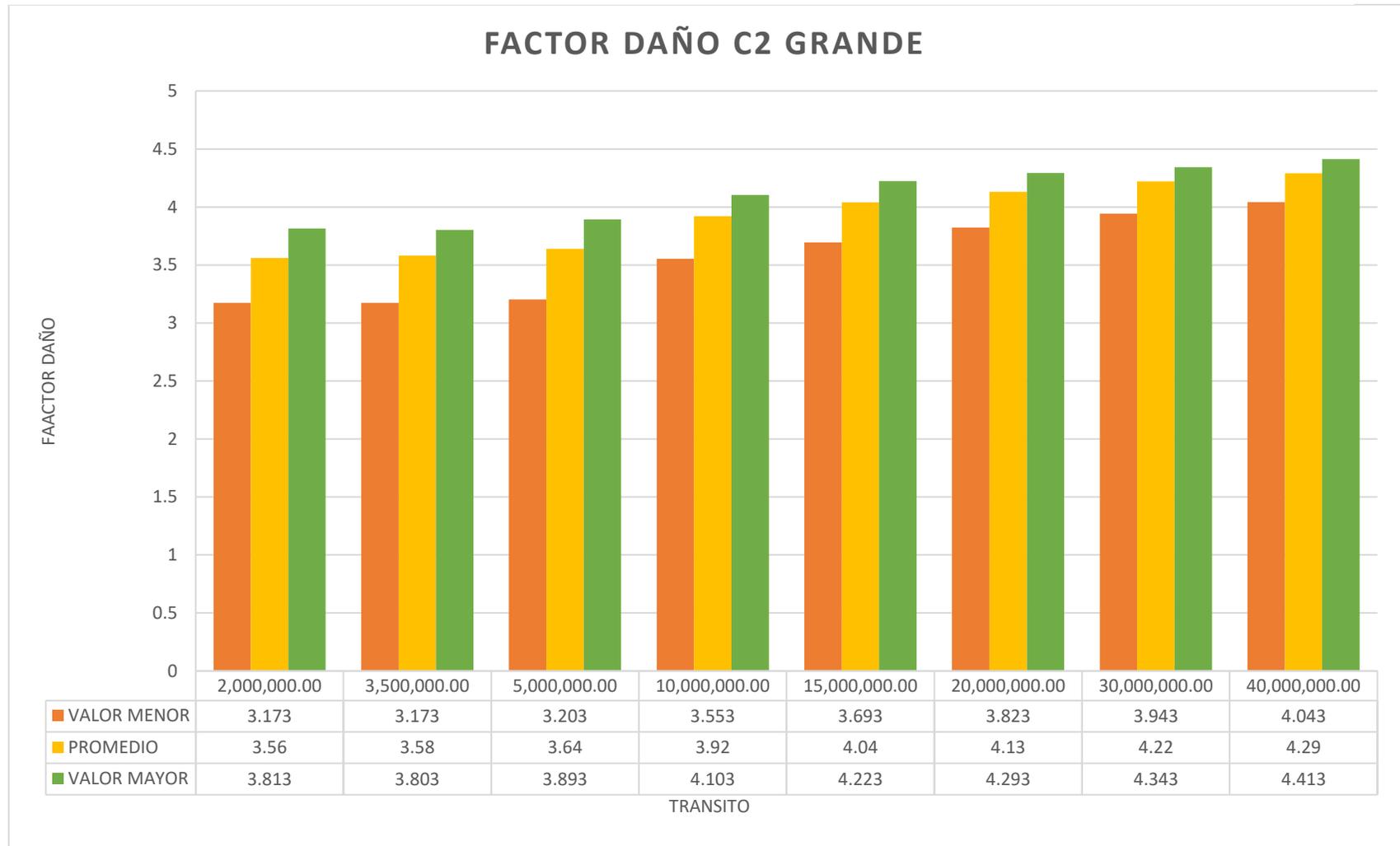
Fuente: Elaboración propia

Tabla 40. Estimación del Factor Daño del vehículo C2- Grande por la metodología AASHTO

CAMION C2 GRANDE						
TRANSITO	MODULO SUBRASANTE (psi)	FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO
2,000,000.00	5000	3.723	3.713	3.723	3.713	3.79
	6500	3.723	3.713	3.733		
	8000	3.723	3.713	3.713		
	10000	3.793	3.753	3.723	A	
	12000	3.853	3.803	3.763	3.993	
	15000	3.923	3.923	3.863		
20000	3.993	3.923	3.863			
3,500,000.00	5000	3.723	3.763	3.803	3.713	3.76
	6500	3.743	3.773	3.843		
	8000	3.713	3.743	3.773		
	10000	3.723	3.713	3.723	A	
	12000	3.763	3.733	3.713	3.863	
	15000	3.863	3.763	3.733		
20000	3.863	3.803	3.733			
5,000,000.00	5000	3.763	3.803	3.883	3.713	3.77
	6500	3.773	3.813	3.933		
	8000	3.743	3.813	3.893		
	10000	3.713	3.723	3.763	A	
	12000	3.713	3.723	3.763	3.933	
	15000	3.763	3.733	3.713		
20000	3.803	3.733	3.713			
10,000,000.00	5000	3.973	4.063	4.183	3.723	3.95
	6500	3.983	4.073	4.193		
	8000	3.933	4.023	4.103		
	10000	3.883	3.973	4.063	A	
	12000	3.833	3.883	4.013	4.193	
	15000	3.773	3.813	3.933		
20000	3.723	3.773	3.843			
15,000,000.00	5000	4.093	4.173	4.273	3.773	4.05
	6500	4.103	4.183	4.283		
	8000	4.023	4.113	4.223		
	10000	3.923	4.013	4.103	A	
	12000	3.923	3.973	4.103	4.283	
	15000	3.883	3.973	4.063		
20000	3.773	3.843	3.933			
20,000,000.00	5000	3.863	3.983	4.333	3.303	3.8
	6500	3.873	3.993	4.133		
	8000	3.813	3.933	4.093		
	10000	3.623	3.763	3.943	A	
	12000	3.553	3.683	3.883	4.333	
	15000	3.483	3.623	3.823		
20000	3.303	3.423	3.633			
30,000,000.00	5000	3.983	4.083	4.203	3.423	3.93
	6500	3.993	4.093	4.243		
	8000	3.933	4.043	4.213		
	10000	3.873	3.983	4.133	A	
	12000	3.683	3.823	3.993	4.243	
	15000	3.623	3.823	3.933		
20000	3.423	3.633	3.763			
40,000,000.00	5000	4.113	4.223	4.323	3.643	4.03
	6500	4.093	4.213	4.313		
	8000	4.043	4.133	4.273		
	10000	3.933	4.083	4.203	A	
	12000	3.753	3.933	4.093	4.323	
	15000	3.753	3.883	4.043		
20000	3.643	3.773	3.893			

Fuente: Elaboración propia

Figura. 15. Gráfico de comportamiento del factor daño del vehículo C2- Grande por la metodología AASHTO



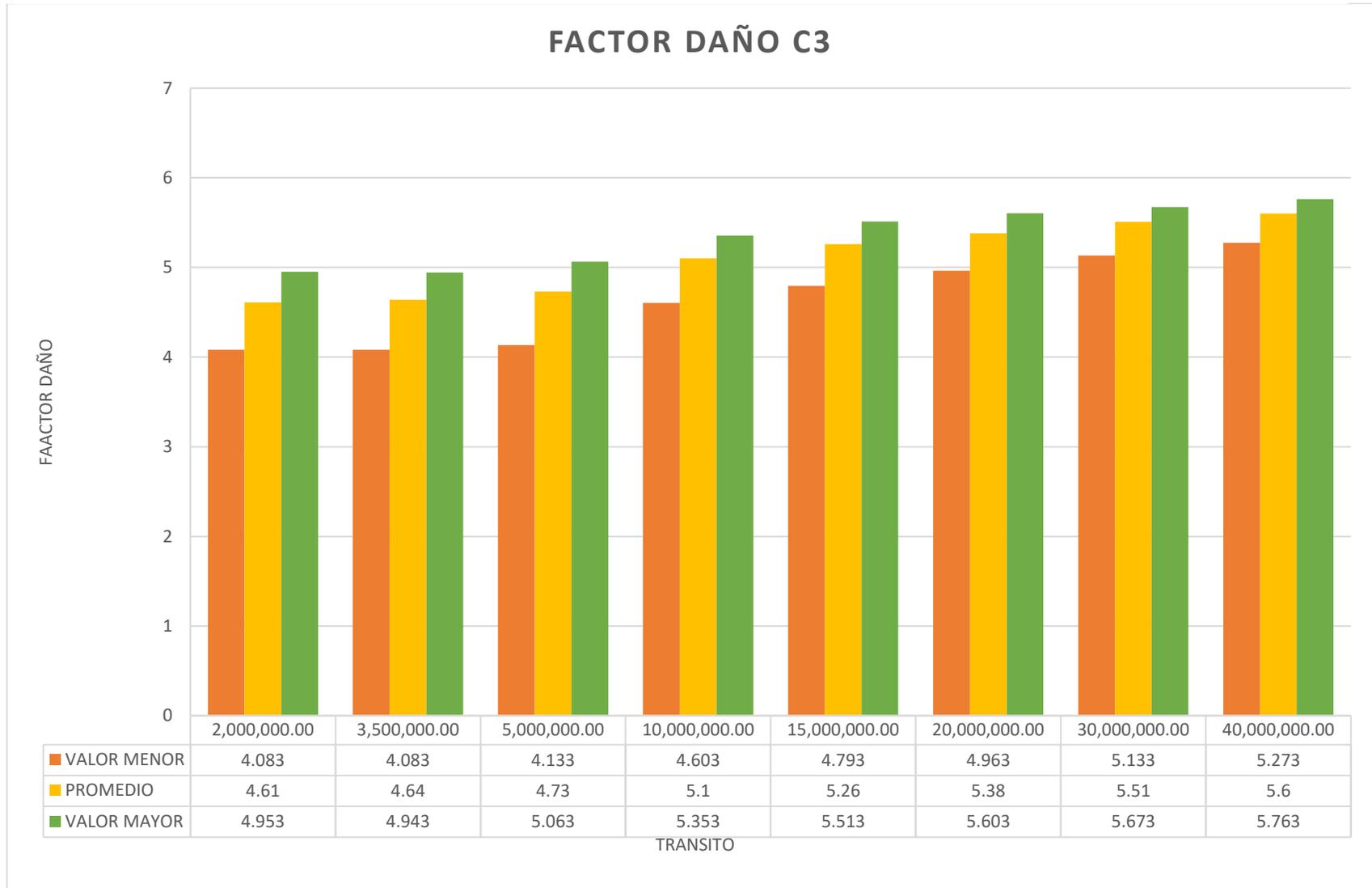
Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Estimación del Factor Daño del vehículo C3 por la metodología AASHTO

CAMION C3						
TRANSITO	MODULO SUBRASANTE (psi)	FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO
2,000,000.00	5000	4.823	4.823	4.833	4.823	4.93
	6500	4.833	4.823	4.843		
	8000	4.833	4.823	4.823		
	10000	4.923	4.873	4.843	A	
	12000	5.013	4.933	4.883	5.203	
	15000	5.103	5.103	5.013		
20000	5.203	5.103	5.013			
3,500,000.00	5000	4.833	4.893	4.933	4.823	4.89
	6500	4.863	4.903	5.003		
	8000	4.823	4.863	4.893		
	10000	4.843	4.823	4.843	A	
	12000	4.883	4.843	4.823	5.013	
	15000	5.013	4.883	4.843		
20000	5.013	4.943	4.843			
5,000,000.00	5000	4.893	4.933	5.043	4.823	4.9
	6500	4.903	4.953	5.123		
	8000	4.863	4.953	5.063		
	10000	4.823	4.833	4.893	A	
	12000	4.823	4.833	4.893	5.123	
	15000	4.883	4.843	4.823		
20000	4.943	4.843	4.823			
10,000,000.00	5000	5.173	5.293	5.453	4.833	5.15
	6500	5.183	5.303	5.463		
	8000	5.113	5.233	5.353		
	10000	5.053	5.173	5.293	A	
	12000	4.993	5.043	5.233	5.463	
	15000	4.903	4.953	5.123		
20000	4.833	4.893	5.003			
15,000,000.00	5000	5.333	5.443	5.583	4.893	5.27
	6500	5.343	5.453	5.593		
	8000	5.243	5.363	5.513		
	10000	5.103	5.233	5.343	A	
	12000	5.103	5.173	5.343	5.593	
	15000	5.043	5.173	5.293		
20000	4.893	5.003	5.113			
20,000,000.00	5000	5.023	5.183	5.663	4.263	4.94
	6500	5.043	5.203	5.393		
	8000	4.963	5.123	5.333		
	10000	4.703	4.893	5.143	A	
	12000	4.603	4.783	5.053	5.663	
	15000	4.503	4.693	4.963		
20000	4.263	4.433	4.713			
30,000,000.00	5000	5.183	5.323	5.483	4.433	5.11
	6500	5.203	5.333	5.543		
	8000	5.123	5.263	5.503		
	10000	5.033	5.193	5.383	A	
	12000	4.783	4.963	5.203	5.543	
	15000	4.693	4.963	5.123		
20000	4.433	4.713	4.893			
40,000,000.00	5000	5.363	5.523	5.643	4.723	5.26
	6500	5.343	5.503	5.633		
	8000	5.263	5.393	5.583		
	10000	5.113	5.323	5.493	A	
	12000	4.873	5.123	5.333	5.643	
	15000	4.873	5.053	5.273		
20000	4.723	4.903	5.063			

Fuente: Elaboración propia

Figura. 16. Gráfico de comportamiento del factor daño del vehículo C3 por la metodología AASHTO



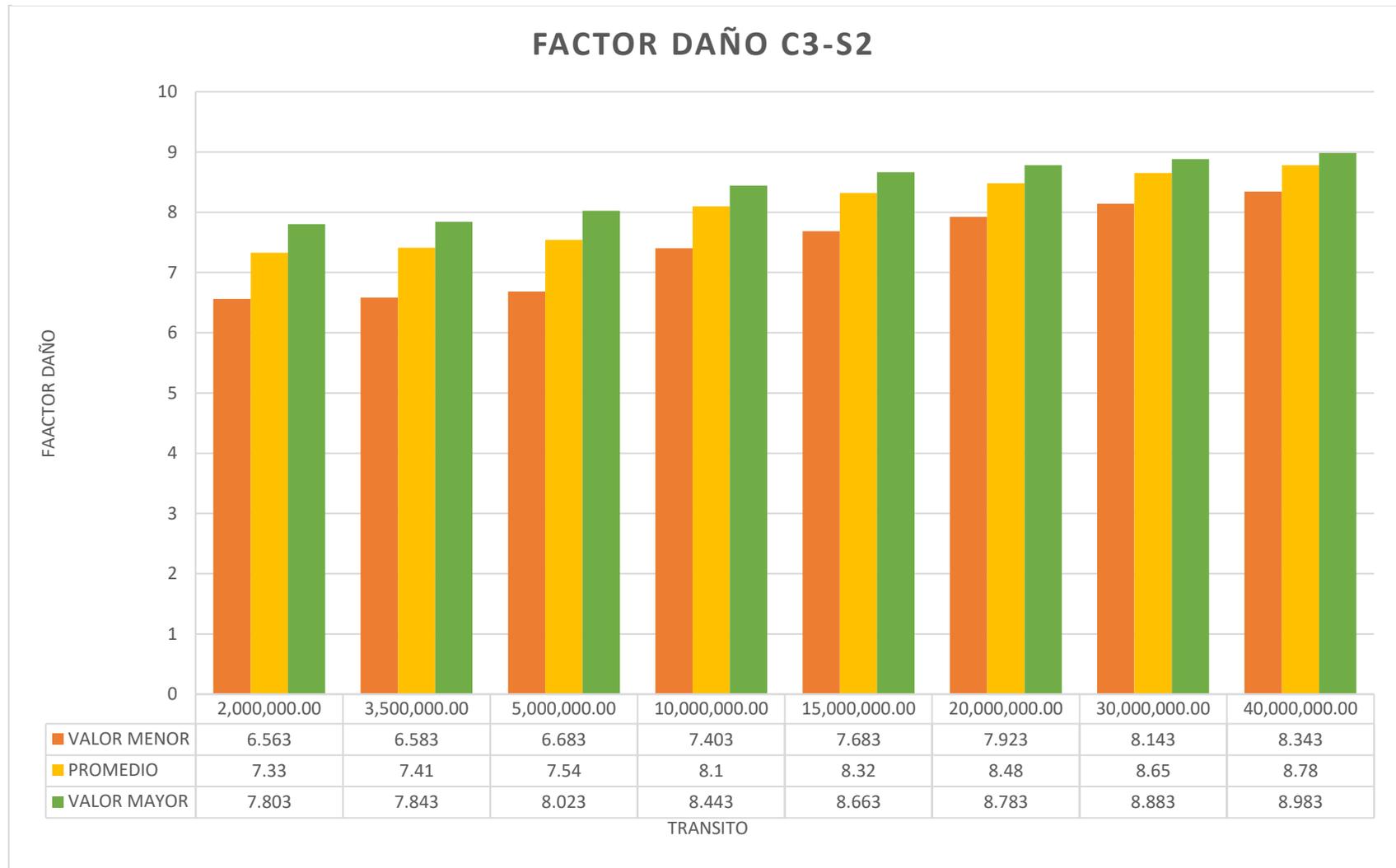
Fuente: Elaboración propia

Tabla 42. Estimación del Factor Daño del vehículo C3-S2 por la metodología AASHTO

CAMION C3-S2						
TRANSITO	MODULO SUBRASANTE (psi)	FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO
2,000,000.00	5000	7.643	7.643	7.663	7.643	7.77
	6500	7.643	7.643	7.683		
	8000	7.643	7.643	7.643		
	10000	7.763	7.703	7.643	A	
	12000	7.863	7.763	7.703	8.143	
	15000	8.003	8.003	7.883		
20000	8.143	8.003	7.883			
3,500,000.00	5000	7.663	7.763	7.843	7.643	7.73
	6500	7.723	7.783	7.943		
	8000	7.643	7.723	7.783		
	10000	7.643	7.643	7.683	A	
	12000	7.703	7.663	7.643	7.943	
	15000	7.883	7.703	7.663		
20000	7.883	7.783	7.663			
5,000,000.00	5000	7.763	7.843	8.003	7.643	7.77
	6500	7.783	7.863	8.123		
	8000	7.723	7.863	8.023		
	10000	7.643	7.663	7.763	A	
	12000	7.643	7.663	7.763	8.123	
	15000	7.703	7.663	7.643		
20000	7.783	7.663	7.643			
10,000,000.00	5000	8.183	8.363	8.583	7.663	8.15
	6500	8.203	8.363	8.603		
	8000	8.103	8.283	8.443		
	10000	8.023	8.203	8.363	A	
	12000	7.923	8.003	8.263	8.603	
	15000	7.783	7.863	8.123		
20000	7.663	7.783	7.943			
15,000,000.00	5000	8.403	8.563	8.743	7.783	8.32
	6500	8.423	8.583	8.763		
	8000	8.283	8.463	8.663		
	10000	8.083	8.263	8.423	A	
	12000	8.083	8.183	8.423	8.763	
	15000	8.003	8.183	8.343		
20000	7.783	7.943	8.103			
20,000,000.00	5000	8.003	8.223	8.843	6.883	7.87
	6500	8.023	8.243	8.503		
	8000	7.923	8.143	8.423		
	10000	7.563	7.823	8.163	A	
	12000	7.403	7.663	8.043	8.843	
	15000	7.263	7.543	7.923		
20000	6.883	7.143	7.563			
30,000,000.00	5000	8.223	8.403	8.623	7.143	8.12
	6500	8.243	8.423	8.703		
	8000	8.143	8.343	8.643		
	10000	8.023	8.243	8.503	A	
	12000	7.663	7.923	8.243	8.703	
	15000	7.543	7.923	8.143		
20000	7.143	7.563	7.823			
40,000,000.00	5000	8.463	8.663	8.843	7.583	8.32
	6500	8.443	8.663	8.823		
	8000	8.343	8.503	8.763		
	10000	8.143	8.423	8.643	A	
	12000	7.803	8.143	8.423	8.843	
	15000	7.803	8.043	8.343		
20000	7.583	7.843	8.063			

Fuente: Elaboración propia

Figura. 17. Gráfico de comportamiento del factor daño del vehículo C3-S2 por la metodología AASHTO



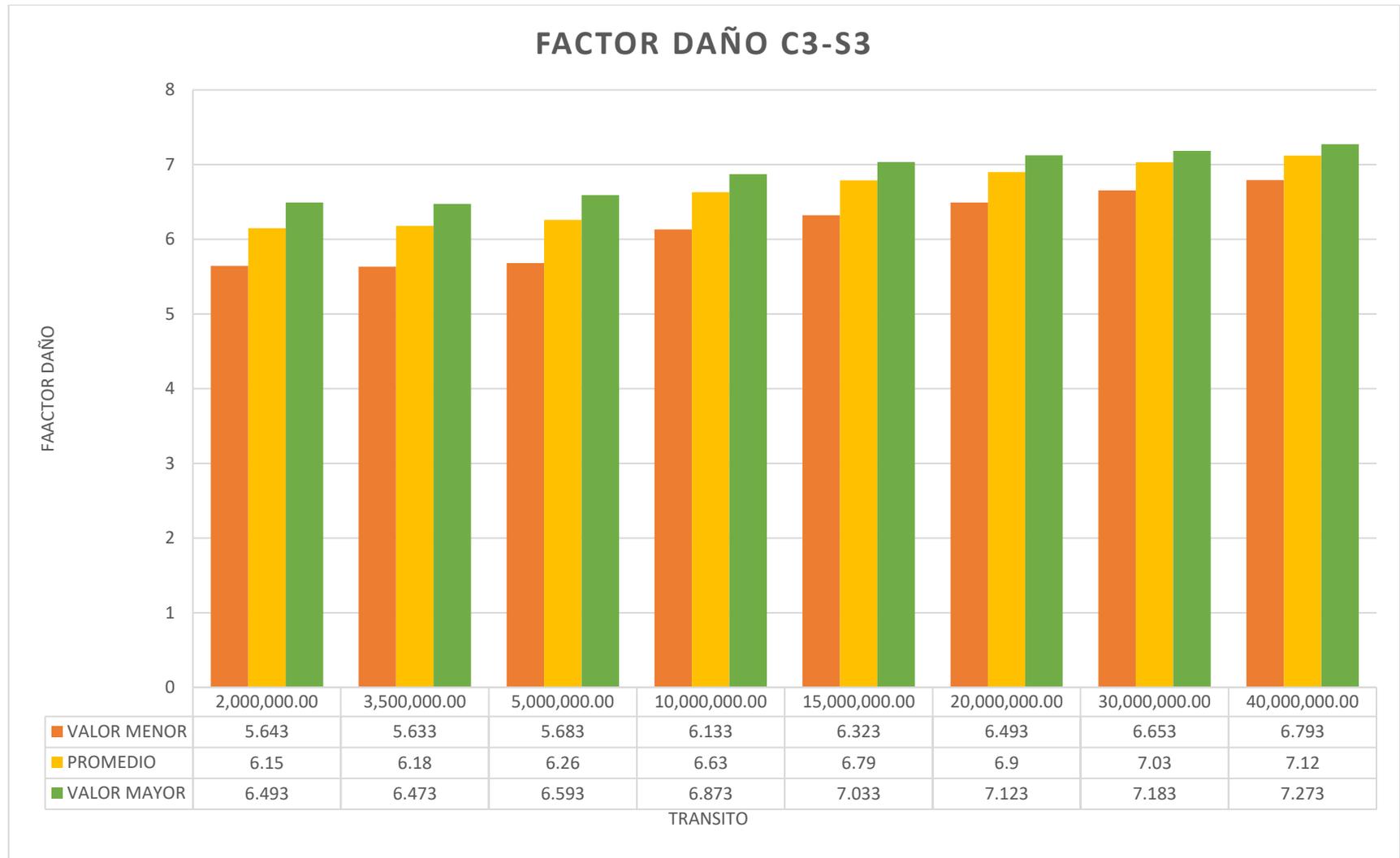
*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 43. Estimación del Factor Daño del vehículo C3-S3 por la metodología AASHTO

CAMION C3-S3						
TRANSITO	MODULO SUBRASANTE (psi)	FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO
2,000,000.00	5000	6.363	6.363	6.363	6.363	6.46
	6500	6.373	6.363	6.373		
	8000	6.373	6.363	6.363		
	10000	6.463	6.413	6.383	A	
	12000	6.553	6.473	6.423	6.733	
	15000	6.633	6.633	6.553		
20000	6.733	6.633	6.553			
3,500,000.00	5000	6.363	6.423	6.463	6.363	6.42
	6500	6.393	6.433	6.533		
	8000	6.363	6.393	6.423		
	10000	6.383	6.363	6.373	A	
	12000	6.423	6.383	6.363	6.553	
	15000	6.553	6.423	6.383		
20000	6.553	6.483	6.383			
5,000,000.00	5000	6.423	6.463	6.573	6.363	6.44
	6500	6.433	6.483	6.643		
	8000	6.393	6.483	6.593		
	10000	6.363	6.363	6.423	A	
	12000	6.363	6.363	6.423	6.643	
	15000	6.423	6.383	6.363		
20000	6.483	6.383	6.363			
10,000,000.00	5000	6.693	6.813	6.973	6.363	6.67
	6500	6.703	6.823	6.983		
	8000	6.633	6.753	6.873		
	10000	6.583	6.693	6.813	A	
	12000	6.523	6.573	6.753	6.983	
	15000	6.433	6.483	6.643		
20000	6.363	6.423	6.533			
15,000,000.00	5000	6.853	6.963	7.103	6.423	6.79
	6500	6.863	6.973	7.113		
	8000	6.763	6.883	7.033		
	10000	6.633	6.753	6.863	A	
	12000	6.633	6.693	6.863	7.113	
	15000	6.573	6.693	6.813		
20000	6.423	6.533	6.633			
20,000,000.00	5000	6.543	6.703	7.173	5.803	6.46
	6500	6.563	6.723	6.913		
	8000	6.493	6.643	6.853		
	10000	6.233	6.423	6.663	A	
	12000	6.133	6.313	6.573	7.173	
	15000	6.043	6.223	6.493		
20000	5.803	5.973	6.243			
30,000,000.00	5000	6.703	6.843	7.003	5.973	6.63
	6500	6.723	6.853	7.063		
	8000	6.643	6.783	7.023		
	10000	6.553	6.713	6.903	A	
	12000	6.313	6.493	6.723	7.063	
	15000	6.223	6.493	6.643		
20000	5.973	6.243	6.423			
40,000,000.00	5000	6.883	7.043	7.153	6.253	6.78
	6500	6.863	7.023	7.153		
	8000	6.783	6.913	7.103		
	10000	6.633	6.843	7.013	A	
	12000	6.403	6.643	6.853	7.153	
	15000	6.403	6.573	6.793		
20000	6.253	6.433	6.583			

Fuente: Elaboración propia

Figura. 18. Gráfico de comportamiento del factor daño del vehículo C3-S3 por la metodología AASHTO



Fuente: Elaboración propia

## 8 CALCULO DE FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA POR EJE Y FACTOR DAÑO VEHICULAR SEGÚN MÉTODO DE LA ELASTICA DE LA DEFORMADA

### 8.1 Descripción del procedimiento general planteado para determinar el factor daño utilizando las curvas elásticas de deformación.

Partiendo de que el método mecanicista, permite evaluar la acción de cualquier configuración de eje sobre una estructura de pavimento, se decidió utilizar este método para determinar en forma general la acción de las diferentes cargas de los vehículos de carga convencionales sobre los diferentes modelos estructurales obtenidos en el análisis de sensibilización de las diferentes variables de diseño.

A continuación, se resumen los pasos seguidos en el análisis de los efectos de los vehículos de carga:

- Determinar para cada vehículo la magnitud de la carga total en condición cargada y la correspondiente distribución de las cargas en cada tipo de eje que hacen parte de la configuración del vehículo y establecer según el tipo de semieje la magnitud de la carga que gravita en cada una de las ruedas. (Tabla 44)

*Tabla 44. Configuración vehicular y distribución de cargas por llanta*

<b>Configuración vehicular y distribución de cargas por llanta</b>				
Número de eje	1	2	3	4
Tipo de eje	Simple RS	Simple RD	Tandem RD	Tridem RD
Carga por eje (kN)				
Número de ruedas del semieje				
Carga por rueda (kN)				

*Fuente: Elaboración propia*

Para la realización de esta etapa del estudio se consideran los mismos vehículos típicos de carga presentados en la Tabla 37 del capítulo 7, donde están consignados para cada vehículo las magnitudes de carga total y la respectiva distribución de las magnitudes de carga por eje.

- Determinar para cada tipo de eje las coordenadas superficiales de la distribución transversal y longitudinal de los centros de las áreas de contacto de cada rueda, la magnitud de la carga por rueda, la presión de contacto y el radio del área de contacto. (Tabla 45)

Tabla 45. Coordenadas y parámetros de las cargas por rueda para cada eje

Coordenadas y parámetros de las cargas por rueda para cada eje						
Tipo de eje	Número de ruedas	Coordenadas superficiales de los centros de las áreas de contacto de las ruedas		Magnitud de carga por rueda. (kN)	Presión de contacto (KPa)	Radio de carga de área de contacto. (m)
		X	Y			

Fuente: Elaboración propia

- Establecer en forma similar, para la carga estándar de 80 kN u 8.2 t, las coordenadas superficiales de las cargas por llanta, su magnitud, presión de contacto y radio de área de carga.

Tabla 46. Coordenadas y parámetros de las cargas por rueda del eje equivalente

Coordenadas y parámetros de las cargas por rueda del eje equivalente						
Tipo de eje	Número de ruedas	Coordenadas superficiales de los centros de las áreas de contacto de las ruedas		Magnitud de carga por rueda. (kN)	Presión de contacto (KPa)	Radio de carga de área de contacto. (m)
		X (m)	Y (m)			
Estandar	1	0	0	20	552	10.8
	2	0	32.4	20	552	10.8

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de establecer las configuraciones típicas de los diferentes tipos de ejes para establecer las presiones de inflado y las coordenadas superficiales de la distribución de las llantas de cada eje se consideran las siguientes recomendaciones establecidas en las metodologías de diseño mecánico empírico.()

Tabla 47. Característica de los diferentes tipos de ejes analizados.

Tipo de eje	Número de llantas en semieje	Presión de contacto KPa	Espaciamiento transversal cm	Espaciamiento longitudinal cm
Simple Rueda Simple	1	758.4	-	-
Simple Rueda Doble	2	551.6	30	-
Tandem Rueda Doble	4	827.4	30	130
Tridem Rueda Doble	6	827.4	30	125
Estandar	2	551.6	32.4	-

Fuente: Elaboración propia

- Determinar para cada estructura típica de pavimento, los espesores y características dinámicas (valores de módulos y relaciones de Poisson) de cada una de las capas del modelo estructural. El modelo estructural puede ser alimentado con información particular de la vía o puede obtenerse del catálogo de estructuras propuesto para este estudio en función de los niveles de tránsito y resistencia de la subrasante y que se encuentran consignados en el numeral 6.3.4 del capítulo 6 en las tablas: Tabla 34, Tabla 35, Tabla 36. (Tabla 48)

Tabla 48. Información del modelo estructural

Información del modelo estructural				
Número de capa	Tipo de capa	Espesor (m)	Módulo (MPa)	Relación de Poisson

Fuente: Elaboración propia

- Establecer según el tipo de eje y el modelo estructural, las coordenadas tridimensionales, de todos los puntos de evaluación de esfuerzos y deformaciones, que permitan obtener los valores de los parámetros en los sitios críticos dentro de la estructura y de la subrasante,

para evaluar la acción de la carga de los diferentes ejes de cada vehículo y del eje equivalente de 80kN (Tabla 49)

Tabla 49. Puntos críticos para el análisis estructural

Puntos críticos para el análisis estructural				
Tipo de eje	Punto de control	Coordenadas tridimensionales para el análisis estructural		
		X (m)	Y (m)	Z (m)

Fuente: Elaboración propia

- Calcular los valores de los esfuerzos y deformaciones ocasionados por la acción de las diferentes cargas por eje de cada vehículo y por el eje equivalente cuando solicitan a cada modelo estructural, con la ayuda del software elástico multicapa OPENPAVE y con un programa específico desarrollado dentro de este estudio, estableciendo la magnitud de las respuestas estructurales para el control de la fisuración tipo piel de cocodrilo en la capa asfáltica y el ahuellamiento de la subrasante y complementar el análisis estructural obteniendo las curvas elásticas de las deformaciones ocasionadas por la acción de cada eje.

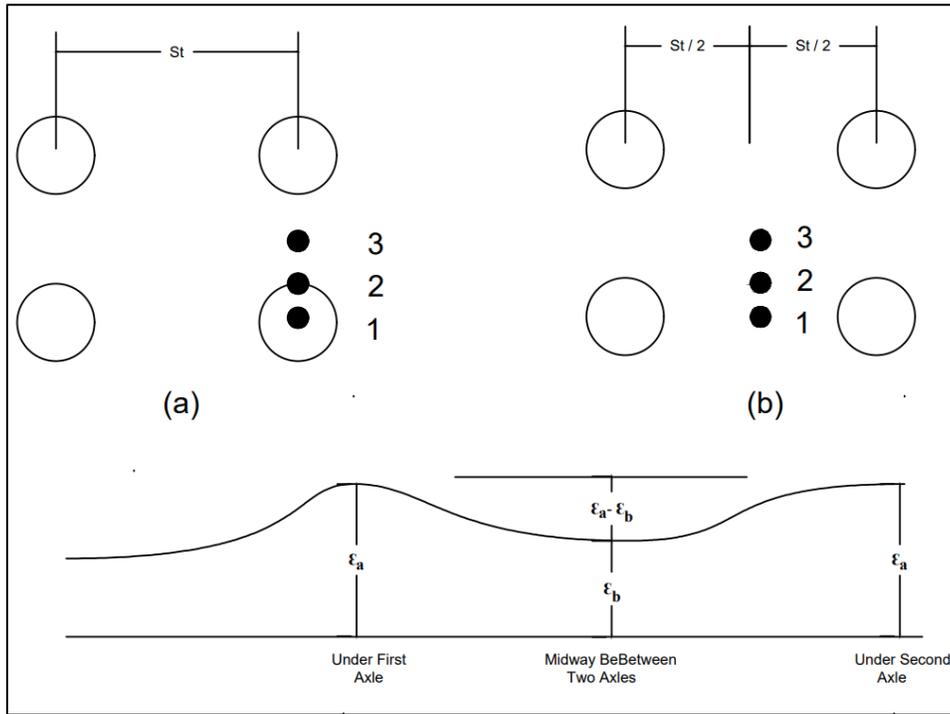
Tabla 50. Resultados de la evaluación estructural para cada eje

Resultados de la evaluación estructural para cada eje							
Tipo de Eje	Punto de control	Coordenadas para el análisis estructural			Capa de Rodadura	Subrasante	
		X (m)	Y (m)	Z (m)	Deformación unitaria de tracción	Deformación unitaria de compresión	Esfuerzo vertical de compresión (KPa)

Fuente: Elaboración propia

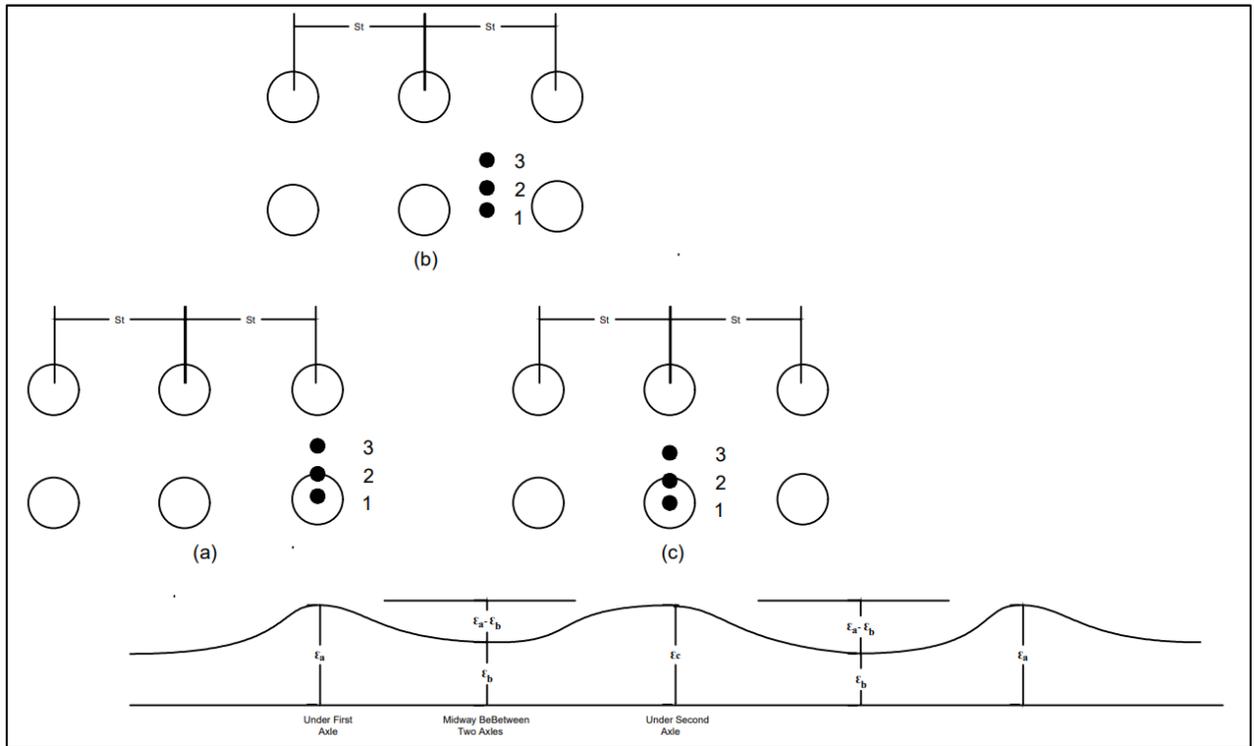
- Con el fin de poder evaluar la acción de los ejes con múltiples líneas de carga (tándem, tridem, etc), se utilizó como referencia el procedimiento recomendado por Yang Huang (en el año 2004 para analizar el efecto de este tipo de ejes múltiples utilizando las curvas elásticas de deformación originadas longitudinalmente por cada eje, calculando inicialmente en diferentes posiciones transversales del semieje el valor de la deformación máxima ocasionada bajo la acción del paso de la primera línea de carga (deformación primaria  $\epsilon_a$ ) y posteriormente según la curva elástica de deformación, calcular la deformación que se origina en la mitad del espaciamiento longitudinal entre dos líneas de carga consecutivas del semieje ( $\epsilon_b$ ). Para evaluar el efecto de la primera línea de carga se utiliza el valor de la deformación primaria  $\epsilon_a$  y para evaluar el efecto de la segunda o tercera línea de carga según la curva elástica de deformación se determina la deformación secundaria ( $\epsilon_a - \epsilon_b$ ) la cual corresponde a la diferencia entre la deformación primaria ( $\epsilon_a$ ) y la deformación que se origina en el espaciamiento longitudinal intermedio entre dos líneas de carga consecutivas del semieje ( $\epsilon_b$ ), tal como se muestra en las siguientes figuras (Figura. 19, Figura. 20), extraídas del libro de referencia para los ejes tándem y tridem. (Huang, Y. H., 2004)

Figura. 19 Ilustración de los puntos de análisis para evaluar los ejes tándem. (Tomada del libro de Yang Huang)



Fuente: Tomada del libro de Yang Huang

Figura. 20. Ilustración de los puntos de análisis para evaluar los ejes tridem. (Tomada del libro de Yang Huang)



Fuente: Tomada del libro de Yang Huang

- Determinar utilizando los valores críticos calculados de deformaciones de tracción de la capa asfáltica y de compresión de la subrasante, los valores admisibles de repeticiones de cada magnitud de carga por eje y del eje estándar equivalente, según los modelos de fatiga o de comportamiento del Instituto del asfalto.

Modelo de agrietamiento de capa asfáltica propuesto por Instituto del Asfalto (Asphalt Institute,1991).

$$N_f = (0.00432 * K_1 * C) * \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^{K_2} * \left( \frac{1}{E_{CA}} \right)^{K_3} \quad \text{Ecuación 64}$$

$$C = 10^M \quad M = 4.84 \left( \frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.6875 \right) \quad \text{Ecuación 65}$$

Modelo de ahuellamiento total, recomendado por el método del Instituto del (Asphalt Institute,1991):

$$N_z = (1.365 * 10^{-9}) * (\epsilon_z)^{-4.477} \quad \text{Ecuación 66}$$

- Calcular los valores de factores de equivalencia de carga para cada criterio de análisis, relacionando el número admisible de repeticiones de carga del eje estándar y el correspondiente número de repeticiones de cada una de los ejes de los diferentes vehículos.

$$FEC = \frac{\text{Número de repeticiones del eje equivalente}}{\text{Número de repeticiones del eje analizado}} \quad \text{Ecuación 67}$$

- Acumular finalmente el efecto de los factores de equivalencia de carga por eje y determinar el factor daño de cada vehículo.

$$FACTOR\ DAÑO = \sum_{i=1}^n FEC_i \quad \text{Ecuación 68}$$

Para evaluar la acción de los ejes múltiples sobre la capa asfálticas se utilizó la hipótesis de Minner (41) con el fin de acumular el efecto de las diferentes líneas de carga en cada tipo de eje, para lo cual se determinó bajo la acción de cada línea de carga, la máxima deformación por tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica, analizando diferentes posiciones transversales y se determinó el número de repeticiones admisibles y el consumo unitario correspondiente. Esta información se relacionó con el número admisible de repeticiones y el consumo unitario ocasionado por el eje de referencia de 80kN, permitiendo así evaluar el efecto de cada línea y acumular en forma aislada la acción de todas las líneas que hacen parte del eje analizado.

La expresión general de Minner utilizada para acumular el daño resultante de las diferentes líneas de ejes dentro de un mismo grupo de ejes, está dada por la siguiente expresión. (MDOT 2009, -Tjan y Fung 2005)

$$\frac{n_1}{N_{1f}} + \frac{n_2}{N_{2f}} + \frac{n_3}{N_{3f}} + \frac{n_4}{N_{4f}} + \dots + \frac{n_m}{N_{mf}} \leq 1 \quad \text{Ecuación 69}$$

- Utilizando las leyes de fatiga o de modelos de comportamiento seleccionadas en el estudio, para controlar el agrietamiento de la capa de rodadura y el ahuellamiento de la subrasante, determinar por cada criterio los consumos unitarios de cada eje y los factores de equivalencia de carga por eje, comparando el número de repeticiones admisibles del eje estándar y el correspondiente número de repeticiones de cada uno de los ejes de los diferentes vehículos.
- Acumular finalmente el efecto de los factores de equivalencia de carga por eje y determinar el factor daño de cada vehículo.

Teniendo en cuenta que existen grandes diferencias en las configuraciones y magnitudes de carga de los vehículos de carga, para facilitar el análisis de la información de cada vehículo, se presenta a continuación los resultados de los análisis realizados.

## **8.2 Resultados del análisis de los factores daño de los vehículos convencionales de carga utilizando las curvas elásticas de deformación.**

Los resultados de los consumos unitarios y los factores daño obtenidos del análisis estructural de estos vehículos sobre las diferentes estructuras analizadas se presentan sintetizados en las siguientes tablas y figuras que se detallan a continuación:

Tabla 51. Ubicación de tablas y figuras correspondientes a consumos unitarios y factores daño obtenidos del análisis estructural de los vehículos

VEHICULO	ANALISIS POR TRACCION EN LA CAPA ASFALTICA	ANALISIS POR COMPRESION EN LA SUBRASANTE
	FACTOR DAÑO	FACTOR DAÑO
C2 Pequeño	Tabla 52 Figura. 21	Tabla 52 Figura. 22
C2 Grande	Tabla 53 Figura. 23Figura. 24	Tabla 53 Figura. 24
C3	Tabla 54 Figura. 25	Tabla 54 Figura. 26
C3-S2	Tabla 55 Figura. 27	Tabla 55 Figura. 28
C3-S3	Tabla 56 Figura. 29	Tabla 56 Figura. 30

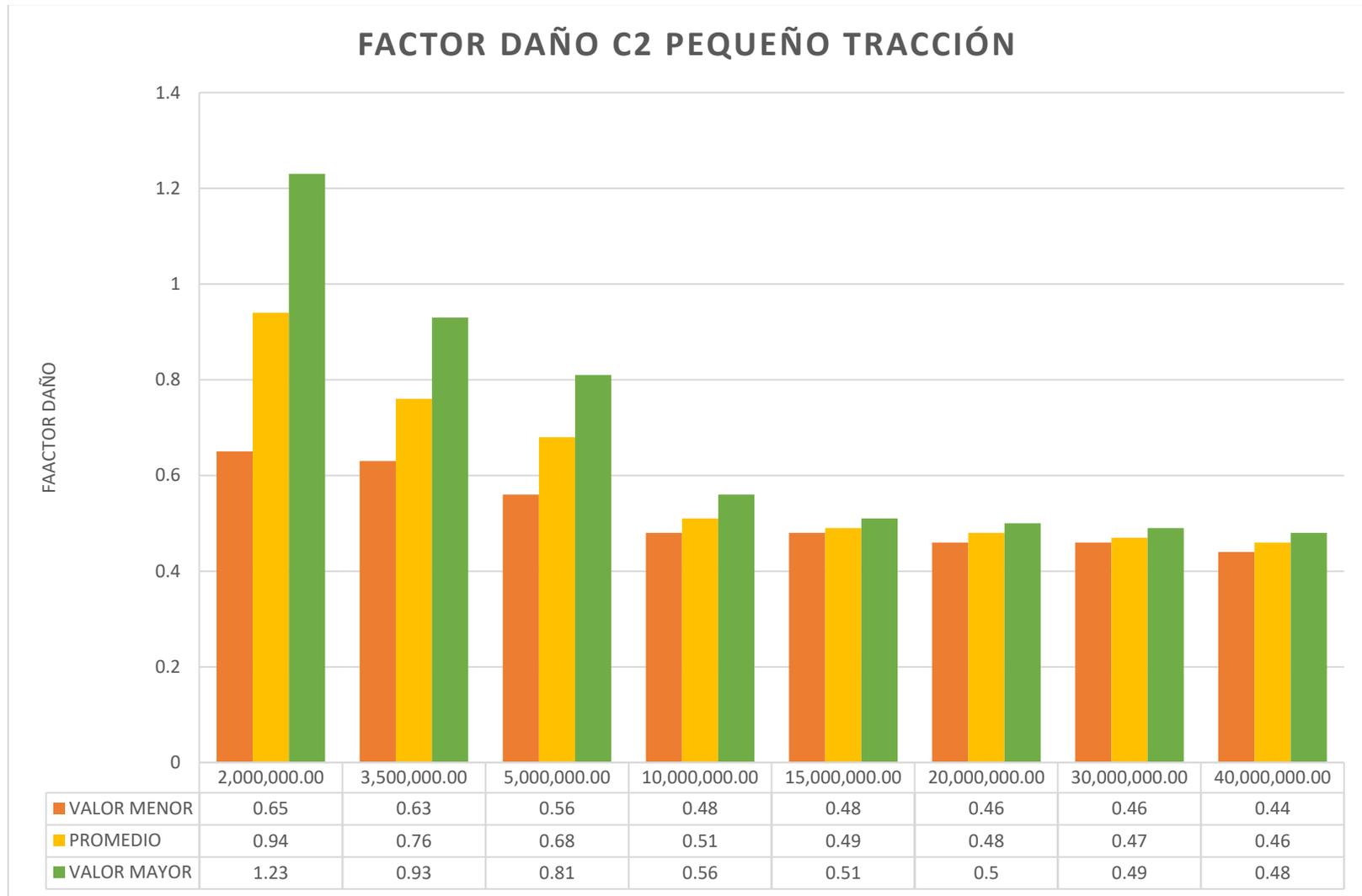
Fuente: Elaboración propia

Tabla 52. Factor daño del análisis por tracción en la carpeta asfáltica y por compresión en la subrasante del camión C2 pequeño

CAMION C2 PEQUEÑO											
TRANSITO	MODULO SUBRASANTE (psi)	FACTOR DAÑO A TRACCION					FACTOR DAÑO A COMPRESION				
		FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO	FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO
2,000,000.00	5000	0.79	0.65	0.66	0.65	0.94	0.29	0.29	0.29	0.27	0.28
	6500	0.78	0.73	0.73			0.27	0.27	0.27		
	8000	0.82	0.84	0.87			0.28	0.28	0.28		
	10000	0.94	0.97	1.01	A		0.28	0.28	0.28		
	12000	0.96	0.99	1.03	1.23		0.28	0.28	0.28		
	15000	0.98	1.17	1.2			0.28	0.3	0.3		
20000	1.18	1.21	1.23	0.29		0.29	0.29				
3,500,000.00	5000	0.67	0.63	0.64	0.63	0.76	0.29	0.29	0.29	0.27	0.28
	6500	0.69	0.7	0.69			0.28	0.28	0.28		
	8000	0.77	0.72	0.74			0.28	0.28	0.28		
	10000	0.75	0.71	0.73	A		0.28	0.28	0.28		
	12000	0.77	0.79	0.73	0.93		0.27	0.27	0.27		
	15000	0.87	0.81	0.81			0.28	0.28	0.28		
20000	0.9	0.93	0.85	0.28		0.28	0.28				
5,000,000.00	5000	0.59	0.59	0.56	0.56	0.68	0.29	0.29	0.29	0.27	0.28
	6500	0.64	0.64	0.57			0.28	0.28	0.28		
	8000	0.71	0.66	0.63			0.28	0.28	0.28		
	10000	0.72	0.73	0.68	A		0.28	0.28	0.28		
	12000	0.74	0.74	0.7	0.81		0.27	0.27	0.27		
	15000	0.72	0.73	0.68			0.28	0.28	0.28		
20000	0.81	0.75	0.77	0.28		0.28	0.28				
10,000,000.00	5000	0.49	0.48	0.48	0.48	0.51	0.28	0.28	0.28	0.27	0.28
	6500	0.5	0.49	0.48			0.28	0.28	0.28		
	8000	0.5	0.49	0.49			0.28	0.28	0.28		
	10000	0.53	0.51	0.51	A		0.28	0.28	0.28		
	12000	0.53	0.52	0.51	0.56		0.27	0.27	0.28		
	15000	0.53	0.52	0.51			0.28	0.28	0.28		
20000	0.56	0.53	0.52	0.27		0.27	0.27				
15,000,000.00	5000	0.48	0.48	0.48	0.48	0.49	0.28	0.28	0.27	0.27	0.28
	6500	0.49	0.49	0.48			0.27	0.27	0.27		
	8000	0.49	0.49	0.48			0.28	0.28	0.28		
	10000	0.49	0.49	0.49	A		0.28	0.28	0.28		
	12000	0.5	0.5	0.49	0.51		0.28	0.28	0.28		
	15000	0.51	0.51	0.51			0.28	0.28	0.28		
20000	0.51	0.5	0.51	0.27		0.27	0.27				
20,000,000.00	5000	0.47	0.46	0.46	0.46	0.48	0.27	0.27	0.27	0.27	0.28
	6500	0.48	0.48	0.48			0.27	0.27	0.27		
	8000	0.49	0.49	0.48			0.28	0.28	0.28		
	10000	0.49	0.48	0.48	A		0.28	0.27	0.28		
	12000	0.49	0.49	0.48	0.5		0.28	0.28	0.28		
	15000	0.5	0.49	0.49			0.28	0.28	0.28		
20000	0.5	0.49	0.49	0.27		0.27	0.27				
30,000,000.00	5000	0.46	0.46	0.46	0.46	0.47	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27
	6500	0.47	0.46	0.46			0.26	0.27	0.26		
	8000	0.48	0.48	0.46			0.27	0.27	0.27		
	10000	0.48	0.48	0.47	A		0.28	0.28	0.28		
	12000	0.48	0.48	0.47	0.49		0.28	0.28	0.28		
	15000	0.49	0.48	0.48			0.28	0.28	0.28		
20000	0.49	0.48	0.48	0.27		0.27	0.27				
40,000,000.00	5000	0.46	0.45	0.44	0.44	0.46	0.25	0.25	0.25	0.25	0.27
	6500	0.46	0.46	0.46			0.26	0.26	0.26		
	8000	0.46	0.46	0.46			0.27	0.27	0.27		
	10000	0.48	0.46	0.46	A		0.28	0.28	0.28		
	12000	0.48	0.46	0.46	0.48		0.28	0.28	0.28		
	15000	0.48	0.48	0.46			0.28	0.28	0.28		
20000	0.47	0.47	0.46	0.28		0.28	0.27				

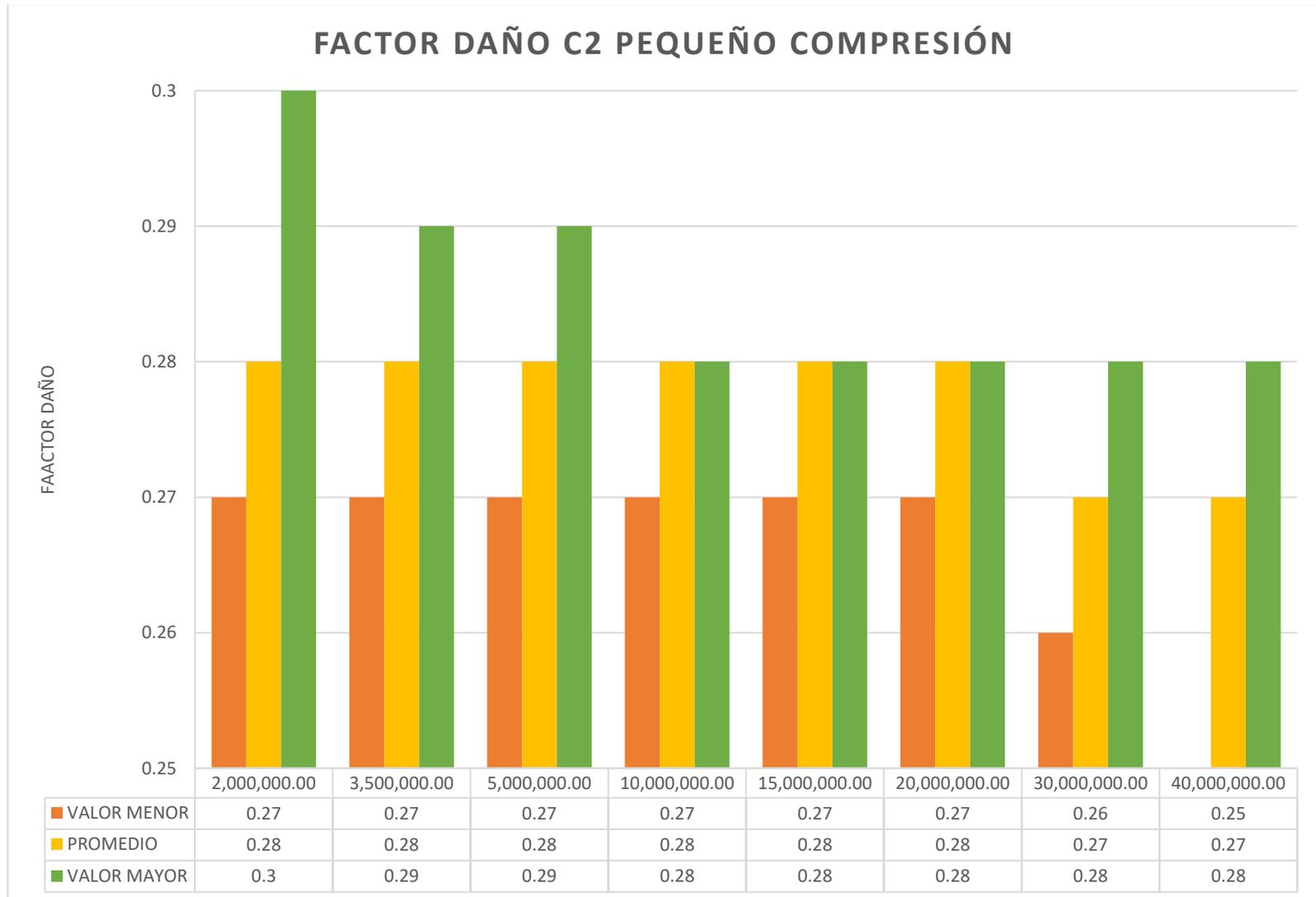
Fuente: Elaboración propia

Figura. 21 Gráfico de comportamiento del factor daño a tracción del vehículo C2- Pequeño por la metodología de la elástica de la deformada



*Fuente: Elaboración propia*

Figura. 22. Gráfico de comportamiento del factor daño a Compresión del vehículo C2- Pequeño por la metodología de la elástica de la deformada



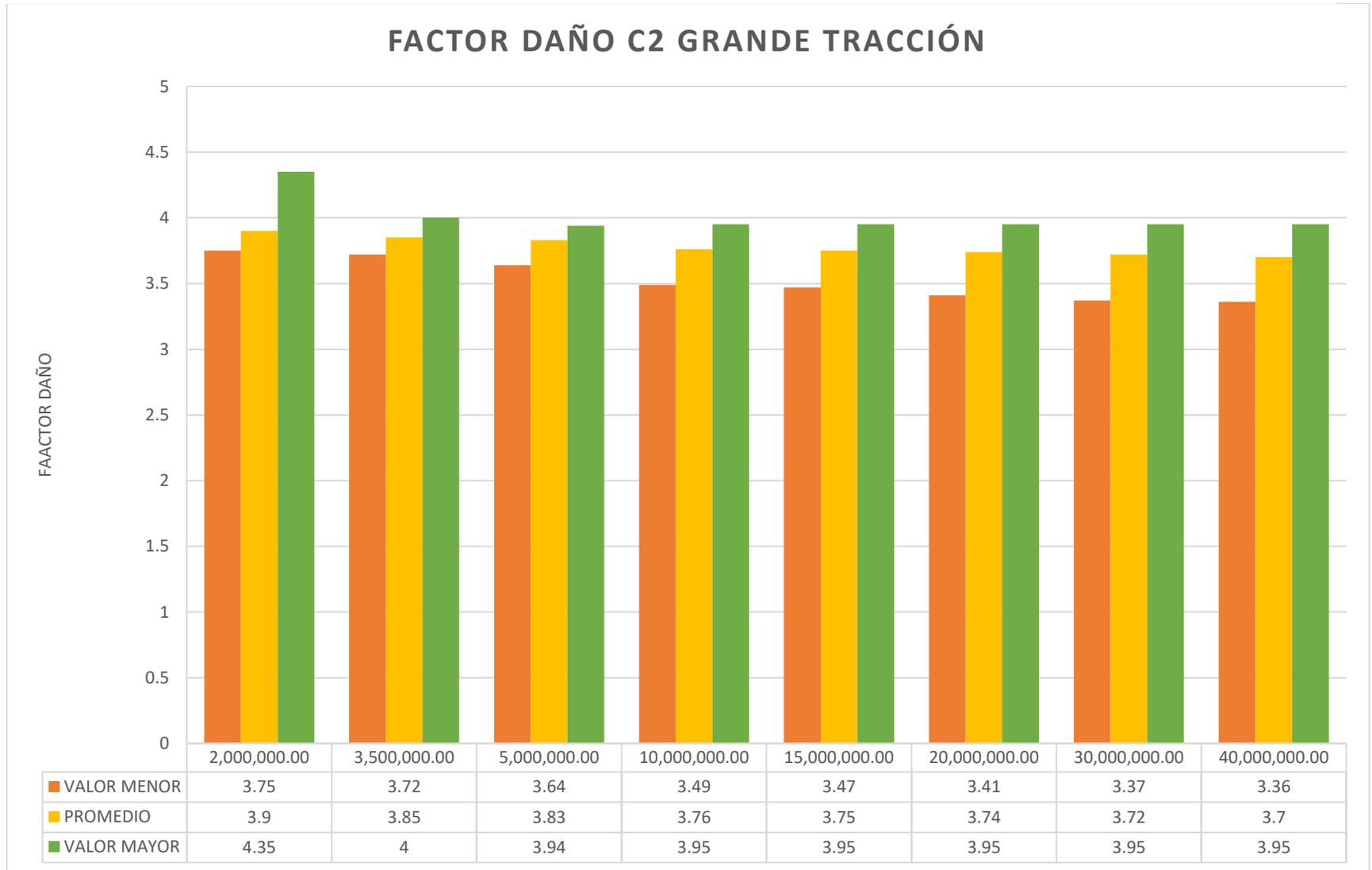
*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 53. Factor daño del análisis por Compresión en la carpeta asfáltica y por compresión en la subrasante del camión C2 Grande

CAMION C2 GRANDE											
TRANSITO	MODULO SUBRASANTE (psi)	FACTOR DAÑO A TRACCION					FACTOR DAÑO A COMPRESIÓN				
		FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO	FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO
2,000,000.00	5000	3.83	3.95	3.95	3.75	3.9	4.31	4.32	4.33	4.12	4.34
	6500	3.82	3.81	3.75			4.19	4.18	4.12		
	8000	3.86	3.86	3.86			4.25	4.26	4.26		
	10000	4.01	3.84	3.84	A		4.29	4.29	4.3	A	
	12000	4.03	3.81	3.81	4.35		4.31	4.31	4.32	4.55	
	15000	4.07	3.89	3.89			4.48	4.54	4.55		
20000	4.35	3.84	3.84	4.51		4.51	4.53				
3,500,000.00	5000	3.72	3.94	3.94	3.72	3.85	4.29	4.29	4.3	4.15	4.3
	6500	3.76	3.8	3.88			4.15	4.15	4.24		
	8000	3.84	3.87	3.87			4.26	4.25	4.26		
	10000	3.84	3.84	3.84	A		4.25	4.25	4.26	A	
	12000	3.85	3.81	3.81	4		4.26	4.27	4.27	4.44	
	15000	3.95	3.88	3.83			4.44	4.42	4.38		
20000	4	3.84	3.84	4.41		4.43	4.42				
5,000,000.00	5000	3.64	3.94	3.94	3.64	3.83	4.29	4.28	4.28	4.14	4.27
	6500	3.71	3.8	3.8			4.14	4.14	4.14		
	8000	3.8	3.86	3.86			4.22	4.21	4.22		
	10000	3.8	3.83	3.83	A		4.23	4.24	4.24	A	
	12000	3.83	3.81	3.81	3.94		4.22	4.22	4.22	4.39	
	15000	3.82	3.88	3.88			4.38	4.39	4.39		
20000	3.91	3.83	3.84	4.38		4.36	4.39				
10,000,000.00	5000	3.49	3.95	3.95	3.49	3.76	4.27	4.27	4.27	4.11	4.21
	6500	3.52	3.8	3.81			4.11	4.12	4.13		
	8000	3.55	3.87	3.87			4.2	4.21	4.21		
	10000	3.6	3.83	3.83	A		4.17	4.17	4.18	A	
	12000	3.61	3.8	3.81	3.95		4.17	4.17	4.18	4.28	
	15000	3.61	3.86	3.88			4.27	4.26	4.28		
20000	3.67	3.82	3.83	4.27		4.26	4.28				
15,000,000.00	5000	3.47	3.95	3.95	3.47	3.75	4.26	4.26	4.26	4.12	4.2
	6500	3.52	3.81	3.81			4.12	4.12	4.12		
	8000	3.52	3.86	3.86			4.18	4.18	4.18		
	10000	3.53	3.83	3.83	A		4.18	4.18	4.18	A	
	12000	3.54	3.81	3.81	3.95		4.16	4.17	4.17	4.26	
	15000	3.6	3.88	3.88			4.25	4.25	4.25		
20000	3.59	3.83	3.83	4.25		4.26	4.26				
20,000,000.00	5000	3.41	3.95	3.95	3.41	3.74	4.26	4.26	4.26	4.11	4.19
	6500	3.46	3.81	3.81			4.11	4.11	4.11		
	8000	3.51	3.86	3.86			4.17	4.17	4.17		
	10000	3.5	3.83	3.83	A		4.16	4.16	4.16	A	
	12000	3.51	3.81	3.81	3.95		4.15	4.16	4.16	4.26	
	15000	3.56	3.88	3.88			4.24	4.24	4.24		
20000	3.57	3.83	3.83	4.24		4.25	4.25				
30,000,000.00	5000	3.37	3.95	3.95	3.37	3.72	4.25	4.25	4.26	4.1	4.18
	6500	3.4	3.8	3.81			4.11	4.1	4.11		
	8000	3.44	3.86	3.86			4.17	4.17	4.17		
	10000	3.45	3.83	3.83	A		4.14	4.15	4.15	A	
	12000	3.45	3.81	3.81	3.95		4.15	4.15	4.15	4.26	
	15000	3.49	3.88	3.88			4.23	4.23	4.24		
20000	3.5	3.83	3.83	4.23		4.22	4.23				
40,000,000.00	5000	3.36	3.95	3.95	3.36	3.7	4.25	4.25	4.25	4.09	4.17
	6500	3.37	3.8	3.8			4.09	4.09	4.09		
	8000	3.39	3.86	3.86			4.16	4.16	4.16		
	10000	3.43	3.83	3.83	A		4.14	4.14	4.14	A	
	12000	3.42	3.81	3.81	3.95		4.14	4.14	4.14	4.25	
	15000	3.44	3.87	3.88			4.22	4.22	4.23		
20000	3.44	3.83	3.83	4.19		4.19	4.22				

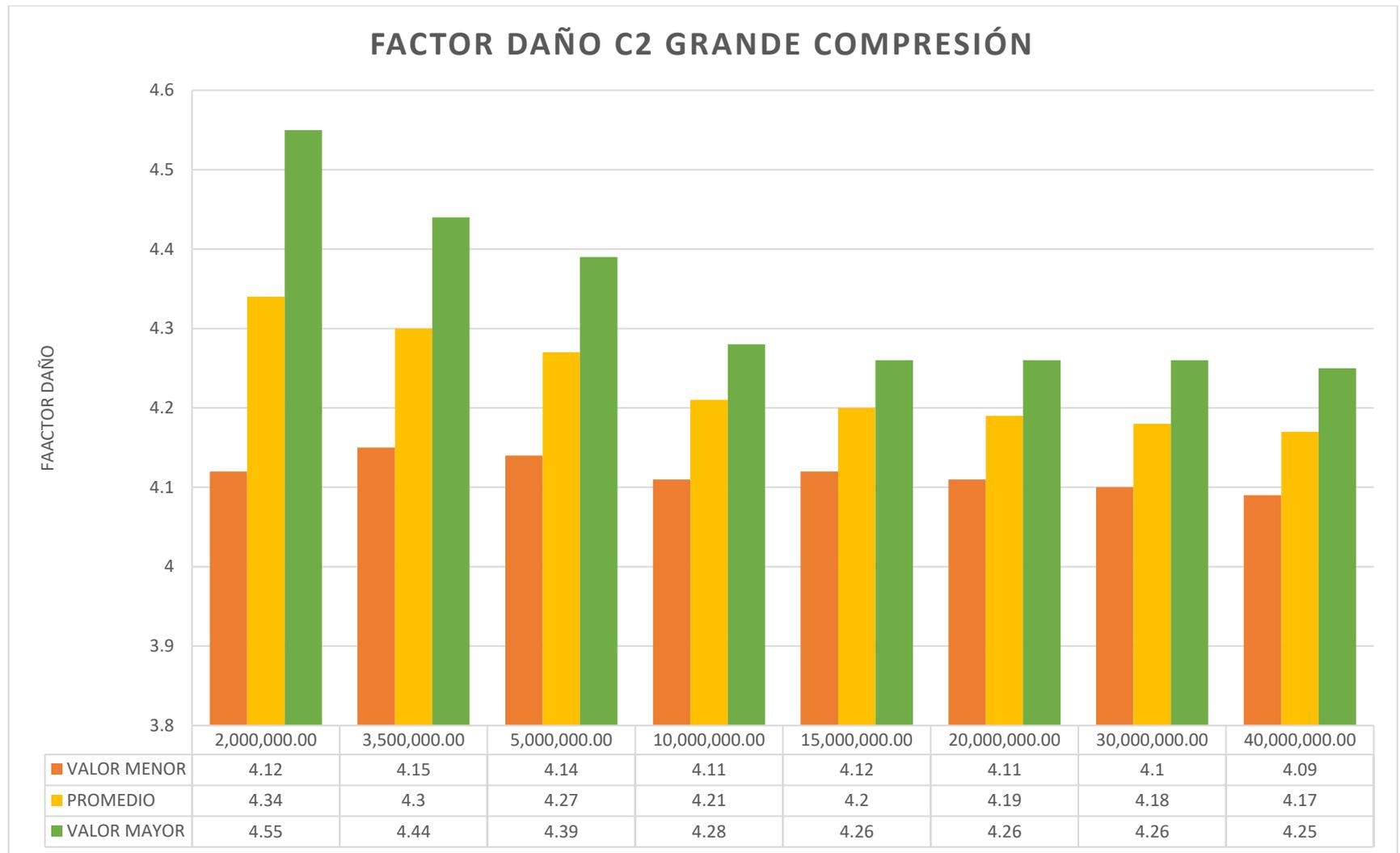
Fuente: Elaboración propia

Figura. 23. Gráfico de comportamiento del factor daño a tracción del vehículo C2- Grande por la metodología de la elástica de la deformada



Fuente: Elaboración propia

Figura. 24. Gráfico de comportamiento del factor daño a Compresión del vehículo C2- Grande por la metodología de la elástica de la deformada



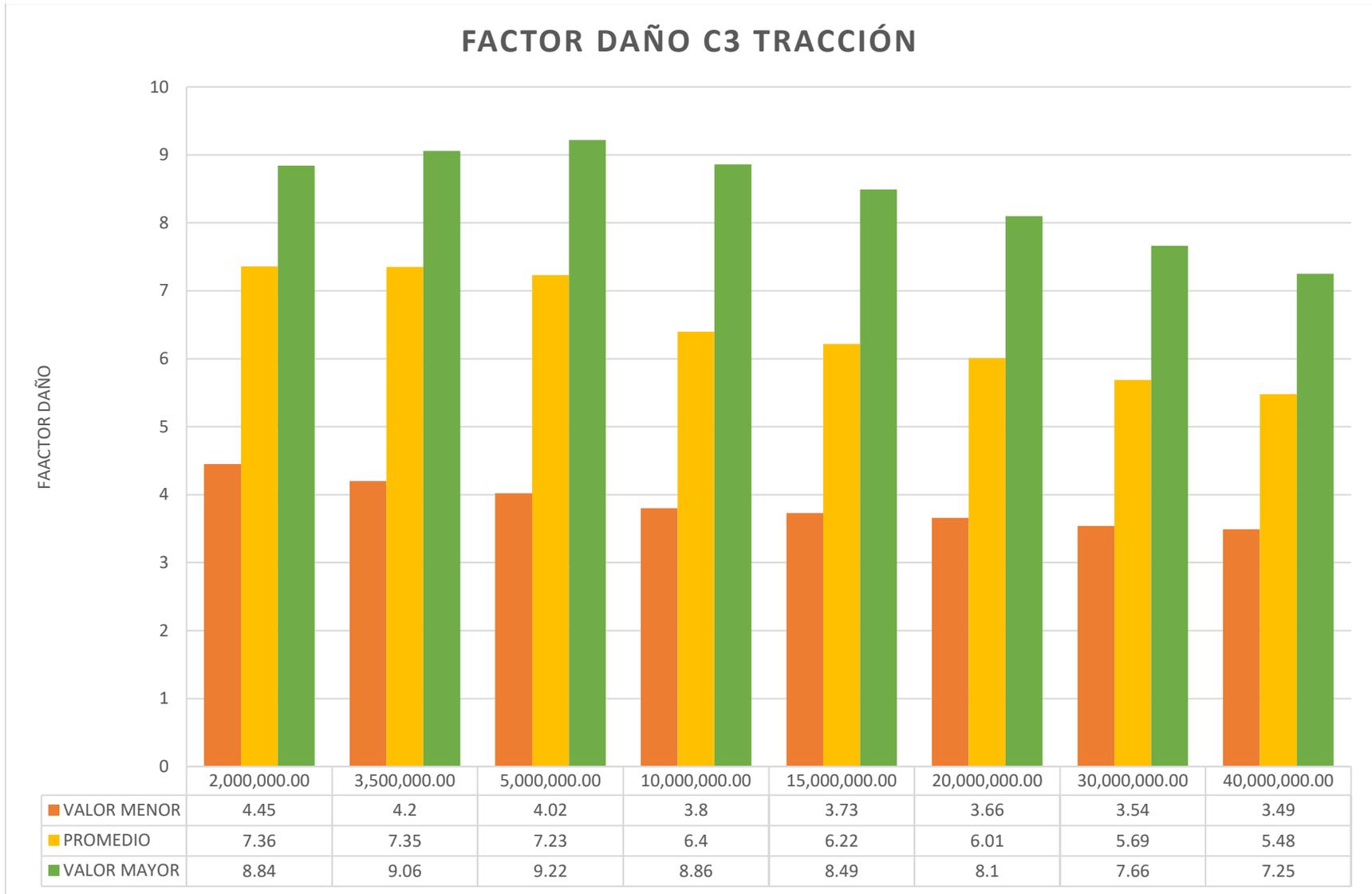
*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 54.. Factor daño del análisis por tracción en la carpeta asfáltica y por compresión en la subrasante del camión C3

CAMION C3											
TRANSITO	MODULO SUBRASANTE (psi)	FACTOR DAÑO A TRACCION				FACTOR DAÑO A COMPRESION					
		FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO	FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO
2,000,000.00	5000	4.52	8.3	8.5	4.45	7.36	4.84	4.74	4.69	4.3	5.16
	6500	4.45	8.68	8.6			4.34	4.36	4.3		
	8000	4.57	8.83	8.84			4.37	4.4	4.41		
	10000	4.89	8.8	8.79	A		4.57	4.58	4.63	A	
	12000	4.93	8.77	8.75	8.84		4.93	4.96	5.03	7.01	
	15000	5	8.6	8.39			5.83	6.3	6.36		
20000	5.61	8.53	8.3	7.01		6.82	6.87				
3,500,000.00	5000	4.2	8.14	8.37	4.2	7.35	5.1	5.2	5.1	4.28	4.88
	6500	4.28	8.56	8.86			4.7	4.66	4.79		
	8000	4.5	8.65	8.75			4.45	4.48	4.47		
	10000	4.44	8.85	8.92	A		4.29	4.28	4.32	A	
	12000	4.47	8.92	8.92	9.06		4.43	4.5	4.47	5.94	
	15000	4.77	9.03	8.82			5.39	5.15	5.24		
20000	4.91	9.01	9.06	5.83		5.94	5.74				
5,000,000.00	5000	4.02	7.92	8	4.02	7.23	5.5	5.37	5.38	4.27	4.82
	6500	4.16	8.41	8.3			4.83	4.77	4.93		
	8000	4.36	8.61	8.65			4.64	4.7	4.74		
	10000	4.37	8.72	8.74	A		4.3	4.33	4.34	A	
	12000	4.43	8.84	8.87	9.22		4.27	4.29	4.31	5.5	
	15000	4.36	9.05	9.02			4.74	4.87	4.84		
20000	4.67	9.22	9.15	5.4		5.2	5.42				
10,000,000.00	5000	4	6.29	6.33	3.8	6.4	6.83	6.72	6.76	4.2	5.09
	6500	3.87	6.96	6.96			5.84	5.8	5.87		
	8000	3.85	7.17	7.4			5.34	5.31	5.22		
	10000	3.87	7.75	7.93	A		4.86	4.85	4.81	A	
	12000	3.85	8.11	8.08	8.86		4.45	4.36	4.44	6.83	
	15000	3.8	8.35	8.31			4.23	4.2	4.26		
20000	3.91	8.74	8.86	4.22		4.24	4.33				
15,000,000.00	5000	4.07	6.3	6.4	3.73	6.22	7.58	7.43	7.44	4.12	5.41
	6500	3.94	6.96	7.02			6.51	6.43	6.47		
	8000	3.84	7.02	7.07			5.87	5.79	5.84		
	10000	3.78	7.12	7.38	A		4.92	4.88	4.8	A	
	12000	3.75	7.69	7.66	8.49		4.7	4.56	4.61	7.58	
	15000	3.79	8.05	8.22			4.45	4.45	4.42		
20000	3.73	8.35	8.49	4.12		4.16	4.21				
20,000,000.00	5000	4.18	5.84	5.98	3.66	6.01	8.23	7.99	7.92	4.13	5.75
	6500	3.96	6.46	6.57			7.04	6.89	6.86		
	8000	3.89	7	7.09			6.5	6.4	6.41		
	10000	3.77	6.99	7.06	A		5.38	5.31	5.33	A	
	12000	3.72	7.19	7.23	8.1		4.84	4.79	4.81	8.23	
	15000	3.73	7.8	7.82			4.55	4.53	4.57		
20000	3.66	8.1	8.08	4.13		4.16	4.2				
30,000,000.00	5000	4.37	5.43	5.61	3.54	5.69	8.88	8.56	8.41	4.21	6.18
	6500	4.03	5.98	5.99			7.61	7.36	7.5		
	8000	3.88	6.52	6.47			7.03	6.85	6.99		
	10000	3.79	6.74	6.89	A		6.14	6	5.96	A	
	12000	3.69	6.7	6.81	7.66		5.18	5.06	5.04	8.88	
	15000	3.64	7.07	7.39			4.83	4.88	4.77		
20000	3.54	7.35	7.66	4.21		4.24	4.22				
40,000,000.00	5000	4.43	5.18	5.4	3.49	5.48	9.88	9.81	9.56	4.31	6.66
	6500	4.05	5.68	5.9			8.41	8.39	8.22		
	8000	3.95	6.08	6.1			7.56	7.3	7.39		
	10000	3.8	6.3	6.49	A		6.37	6.38	6.29	A	
	12000	3.69	6.25	6.42	7.25		5.34	5.37	5.29	9.88	
	15000	3.61	6.82	6.98			5.14	5	4.98		
20000	3.49	7.2	7.25	4.5		4.42	4.31				

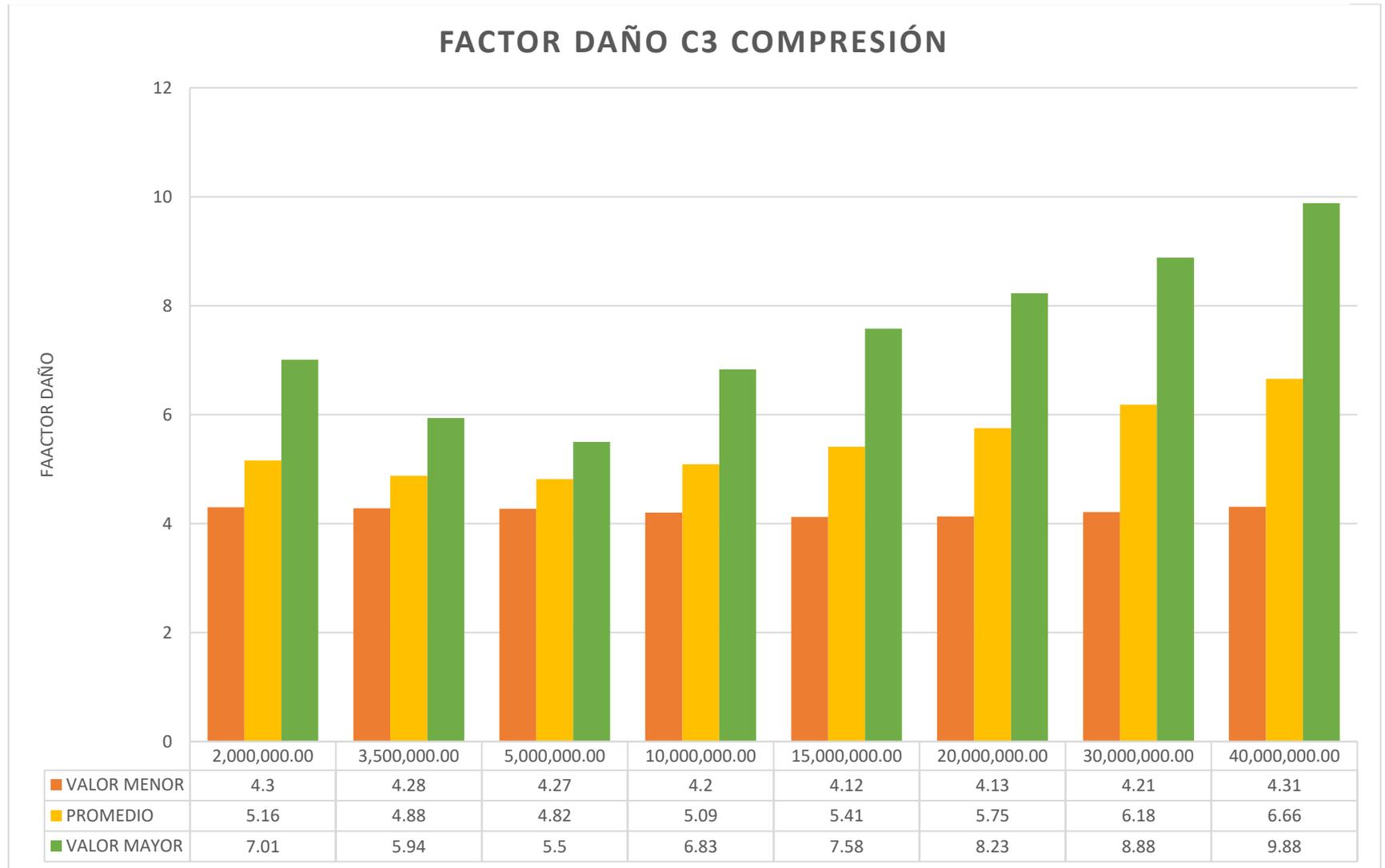
Fuente: Elaboración propia

Figura. 25. Gráfico de comportamiento del factor daño a tracción del vehículo C3 por la metodología de la elástica de la deformada



Fuente: Elaboración propia

Figura. 26. Gráfico de comportamiento del factor daño a Compresión del vehículo C3 por la metodología de la elástica de la deformada



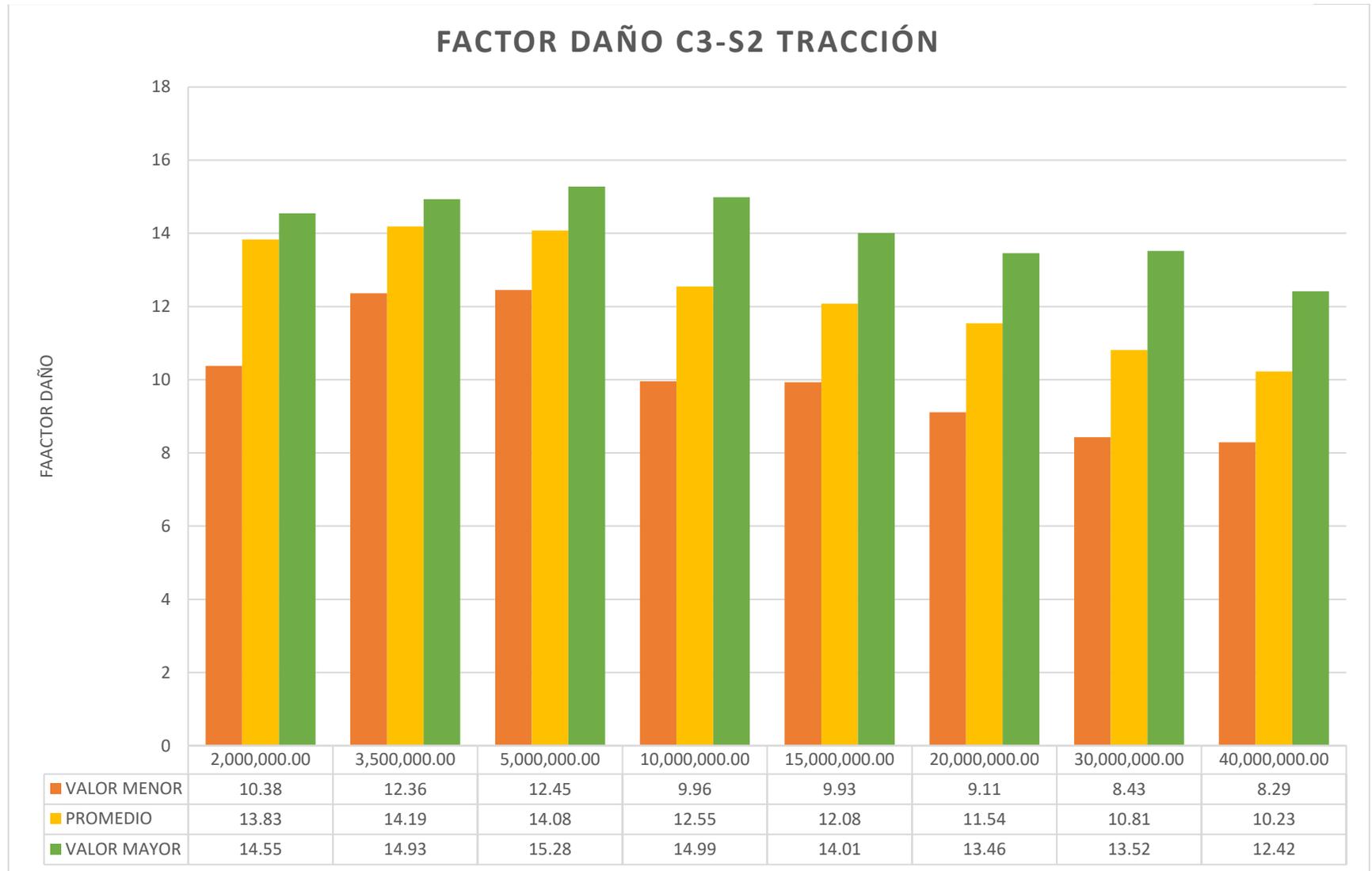
Fuente: Elaboración propia

Tabla 55. Factor daño del análisis por tracción en la carpeta asfáltica y por compresión en la subrasante del camión C3-S2

CAMION C3-S2											
TRANSITO	MODULO SUBRASANTE (psi)	FACTOR DAÑO A TRACCION					FACTOR DAÑO A COMPRESIÓN				
		FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO	FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO
2,000,000.00	5000	13.76	13.55	10.38	10.38	13.83	7.57	7.39	7.3	6.69	8.01
	6500	14.13	14.11	13.98			6.76	6.79	6.69		
	8000	14.26	14.55	14.27			6.81	6.82	6.86		
	10000	14.14	14.51	14.09	7.09		7.11	7.2	A		
	12000	14.14	14.31	13.99	14.55		7.66	7.7	7.81	10.69	
	15000	14.2	14.23	13.27			9.05	9.79	9.86		
20000	13.58	13.95	13.09	10.67		10.61	10.69				
3,500,000.00	5000	13.29	12.36	13.66	12.36	14.19	8.01	8.15	8	6.65	7.6
	6500	13.72	13.8	14.44			7.35	7.29	7.48		
	8000	14.04	14.27	14.18			6.93	6.98	6.97		
	10000	14.43	13.99	14.49	A		6.65	6.65	6.72	A	
	12000	14.49	14.47	14.5	14.93		6.87	6.98	6.92	9.23	
	15000	14.55	14.86	14.25			8.35	8	8.13		
20000	14.62	14.93	14.63	9.07		9.23	8.92				
5,000,000.00	5000	12.45	13.15	13.08	12.45	14.08	8.64	8.42	8.46	6.63	7.51
	6500	13.42	13.41	13.58			7.58	7.46	7.7		
	8000	14	14.27	14.1			7.26	7.35	7.4		
	10000	14.07	13.99	14.21	A		6.68	6.71	6.75	A	
	12000	14.32	14.56	14.4	15.28		6.63	6.67	6.69	8.64	
	15000	14.7	14.18	14.71			7.34	7.55	7.51		
20000	14.94	15.28	14.85	8.38		8.07	8.41				
10,000,000.00	5000	9.96	14.99	10.37	9.96	12.55	10.78	10.6	10.66	6.54	7.97
	6500	11.11	10.54	11.44			9.19	9.12	9.24		
	8000	11.47	11.62	12.15			8.37	8.34	8.18		
	10000	12.51	12.1	13.03	A		7.6	7.58	7.53	A	
	12000	12.82	12.71	13.3	14.99		6.94	6.81	6.93	10.78	
	15000	13.26	13.29	13.68			6.55	6.54	6.62		
20000	14.37	14.17	14.58	6.54		6.56	6.71				
15,000,000.00	5000	9.93	13.97	10.5	9.93	12.08	11.99	11.75	11.77	6.4	8.49
	6500	11.08	10.57	11.53			10.27	10.13	10.21		
	8000	11.2	11.31	11.61			9.24	9.12	9.18		
	10000	11.41	11.55	12.13	A		7.71	7.63	7.51	A	
	12000	11.92	11.93	12.6	14.01		7.35	7.12	7.2	11.99	
	15000	13.02	12.95	13.55			6.95	6.95	6.89		
20000	13.56	13.27	14.01	6.4		6.45	6.53				
20,000,000.00	5000	9.11	13.46	9.81	9.11	11.54	13.03	12.65	12.53	6.39	9.04
	6500	10.14	9.69	10.81			11.12	10.88	10.84		
	8000	11.13	10.79	11.67			10.25	10.09	10.11		
	10000	11.14	11.29	11.61	A		8.45	8.33	8.37	A	
	12000	11.45	11.58	11.92	13.46		7.58	7.51	7.53	13.03	
	15000	12.56	12.01	12.88			7.12	7.06	7.14		
20000	13.11	12.85	13.36	6.39		6.44	6.5				
30,000,000.00	5000	8.43	13.52	9.19	8.43	10.81	14.08	13.56	13.33	6.54	9.72
	6500	9.36	8.91	9.81			12.04	11.64	11.86		
	8000	10.26	9.97	10.66			11.09	10.81	11.05		
	10000	10.61	10.8	11.33	A		9.67	9.44	9.38	A	
	12000	10.59	10.84	11.22	13.52		8.12	7.94	7.9	14.08	
	15000	11.65	11.23	12.2			7.53	7.63	7.44		
20000	12.16	11.61	12.64	6.54		6.59	6.58				
40,000,000.00	5000	8.29	12.42	8.83	8.29	10.23	15.68	15.58	15.18	6.71	10.51
	6500	9.14	8.43	9.71			13.33	13.29	13.03		
	8000	9.47	9.34	10.04			11.96	11.54	11.68		
	10000	10.21	10.03	10.7	A		10.05	10.07	9.91	A	
	12000	10.18	10.11	10.58	12.42		8.39	8.41	8.31	15.68	
	15000	10.78	10.36	11.51			8.06	7.83	7.79		
20000	11.38	11.31	11.97	7.04		6.9	6.71				

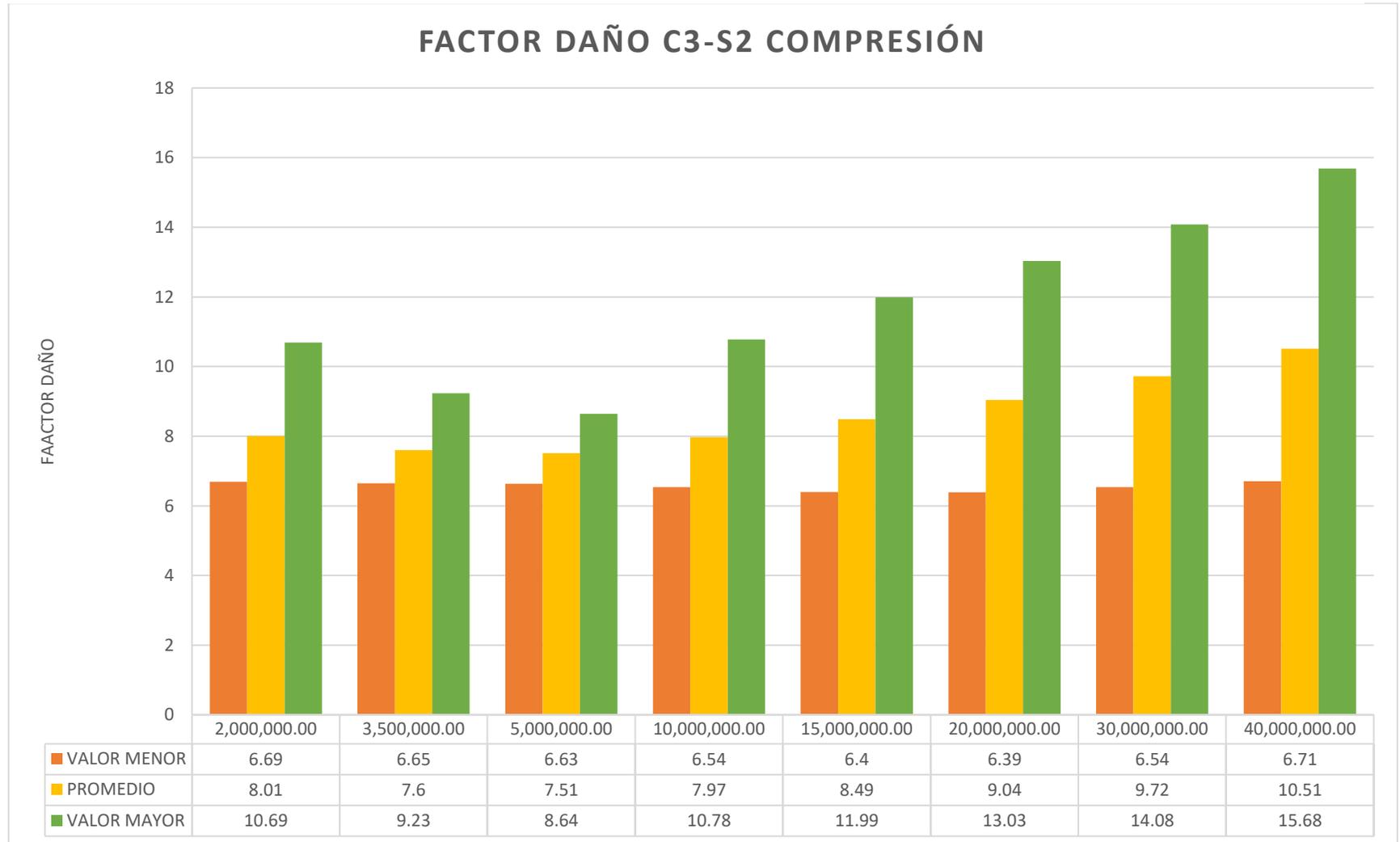
Fuente: Elaboración propia

Figura. 27. Gráfico de comportamiento del factor daño a tracción del vehículo C3-S2 por la metodología de la elástica de la deformada



*Fuente: Elaboración propia*

Figura. 28. Gráfico de comportamiento del factor daño a Compresión del vehículo C3-S2 por la metodología de la elástica de la deformada



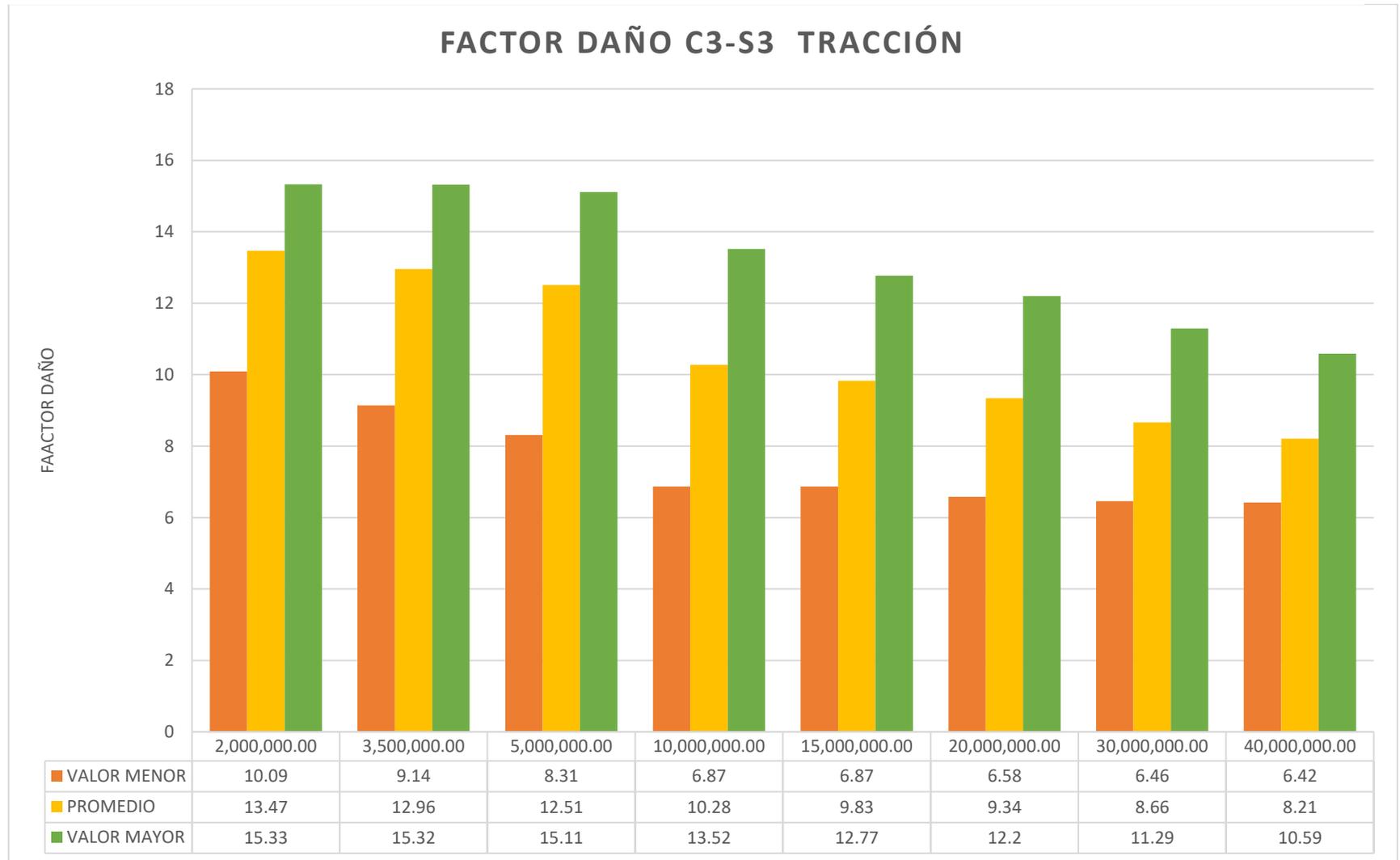
*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 56. Factor daño del análisis por tracción en la carpeta asfáltica y por compresión en la subrasante del camión C3-S3

CAMION C3-S3											
TRANSITO	MODULO SUBRASANTE (psi)	FACTOR DAÑO A TRACCION				PROMEDIO	FACTOR DAÑO A COMPRESION				
		FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES		FACTOR DAÑO T=15	FACTOR DAÑO T=20	FACTOR DAÑO T=25	RANGO DE FACTORES	PROMEDIO
2,000,000.00	5000	10.09	13.27	13.61	10.09	13.47	5.87	5.74	5.68	5.23	6.46
	6500	10.16	14.2	14.1			5.27	5.29	5.23		
	8000	10.45	14.79	14.87			5.32	5.35	5.38		
	10000	11.12	15.12	15.21	A		5.63	5.67	5.74	A	
	12000	11.2	15.13	15.19	15.33		6.17	6.23	6.32	9.11	
	15000	11.39	15.33	15.1			7.45	8.14	8.22		
20000	12.28	15.28	15	9.11		8.9	8.97				
3,500,000.00	5000	9.14	12.9	13.29	9.14	12.96	6.18	6.3	6.18	5.22	6.04
	6500	9.49	13.86	14.16			5.71	5.66	5.81		
	8000	10.1	14.06	14.24			5.39	5.44	5.42		
	10000	10.18	14.37	14.5	A		5.24	5.22	5.28	A	
	12000	10.28	14.77	14.54	15.32		5.47	5.58	5.51	7.63	
	15000	10.94	14.99	14.68			6.84	6.5	6.62		
20000	11.21	15.32	15.15	7.48		7.63	7.35				
5,000,000.00	5000	8.31	12.38	12.38	8.31	12.51	6.67	6.51	6.53	5.2	5.92
	6500	9.05	13.41	12.91			5.85	5.77	5.97		
	8000	9.75	13.81	13.68			5.63	5.7	5.75		
	10000	9.8	14.21	14.03	A		5.23	5.28	5.29	A	
	12000	10.02	14.46	14.29	15.11		5.2	5.24	5.26	6.88	
	15000	10.08	14.78	14.5			5.9	6.09	6.05		
20000	10.78	15.11	15.02	6.86		6.58	6.88				
10,000,000.00	5000	6.87	9.21	9.16	6.87	10.28	8.34	8.2	8.26	5.1	6.19
	6500	7.27	10.37	10.23			7.1	7.05	7.14		
	8000	7.42	10.73	10.99			6.47	6.43	6.32		
	10000	7.95	11.77	11.94	A		5.88	5.87	5.82	A	
	12000	8.06	12.46	12.17	13.52		5.39	5.27	5.37	8.34	
	15000	8.17	12.84	12.55			5.12	5.1	5.17		
20000	8.82	13.48	13.52	5.19		5.21	5.32				
15,000,000.00	5000	6.87	9.17	9.23	6.87	9.83	9.31	9.13	9.14	5.02	6.59
	6500	7.25	10.3	10.27			7.95	7.85	7.91		
	8000	7.23	10.41	10.37			7.13	7.04	7.1		
	10000	7.27	10.62	10.93	A		5.95	5.9	5.8	A	
	12000	7.44	11.6	11.38	12.77		5.68	5.52	5.59	9.31	
	15000	7.98	12.18	12.34			5.39	5.39	5.35		
20000	8.12	12.66	12.77	5.02		5.09	5.15				
20,000,000.00	5000	6.58	8.35	8.51	6.58	9.34	10.16	9.85	9.77	5.03	7.02
	6500	6.81	9.4	9.49			8.63	8.44	8.41		
	8000	7.18	10.32	10.37			7.94	7.81	7.83		
	10000	7.09	10.34	10.32	A		6.52	6.43	6.46	A	
	12000	7.17	10.67	10.62	12.2		5.85	5.79	5.81	10.16	
	15000	7.66	11.71	11.59			5.51	5.49	5.54		
20000	7.79	12.2	12.02	5.03		5.06	5.12				
30,000,000.00	5000	6.46	7.63	7.88	6.46	8.66	11.02	10.6	10.41	5.1	7.55
	6500	6.52	8.56	8.5			9.36	9.05	9.23		
	8000	6.74	9.47	9.31			8.6	8.38	8.57		
	10000	6.79	9.84	9.99	A		7.47	7.3	7.25	A	
	12000	6.72	9.81	9.9	11.29		6.27	6.12	6.1	11.02	
	15000	7.12	10.39	10.85			5.84	5.9	5.76		
20000	7.2	10.88	11.29	5.1		5.14	5.13				
40,000,000.00	5000	6.43	7.2	7.51	6.42	8.21	12.36	12.27	11.95	5.22	8.18
	6500	6.42	8.04	8.35			10.41	10.4	10.18		
	8000	6.45	8.71	8.67			9.29	8.96	9.08		
	10000	6.62	9.08	9.33	A		7.76	7.78	7.67	A	
	12000	6.52	9.04	9.25	10.59		6.47	6.5	6.41	12.36	
	15000	6.67	9.98	10.16			6.22	6.05	6.02		
20000	6.8	10.59	10.59	5.45		5.35	5.22				

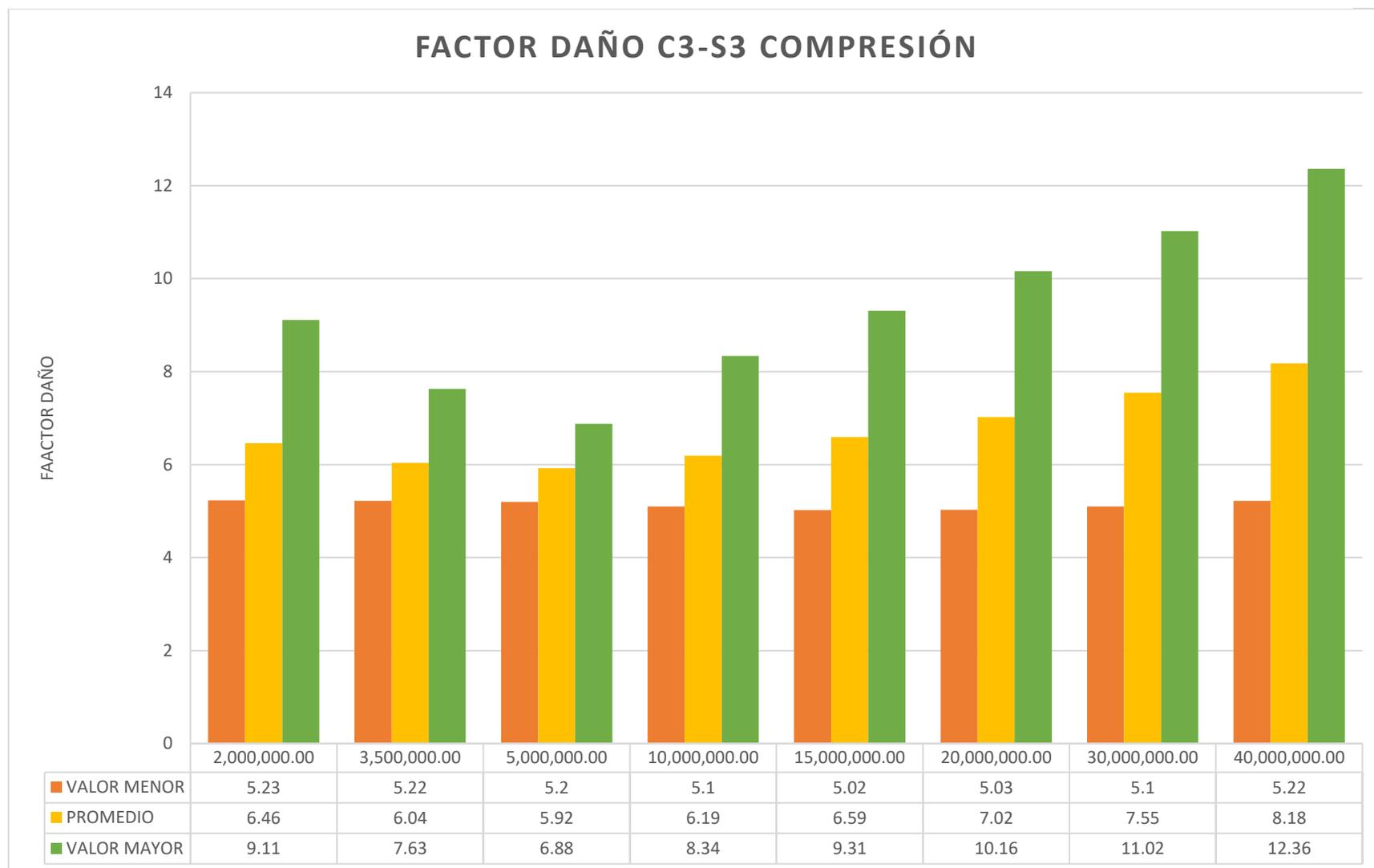
Fuente: Elaboración propia

Figura. 29. Gráfico de comportamiento del factor daño a tracción del vehículo C3-S3 por la metodología de la elástica de la deformada



Fuente: Elaboración propia

Figura. 30. Gráfico de comportamiento del factor daño a Compresión del vehículo C3-S3 por la metodología de la elástica de la deformada



*Fuente: Elaboración propia*

## 9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 9.1 Comparación de factores de equivalencia de carga y factor daño según el método de la cuarta potencia utilizando diferentes estudios.

Tomando como referencia el método de la cuarta potencia y los criterios de tres estudios internacionales como el TRL, AUSTRROADS y de MTC del Perú, se presenta una comparación de los factores de equivalencia de carga y factor daño con los valores recomendados en el Manual de INVIAS de 1998 y con los valores recomendados por el método del Instituto del Asfalto que utiliza criterios particulares de AASHTO relacionados con número estructural de 5 y serviciabilidad final de 2.5.

Inicialmente se realiza una comparación de factores de equivalencia de carga para diferentes magnitudes de carga en cada tipo de eje, análisis que se presenta sintetizado en las siguientes tablas: Tabla 57, Tabla 58 ,

Tabla 59, . y se muestran gráficamente estos resultados en las siguientes figuras: Figura. 31, Figura. 32, Figura. 33.

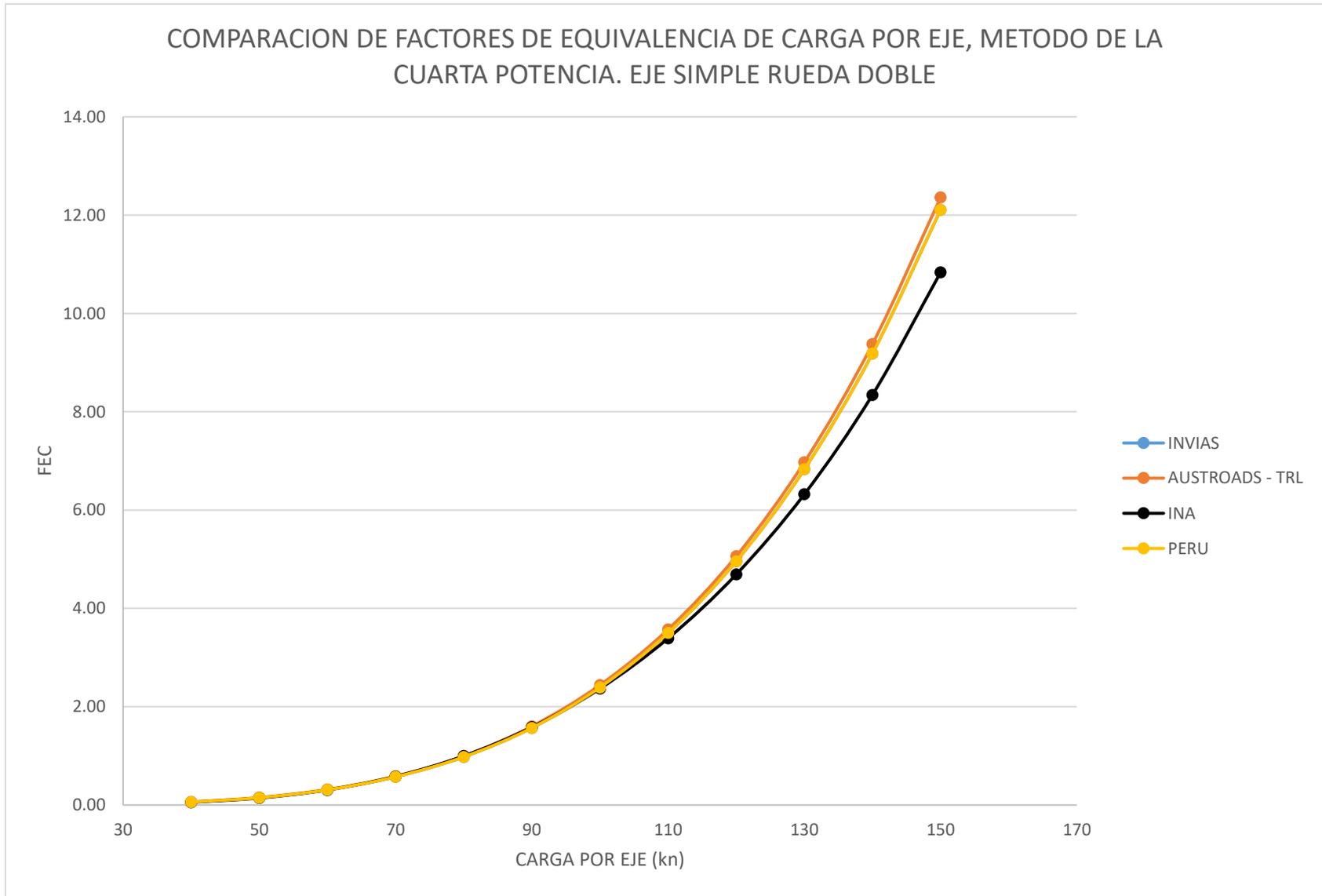
Según la Tabla 57 y la Figura. 31, donde se presenta el resultado de la sensibilización de las cargas por eje del eje simple rueda doble, se puede establecer que los factores de equivalencia de carga para este eje son similares en los diferentes criterios evaluados, porque manejan carga de referencia similar de 80 kN, y al compararlos con la recomendación del método INA, este criterio después de la carga de 100 kN proporciona valores ligeramente inferiores.

Tabla 57. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Simple Rueda Doble

COMPARACION DE FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA POR EJE, METODO DE LA CUARTA POTENCIA. EJE SIMPLE RUEDA DOBLE					
CARGA		METODO INVIAS	AUSTROADS-TRL	INA AASHTO	MANUAL PERUANO
Kn	Lb				
40	8992	0.06	0.06	0.06	0.06
50	11241	0.15	0.15	0.14	0.15
60	13489	0.31	0.32	0.31	0.31
70	15737	0.57	0.59	0.58	0.57
80	17985	0.98	1.00	1.00	0.98
90	20233	1.57	1.60	1.58	1.57
100	22481	2.39	2.44	2.37	2.39
110	24729	3.50	3.57	3.39	3.50
120	26977	4.96	5.06	4.69	4.96
130	29225	6.83	6.97	6.32	6.83
140	31473	9.19	9.38	8.34	9.19
150	33722	12.11	12.36	10.84	12.11

Fuente: Elaboración propia

Figura. 31. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Simple Rueda Doble



Fuente: Elaboración propia

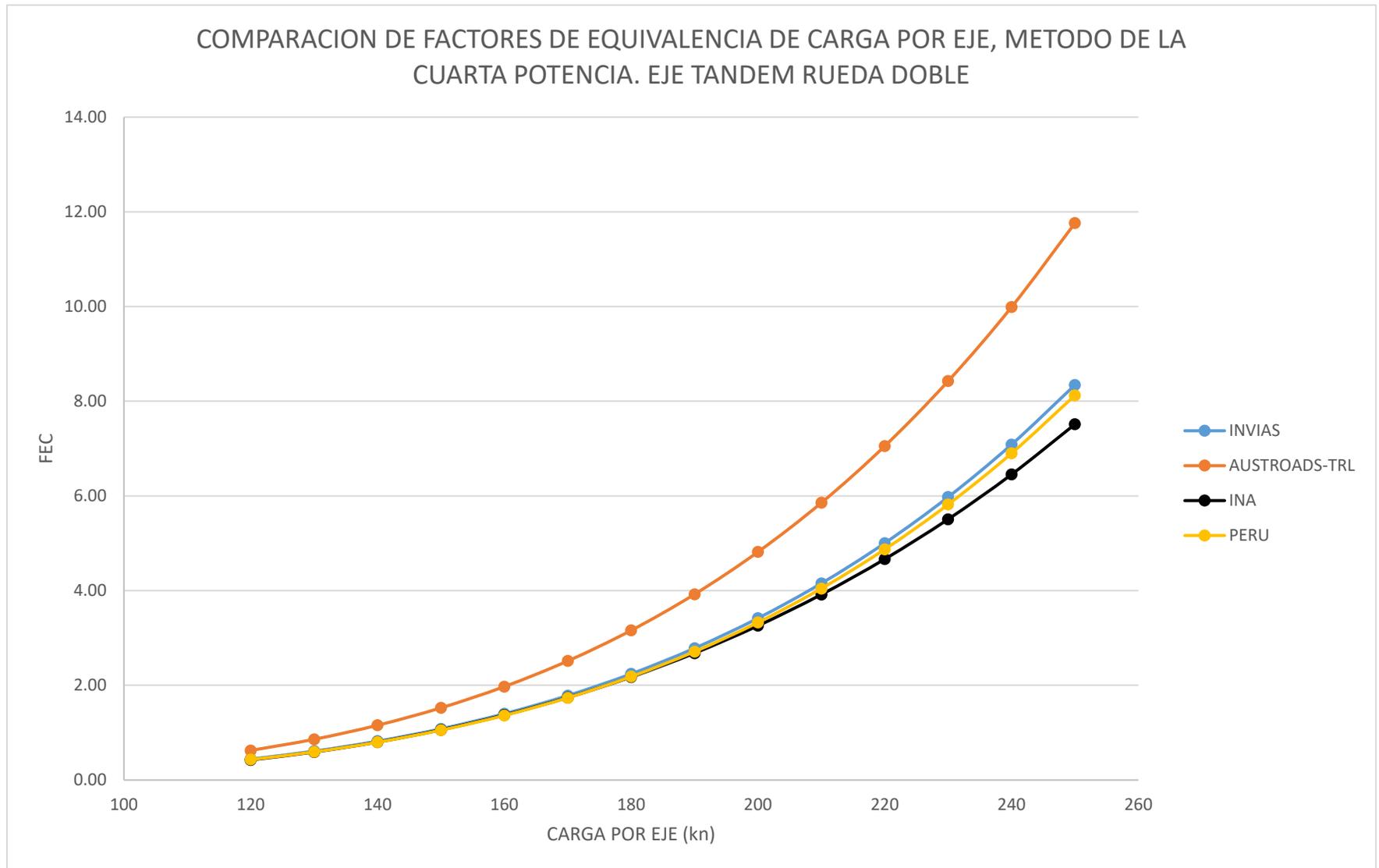
En el análisis de la sensibilización de las cargas por eje para la configuración tandem rueda doble que se presenta consignado en la Tabla 58 y en la Figura. 32, se puede establecer que los factores de equivalencia de carga de los criterios de INVIAS, y M TC guardan correspondencia con valores recomendados por INA. En este eje es importante destacar que los factores de equivalencia de carga recomendados por los criterios de AUSTROADS y TRL son superiores a los obtenidos por los otros criterios y se incrementan con mayor variación al aumentar la magnitud de la carga por eje, situación que está asociada a que estos criterios utilizan una carga de referencia de 135 kN, un 8% inferior a la carga de 147 KN (15 t) utilizada por los otros criterios.

*Tabla 58. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Tándem Rueda Doble*

COMPARACION DE FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA POR EJE, METODO DE LA CUARTA POTENCIA. EJE TANDEM RUEDA DOBLE					
CARGA		METODO INVIAS	AUSTROADS- TRL	INA AASHTO	MANUAL PERUANO
Kn	Lb				
120	26977	0.44	0.62	0.42	0.43
130	29225	0.61	0.86	0.59	0.59
140	31473	0.82	1.16	0.80	0.80
150	33722	1.08	1.52	1.06	1.05
160	35970	1.40	1.97	1.37	1.36
170	38218	1.78	2.51	1.74	1.74
180	40466	2.24	3.16	2.18	2.18
190	42714	2.78	3.92	2.68	2.71
200	44962	3.42	4.82	3.26	3.33
210	47210	4.15	5.86	3.92	4.04
220	49458	5.00	7.05	4.67	4.87
230	51706	5.98	8.43	5.51	5.82
240	53954	7.09	9.99	6.45	6.90
250	56203	8.34	11.76	7.51	8.12

*Fuente: Elaboración propia*

Figura. 32. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Tándem Rueda Doble



Fuente: Elaboración propia

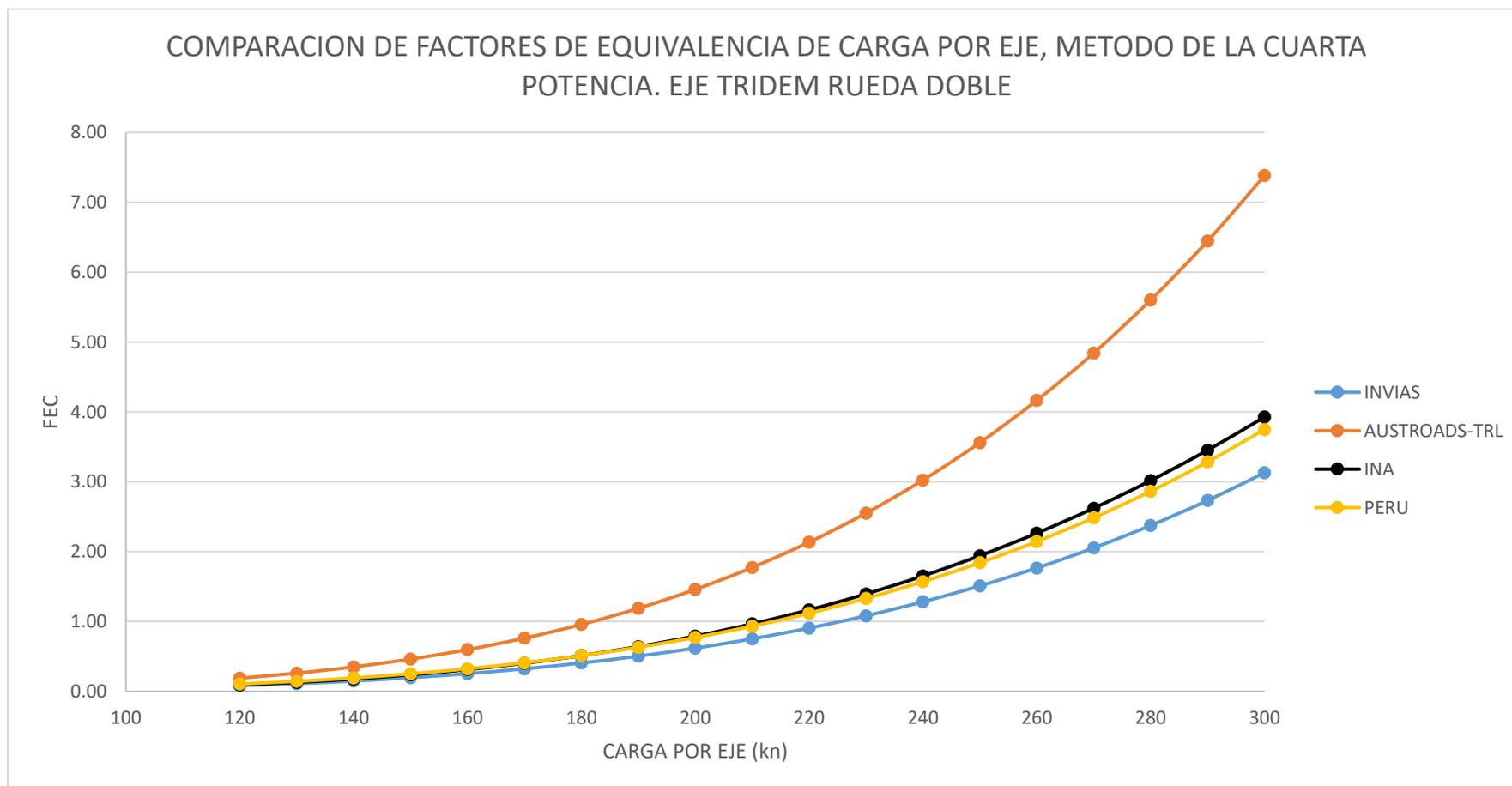
Los resultados de la sensibilización de las magnitudes de carga por eje en el sistema tridem de rueda doble consignado en la Tabla 59 y en la Figura. 33, permite destacar que los valores de factores de equivalencia de carga determinados según los criterios de INVIAS, proporcionan los menores valores y su diferencia con los otros criterios se acentúa para magnitudes de carga superiores a 200kN y que al comparar los resultados de INVIAS con los proporcionados por los criterios de AUSTROADS y TRL se evidencia una diferencia significativa con valores muy bajos pudiéndose considerar que el criterio INVIAS podría estar subestimando el efecto de las cargas de los ejes tridem, situación que se presenta porque INVIAS toma como carga de referencia un valor de 226kN (23 t) y AUSTROADS y TRL considera una carga de referencia de 182N.

*Tabla 59. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Tridem Rueda Doble*

COMPARACION DE FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA POR EJE, METODO DE LA CUARTA POTENCIA. EJE TRIDEM RUEDA DOBLE					
CARGA		METODO INVIAS	AUSTROADS-TRL	INA AASHTO	MANUAL PERUANO
Kn	Lb				
120	26977	0.08	0.19	0.09	0.11
130	29225	0.11	0.26	0.13	0.14
140	31473	0.15	0.35	0.18	0.19
150	33722	0.20	0.46	0.24	0.25
160	35970	0.25	0.60	0.31	0.32
170	38218	0.32	0.76	0.40	0.41
180	40466	0.41	0.96	0.51	0.51
190	42714	0.50	1.19	0.64	0.63
200	44962	0.62	1.46	0.79	0.77
210	47210	0.75	1.77	0.97	0.93
220	49458	0.91	2.14	1.17	1.12
230	51706	1.08	2.55	1.39	1.33
240	53954	1.28	3.02	1.65	1.57
250	56203	1.51	3.56	1.94	1.84
260	58451	1.77	4.16	2.26	2.15
270	60699	2.05	4.84	2.62	2.49
280	62947	2.37	5.60	3.02	2.86
290	65195	2.73	6.45	3.45	3.28
300	67443	3.13	7.38	3.93	3.75

*Fuente: Elaboración propia*

Figura. 33. Comparación De Factores De Equivalencia De Carga Por Eje, Método De La Cuarta Potencia. Eje Trídem Rueda Doble

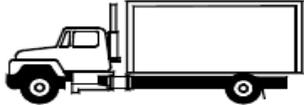
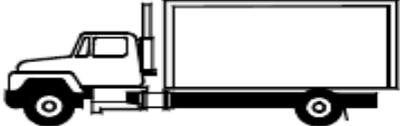
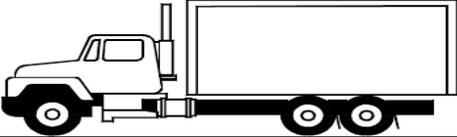
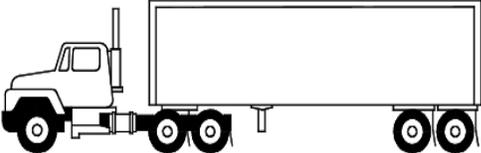
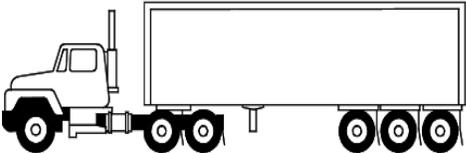


Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que los criterios de AUSTROADS y TRL consideran el efecto del eje cuádruple de rueda doble se observa que la carga representativa de este eje y la del eje trídem recomendada por INVIAS son similares por que según los dos criterios la carga de referencia de 230 kN.

Considerando los factores de equivalencia de carga de los criterios anteriormente analizados y las condiciones de carga máxima de los vehículos considerados en este estudio que se encuentran consignadas anteriormente en la Tabla 60, se determinan por estos diferentes criterios los factores daño de los vehículos tradicionales de carga considerados en este estudio.

*Tabla 60. Factores daño por vehículo determinados según criterios de la cuarta potencia comparados con recomendaciones de Instituto del Asfalto.*

VEHICULO	CRITERIOS			
	INVIAS	AUTROADS Y TRL	MTC PERU	INA y AASHTO
<b>Camión C2p</b> 	0.31	0.32	0.31	0.30
<b>Camión C2G</b> 	3.92	3.46	3.92	3.84
<b>Camión C3</b> 	5.31	6.68	5.19	5.02
<b>Camión C3S2</b> 	8.37	10.98	8.16	7.97
<b>Camión C3S3</b> 	6.50	9.47	6.66	6.55

*Fuente: Elaboración propia*

Según esta tabla se puede establecer que hay una gran similitud entre los valores de factores daño obtenidos por los criterios de INVIAS, MTC y de INA en todos los vehículos analizados con las cargas máximas legales de Colombia. Cuando se comparan los valores de factores daño con respecto a los criterios de AUSTROADS y TRL, se establece que en los vehículos C2 los valores son similares, pero para los vehículos más pesados con ejes tandem y tridem como los camiones C3, C3S2 y C3-S3, los factores daño son mayores cambiando para el camión C3 de 5.31 a 6.68 (25% mayor), para el camión C3S2 de 8.37 a 10.98 (31% mayor) y para el camión C3S3 de 6.50 a 9.47 (45% mayor).

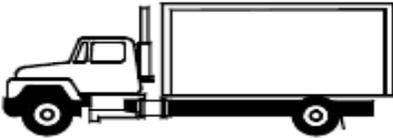
## **9.2 Comparación de valores de factores daño calculados con metodología AASHTO y la metodología mecanicista.**

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos de este trabajo de grado es evaluar la metodología mecanicista para determinar los factores daño de los vehículos tradicionales de carga utilizados en el país, se presenta a continuación en las tablas: Tabla 61, Tabla 62, Tabla 63, Tabla 64, Tabla 65, para cada vehículo los valores de factores daño sintetizados obtenidos de la sensibilización estructural de factores daño utilizando el método mecanicista según los criterios de fatiga de las capas asfálticas y ahuellamiento de la subrasante obtenidos para los diferentes niveles de tránsito y se establece una comparación con los valores de factores daño obtenidos según los criterios del método AASHHO obtenidos en los mismos rangos de sensibilización del tránsito.

Analizando los resultados de factores daño obtenidos para el vehículo C2 pequeño sintetizados en la Tabla 61 y en la Figura. 34, se puede observar en forma general que los valores presentan un rango de variación bajo para los factores daño obtenidos por el método mecanicista controlando la compresión y los valores obtenidos por la metodología AASHTO, proporcionando entre estos dos criterios valores muy similares para los diferentes niveles de tránsito y permiten establecer un factor daño representativo según estas metodologías del orden de 0.30. Esta situación no se presenta al evaluar los factores daño según el método mecanicista controlando la tracción en la capa asfáltica, porque las dispersiones en cada rango de tránsito al cambiar la resistencia de la subrasante presentan tendencias variables y además los factores daño en cada nivel de tránsito es variable y los valores son los más altos pudiéndose establecer en los valores de tránsito menores de 5 millones un rango de variación promedio entre 0.68 a 0.94 y para los rangos superiores a 5 millones la tendencia es más uniforme con un rango de variación bajo entre 0.46 a 0.51.

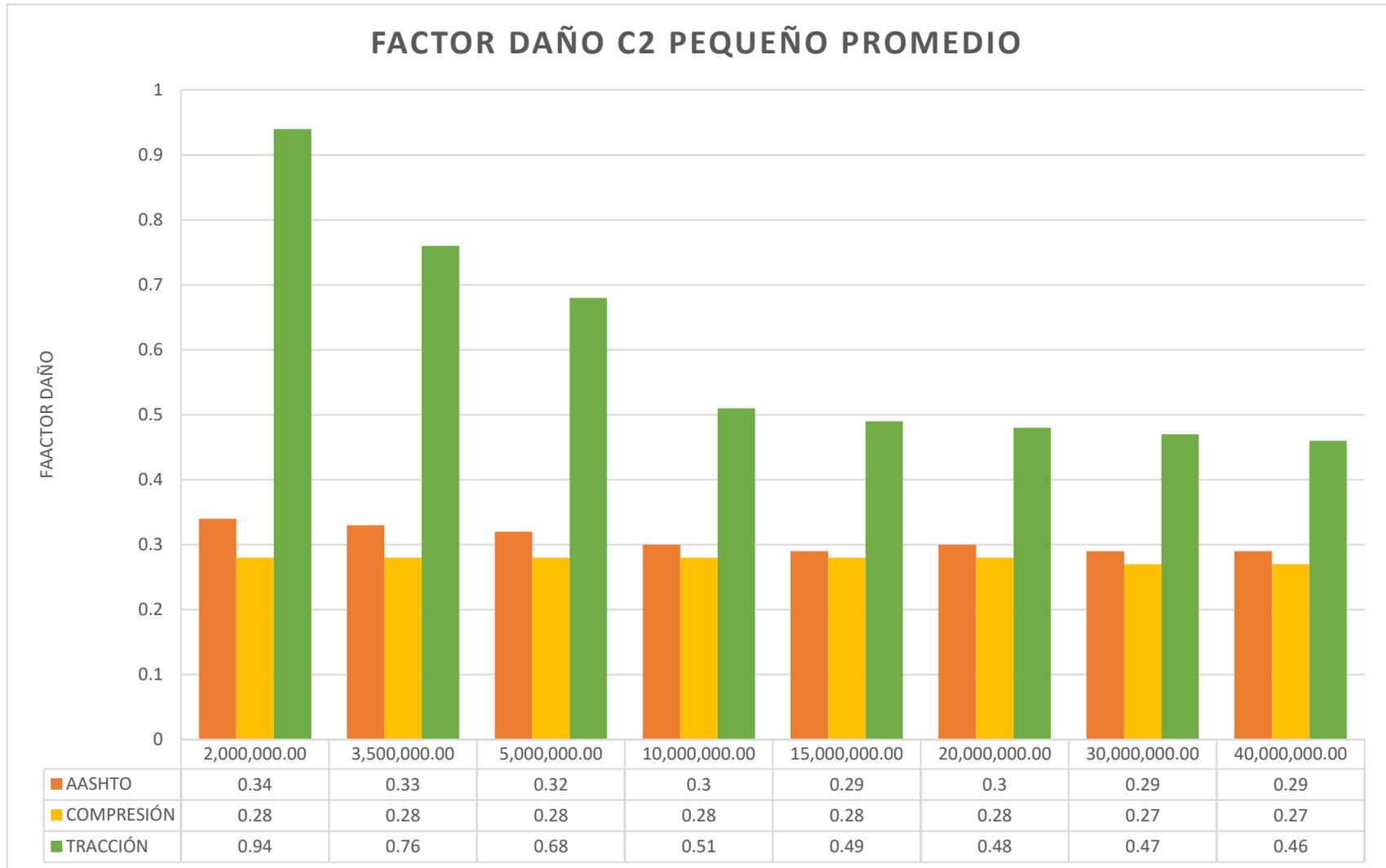
El procesamiento de los valores obtenidos de factores daño para el vehículo C2 Grande, los cuales se presentan sintetizados en la Tabla 62 y en la Figura. 35, permiten concluir que hay una gran correspondencia entre los valores obtenidos por el método mecanicista y los valores obtenidos por la metodología AASHTO, obteniéndose homogeneidad de los valores en cada rango de tránsito al variar la resistencia de la subrasante y una tendencia similar al variar el nivel de tránsito, obteniéndose en promedio según el método mecanicista un valor de factor daño de 3.78 por criterio de tracción y de 4.23 por el criterio de compresión, valores que son similares en orden de magnitud al valor promedio de factor daño obtenido según el método AASHTO de 3.89.

Tabla 61. Resultados de factores daño del camión C2- pequeño utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.

										
CARGA EJE SIMPLE RUEDA SIMPLE					CARGA EJE SIMPLE RUEDA DOBLE					
2.5 TON					6 TON					
<b>CAMION C2 PEQUEÑO</b>										<b>PROMEDIO TOTAL</b>
<b>ANALISIS DE FATIGA</b>										
<b>TRANSITO EN MILLONES</b>										
		<b>2</b>	<b>3.5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	
MECANICISTA	RANGO	0.65-1.23	0.60-0.93	0.56-0.81	0.48-0.56	0.48-0.51	0.46-0.50	0.46-0.49	0.44-0.48	0.60
	PROMEDIO	0.94	0.76	0.68	0.51	0.49	0.48	0.47	0.46	
<b>AASHTO</b>										
AASHTO	RANGO	0.21-0.341	0.301-.0341	0.301-0.341	0.281-0.321	0.281-0.311	0.281-0.341	0.281-0.331	0.281-0.311	0.31
	PROMEDIO	0.34	0.33	0.32	0.3	0.29	0.3	0.29	0.29	
<b>ANALISIS DE AHUELLAMIENTO</b>										
<b>TRANSITO EN MILLONES</b>										<b>PROMEDIO TOTAL</b>
		<b>2</b>	<b>3.5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	
MECANICICSTA	RANGO	0.27-0.30	0.27-0.29	0.27-0.29	0.27-0.28	0.27-0.28	0.27-0.28	0.26-0.27	0.25-0.28	
	PROMEDIO	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	
<b>AASHTO</b>										
AASHTO	RANGO	0.21-0.341	0.301-.0341	0.301-0.341	0.281-0.321	0.281-0.311	0.281-0.341	0.281-0.331	0.281-0.311	0.31
	PROMEDIO	0.34	0.33	0.32	0.3	0.29	0.3	0.29	0.29	

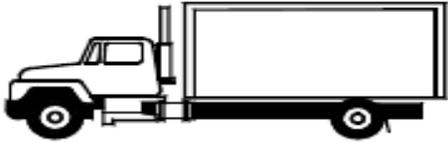
Fuente: Elaboración propia

Figura. 34. Resultados promedio de factores daño del camión C3-S2 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito



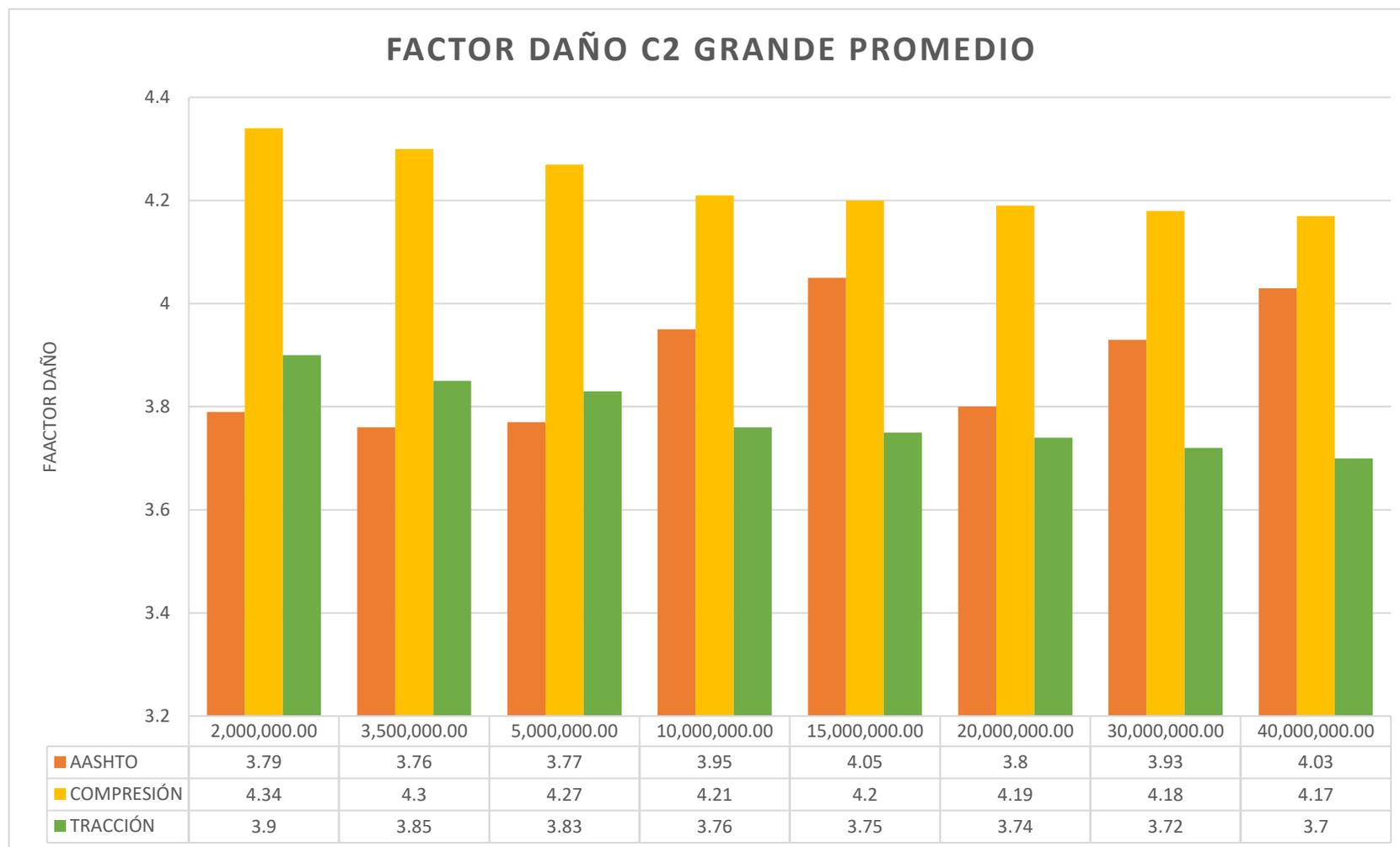
*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 62. Resultados de factores daño del camión C2- grande utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.

										
CARGA EJE SIMPLE RUEDA SIMPLE					CARGA EJE SIMPLE RUEDA DOBLE					
6 TON					11 TON					
CAMION C2 GRANDE										PROMEDIO TOTAL
ANALISIS DE FATIGA										
TRANSITO EN MILLONES										
		2	3.5	5	10	15	20	30	40	
MECANICISTA	RANGO	3.75-4.35	3.72-4.00	3.64-3.94	3.49-3.95	3.47-3.95	3.41-3.95	3.37-3.95	3.36-3.95	3.78
	PROMEDIO	3.9	3.85	3.83	3.76	3.75	3.74	3.72	3.7	
AASHTO										
AASHTO	RANGO	3.713-3.993	3.713-3.863	3.7013-3.933	3.723-4.193	3.773-4.283	3.303-4.333	3.423-4.243	3.643-4.323	3.89
	PROMEDIO	3.79	3.76	3.77	3.95	4.05	3.8	3.93	4.03	
ANALISIS DE AHUELLAMIENTO										PROMEDIO TOTAL
TRANSITO EN MILLONES										
		2	3.5	5	10	15	20	30	40	
MECANICICSTA	RANGO	4.12-4.55	4.15-4.44	4.14-4.39	4.11-4.28	4.12-4.26	4.11-4.6	4.1-4.26	4.09-4.25	4.23
	PROMEDIO	4.34	4.3	4.27	4.21	4.2	4.19	4.18	4.17	
AASHTO										
AASHTO	RANGO	3.713-3.993	3.713-3.863	3.7013-3.933	3.723-4.193	3.773-4.283	3.303-4.333	3.423-4.243	3.643-4.323	3.89
	PROMEDIO	3.79	3.76	3.77	3.95	4.05	3.8	3.93	4.03	

Fuente: Elaboración propia

Figura. 35. Resultados promedio de factores daño del camión C2- grande utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito

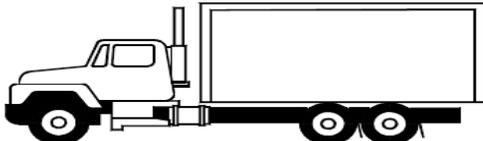


*Fuente: Elaboración propia*

Considerando los resultados de factores daño obtenidos para el vehículo C3 sintetizados en la Tabla 63 y en la Figura. 36, se puede observar en forma general que los valores presentan un rango de variación bajo para los factores daño obtenidos por el método mecanicista controlando la compresión y los valores obtenidos por la metodología AASHTO, proporcionando entre estos dos criterios valores muy similares para los diferentes niveles de tránsito y permiten establecer un factor daño representativo según estas metodologías del orden de 5.5 según la metodología mecanicista y de 5.1 según el método AASHTO. Esta situación no se presenta al evaluar los factores daño según el método mecanicista controlando la tracción en la capa asfáltica, porque las dispersiones en cada rango de tránsito al cambiar la resistencia de la subrasante presentan tendencias variables y además los factores daño en cada nivel de tránsito es variable y los valores son los más altos pudiéndose establecer en los valores de tránsito menores de 5 millones un rango de variación promedio entre 7.2 a 7.4, para rangos de valores de tránsito entre 10 y 20 millones el rango de variación es de 6 a 6.4 y para los rangos superiores a 30 millones el rango de variación es de 5.5 a 5.7. Mezclando todos los valores promedios obtenidos en los diferentes niveles de tránsito el rango de factores daño para el camión C3 varía de 5.5 a 7.4 con valor promedio de 6.5.

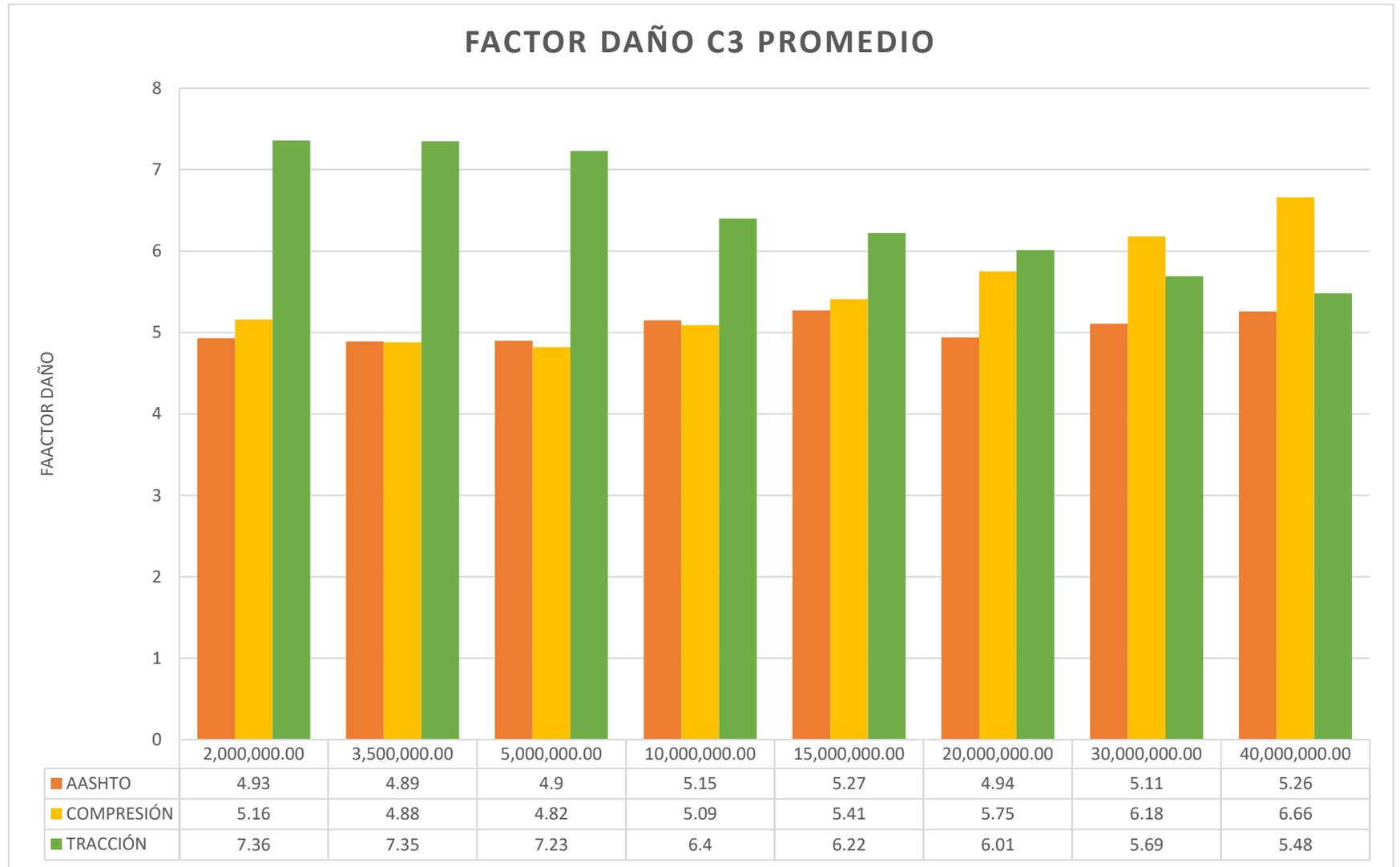
Los resultados de factores daño obtenidos para el vehículo C3-S2, que están consignados en la Tabla 64 y en la Figura. 37, presentan unas condiciones muy particulares. En primer lugar, los resultados obtenidos según el método mecanicista para cada nivel de tránsito presentan amplios rangos de dispersión indicando que hay una afectación significativa cuando se varía la resistencia de la subrasante, situación que no se observa cuando se analizan los resultados obtenidos en la metodología AASHTO. Un segundo aspecto que se obtiene es que los resultados según el método mecanicista considerando el criterio de tracción en la capa asfáltica son los más elevados alcanzando para unas ciertas combinaciones estructurales valores muy altos del orden de 15. Finalmente se obtiene en este análisis que los valores promedio obtenidos según el método mecanicista según el criterio de compresión presentan similitud con los valores propuestos por AASHTO para niveles de tránsito menores e iguales a 15 millones de ejes equivalentes con niveles de dispersión altos en los resultados en cada nivel de tránsito, y que para tránsitos superiores e iguales a 20 millones de ejes equivalentes los valores son más altos y con mayor dispersión a los obtenidos según el método AASHTO:

Tabla 63. Resultados de factores daño del camión C3 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.

										
CARGA EJE SIMPLE RUEDA SIMPLE					CARGA EJE TANDEM RUEDA DOBLE					
6 TON					22 TON					
<b>CAMION C3</b>										<b>PROMEDIO TOTAL</b>
<b>ANALISIS DE FATIGA</b>										
<b>TRANSITO EN MILLONES</b>										
		<b>2</b>	<b>3.5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	
MECANICISTA	RANGO	4.45-8.84	4.2-9.06	4.02-9.22	3.8-8.86	3.73-8.49	3.66-8.1	3.54-8.1	3.49-7.25	6.47
	PROMEDIO	7.36	7.35	7.23	6.4	6.22	6.01	5.69	5.48	
<b>AASHTO</b>										
AASHTO	RANGO	4.823-5.203	4.823-5.013	4.823-5.123	4.833-5.463	4.893-5.593	4.263-5.663	4.433-5.543	4.723-5.643	5.06
	PROMEDIO	4.93	4.89	4.9	5.15	5.27	4.94	5.11	5.26	
<b>ANALISIS DE AHUELLAMIENTO</b>										<b>PROMEDIO TOTAL</b>
<b>TRANSITO EN MILLONES</b>										
		<b>2</b>	<b>3.5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	
MECANICISTA	RANGO	4.3-7.01	4.28-5.94	4.27-5.5	4.2-6.83	4.12-7.58	4.13-8.23	4.21-8.88	4.31-9.88	5.49
	PROMEDIO	5.16	4.88	4.82	5.09	5.41	5.75	6.18	6.66	
<b>AASHTO</b>										
AASHTO	RANGO	4.823-5.203	4.823-5.013	4.823-5.123	4.833-5.463	4.893-5.593	4.263-5.663	4.433-5.543	4.723-5.643	5.06
	PROMEDIO	4.93	4.89	4.9	5.15	5.27	4.94	5.11	5.26	

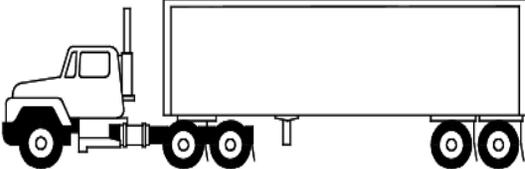
Fuente: Elaboración propia

Figura. 36. Resultados promedio de factores daño del camión C3-S2 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito



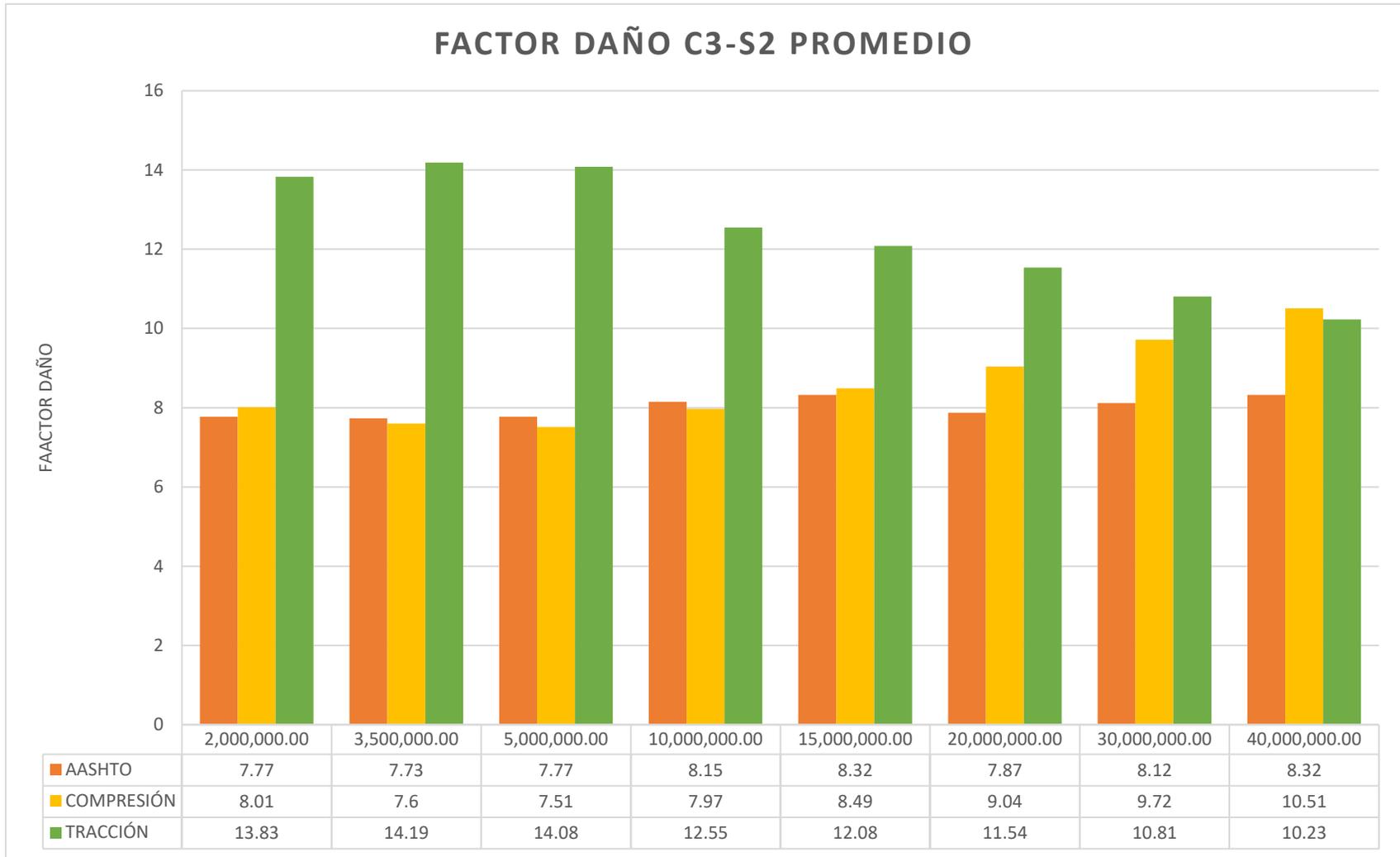
Fuente: Elaboración propia

Tabla 64. Resultados de factores daño del camión C3-S2 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.

										
CARGA EJE SIMPLE RUEDA SIMPLE				CARGA EJE TANDEM RUEDA DOBLE				CARGA EJE TANDEM RUEDA DOBLE		
6 TON				21 TON				21 TON		
<b>CAMION C3-S2</b>										<b>PROMEDIO TOTAL</b>
<b>ANALISIS DE FATIGA</b>										
<b>TRANSITO EN MILLONES</b>										
		<b>2</b>	<b>3.5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	
<b>MECANICISTA</b>	RANGO	10.38-14.55	12.36-14.93	12.45-15.28	9.96-14.99	9.93-14.01	9.11-13.46	8.43-13.52	8.29-12.42	12.41
	PROMEDIO	13.83	14.19	14.08	12.55	12.08	11.54	10.81	10.23	
<b>AASHTO</b>										
<b>AASHTO</b>	RANGO	7.643-8.143	7.643-7.943	7.643-8.123	7.663-8.603	7.783-8.763	6.883-8.843	7.143-8.703	7.583-8.843	8.01
	PROMEDIO	7.77	7.73	7.77	8.15	8.32	7.87	8.12	8.32	
<b>ANALISIS DE AHUELLAMIENTO</b>										
<b>TRANSITO EN MILLONES</b>										<b>PROMEDIO TOTAL</b>
		<b>2</b>	<b>3.5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	
<b>MECANICISTA</b>	RANGO	6.69-10.69	6.65-9.23	6.63-8.64	6.54-10.78	6.4-11.99	6.39-13.03	6.54-14.08	6.71-15.68	
	PROMEDIO	8.01	7.6	7.51	7.97	8.49	9.04	9.72	10.51	
<b>AASHTO</b>										
<b>AASHTO</b>	RANGO	7.643-8.143	7.643-7.943	7.643-8.123	7.663-8.603	7.783-8.763	6.883-8.843	7.143-8.703	7.583-8.843	8.01
	PROMEDIO	7.77	7.73	7.77	8.15	8.32	7.87	8.12	8.32	

Fuente: Elaboración propia

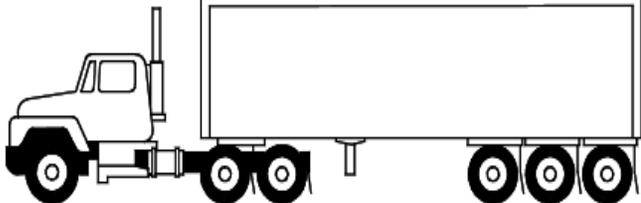
Figura. 37. Resultados promedio de factores daño del camión C3-S2 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito



Fuente: Elaboración propia

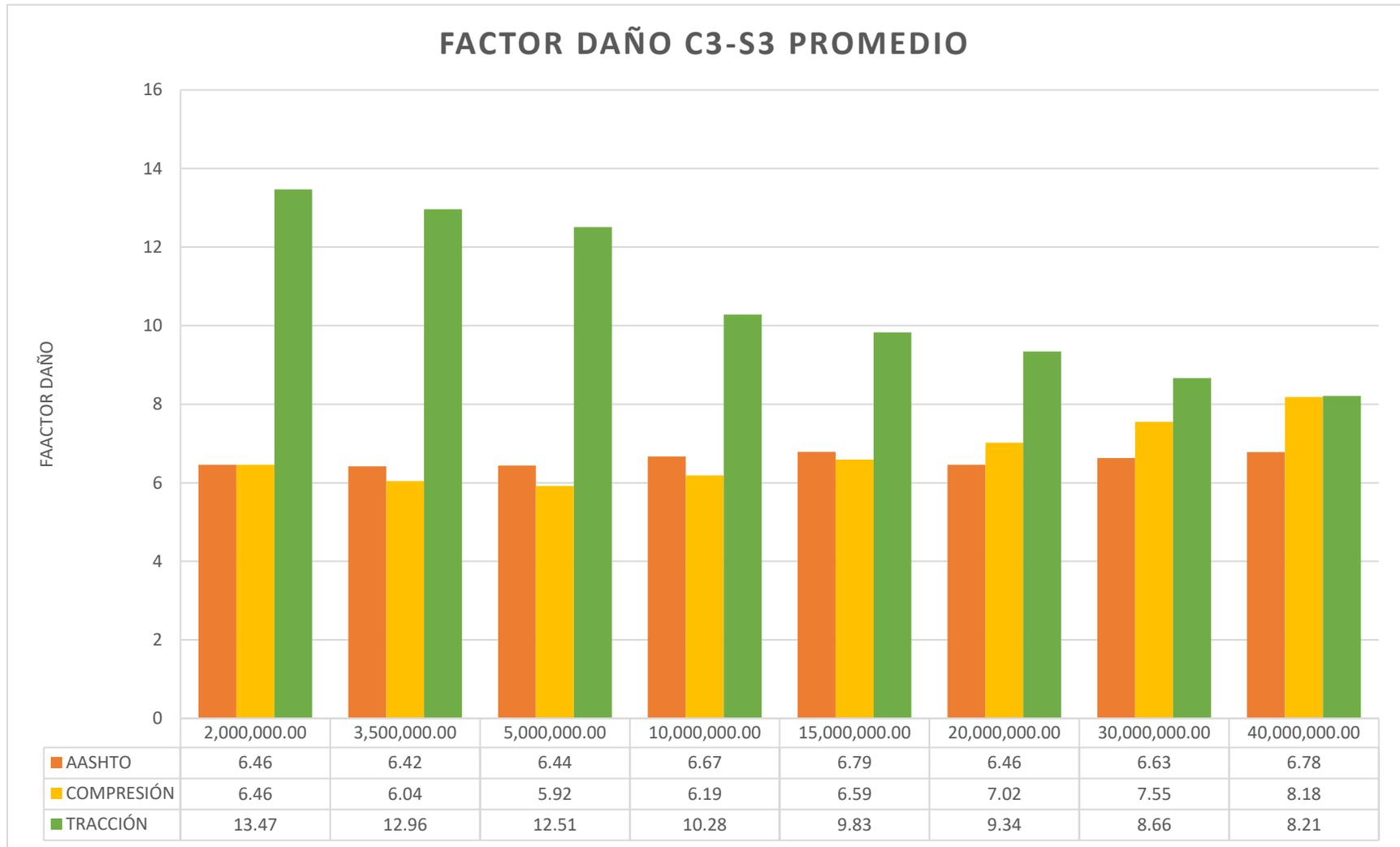
Evaluando los resultados de factores daño obtenidos para el vehículo C3-S3, que están consignados en la Tabla 65 y en la Figura. 38, permiten establecer que los valores de factor de equivalencia de carga obtenidos según el método mecanicista en cada nivel de tránsito también presentan amplios rangos de dispersión indicando que hay una afectación significativa cuando se varía la resistencia de la subrasante y además los valores obtenidos según el criterio de tracción en la capa asfáltica son los más elevados comparando los obtenidos en la metodología mecanicista según criterio de compresión de la subrasante y según el criterio AASHTO. Los valores promedio de factor de equivalencia de carga obtenidos por el método mecanicista según el criterio de compresión son en su mayoría similares a los valores obtenidos por la metodología AASHTO proporcionando valores de 6.8 por el método mecanicista y de 6.6 según metodología AASHTO.

Tabla 65. Resultados de factores daño del camión C3-S3 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.

										
CARGA EJE SIMPLE RUEDA SIMPLE			CARGA EJE TANDEM RUEDA DOBLE				CARGA EJE TRIDEM RUEDA DOBLE			
6 TON			22 TON				24 TON			
<b>CAMION C3-S3</b>										<b>PROMEDIO TOTAL</b>
<b>ANALISIS DE FATIGA</b>										
<b>TRANSITO EN MILLONES</b>										
		<b>2</b>	<b>3.5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	
MECANICISTA	RANGO	10.09-15.33	9.14-13.52	8.31-15.11	6.87-13.52	6.87-12.77	6.58-12.2	6.46-11.29	6.42-10.59	10.66
	PROMEDIO	13.47	12.96	12.51	10.28	9.83	9.34	8.66	8.21	
<b>AASHTO</b>										
AASHTO	RANGO	6.663-6.733	6.363-6.553	6.363-6.643	6.363-6.983	6.423-7.113	5.803-7.773	5.973-7.063	6.253-7.153	6.58
	PROMEDIO	6.46	6.42	6.44	6.67	6.79	6.46	6.63	6.78	
<b>ANALISIS DE AHUELLAMIENTO</b>										
<b>TRANSITO EN MILLONES</b>										<b>PROMEDIO TOTAL</b>
		<b>2</b>	<b>3.5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	
MECANICISTA	RANGO	5.27-9.11	5.22-7.63	5.2-6.88	5.1-8.34	5.02-9.31	5.03-10.16	5.1-11.02	5.22-12.36	
	PROMEDIO	6.46	6.04	5.92	6.19	6.59	7.02	7.55	8.18	
<b>AASHTO</b>										
AASHTO	RANGO	6.663-6.733	6.363-6.553	6.363-6.643	6.363-6.983	6.423-7.113	5.803-7.773	5.973-7.063	6.253-7.153	6.58
	PROMEDIO	6.46	6.42	6.44	6.67	6.79	6.46	6.63	6.78	

Fuente: Elaboración propia

Figura. 38. Resultados promedio de factores daño del camión C3-S3 utilizando metodología mecanicista y AASHTO para diferentes niveles de tránsito.



Fuente: Elaboración propia

# 11. CONCLUSIONES

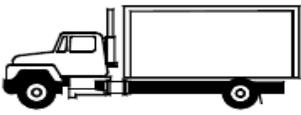
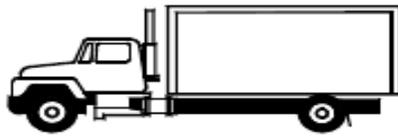
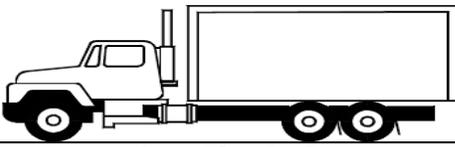
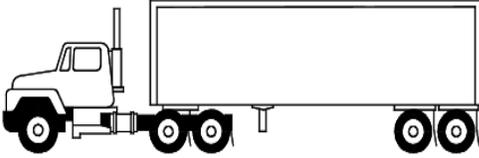
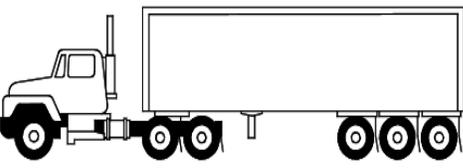
El desarrollo de este trabajo de grado permitió fortalecer los conocimientos adquiridos dentro de la maestría en ingeniería de pavimentos, y contribuyó a estudiar y conocer con más detalle la incidencia de las cargas de los vehículos pesados sobre las estructuras de pavimentos, utilizando referencias internacionales y estudios nacionales que sirvieron como referencia para establecer la necesidad de plantear una herramienta de apoyo como el software AlinPave (Análisis de Líneas de Influencia en pavimentos), que permita con base en los resultados de un análisis estructural proporcionar elementos técnicos que posibiliten analizar el efecto de cualquier configuración de carga por eje y de cualquier tipo de vehículo para que pueda ser utilizado por los ingenieros dedicados al campo vial en la evaluación y cuantificación de la variable tránsito por medio de tránsito equivalente o por medio de espectros de cargas en actividades de diseño y rehabilitación de pavimentos flexibles.

Teniendo en cuenta que para la cuantificación del efecto de las magnitudes de carga por eje se requiere establecer un modelo estructural de pavimento, se realizó en este trabajo de grado una sensibilización detallada de las variables tránsito y resistencia de la subrasante en el dimensionamiento de los pavimentos flexibles, permitiendo obtener como resultado de esta sensibilización un catálogo de estructuras de pavimentos flexibles utilizando los métodos AASHTO y mecanicista, estructuras que pueden servir como modelo de prediseño y como referencia para analizar factores de equivalencia de carga por eje o determinación de factores daño de cualquier configuración de vehículo de carga en la cuantificación de la variable tránsito utilizando los métodos convencionales o el método basado en la utilización de líneas de influencia de las deformaciones unitarias de tracción en la capa asfáltica o de compresión en la subrasante utilizando la herramienta AlinPave.

Como resultado del análisis de los factores de equivalencia de carga realizados para los ejes simple rueda doble, tandem rueda doble y tridem rueda doble , utilizando diferentes criterios en el método simplificado de la cuarta potencia, se puede concluir que los valores recomendados en la metodología de INVIAS que son similares a los recomendados por MTC de Perú, al compararlos con referencias extranjeras guardan una correspondencia solamente para los ejes simples ruedas dobles, en cambio para los ejes tandem y tridem los valores obtenidos según INVIAS proporcionan factores de equivalencia de carga menores, situación que se puede explicar porque las cargas de referencia de los ejes tandem (135 kN, 13.77 t ) y tridem (182 kN, 18.56 t ) utilizadas en las expresiones de la cuarta potencia según criterios de AUSTROADS y TRL son menores en porcentajes de 8% y 19% respectivamente , siendo más notoria esta diferencia en el análisis del eje tridem donde se puede concluir que se está subestimando su efecto porque inclusive la carga de referencia que utiliza INVIAS de 226 kN (23 t) en este tipo de eje es similar a la magnitud de la carga que utilizan las metodologías de AUSTROADS y TRL para cuantificar el eje cuádruple.

Considerando los resultados de los factores de equivalencia de carga por eje y factor daño vehicular determinados por el método simplificado de la cuarta potencia utilizando los criterios internacionales recientes de TRL, AUSTROADS, los cuales se presentan en la Tabla 66, se realizó una comparación con los valores propuestos en el Manual de INVIAS de 1998 utilizando el método de la cuarta potencia, concluyéndose que los valores del Manual de INVIAS son menores con respecto a los recomendados por estas dos entidades internacionales, explicándose esta diferencia por la variación en las cargas de referencia de los ejes tandem y tridem, donde INVIAS utiliza cargas mayores como referencia en estos dos tipos de ejes. Dentro de este análisis se presenta como referencia la recomendación de factores daño del Método del Instituto del Asfalto (1991), que para las condiciones de carga máxima de los vehículos consideradas guardan correspondencia con la recomendación de INVIAS. Esta situación es muy importante que sea analizada y considerada en la utilización de esta metodología que es muy común en nuestro medio para poder cuantificar adecuadamente el tránsito equivalente en las actividades de dimensionamiento de pavimentos.

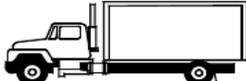
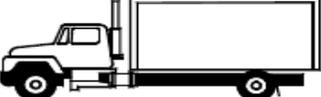
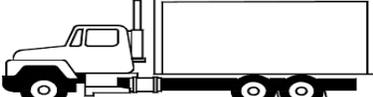
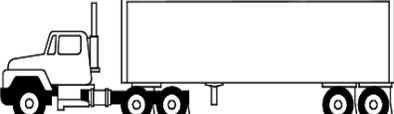
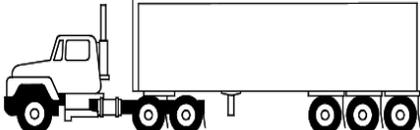
Tabla 66. Factores daño por vehículo determinados según criterios de la cuarta potencia comparados con recomendaciones de Instituto del Asfalto.

VEHICULO	CRITERIOS		
	INVIAS	AUTROADS Y TRL	INA y AASHTO
<b>Camión C2p</b> 	0.31	0.32	0.30
<b>Camión C2G</b> 	3.92	3.46	3.84
<b>Camión C3</b> 	5.31	6.68	5.02
<b>Camión C3S2</b> 	8.37	10.98	7.97
<b>Camión C3S3</b> 	6.50	9.47	6.55

Fuente: Elaboración propia

Considerando que uno de los objetivos básicos de este trabajo de grado es plantear la determinación de los factores daño de los vehículos de carga utilizando el método mecanicista según las líneas elásticas de las deformaciones de tracción en la capa asfáltica y la de compresión a nivel de la superficie de la subrasante que originan las diferentes configuraciones de los ejes de cada vehículo, se presenta en la Tabla 67 como resultado de este estudio un resumen de los factores daño de estos vehículos seleccionados, actuando sobre los diferentes modelos estructurales obtenidos de la sensibilización de las variables tránsito y subrasante . En la Tabla 67 se presenta los resultados obtenidos según el método mecanicista y una comparación con los resultados obtenidos según la referencia internacional de AASHTO, para poder establecer los principales aportes de la utilización de esta metodología.

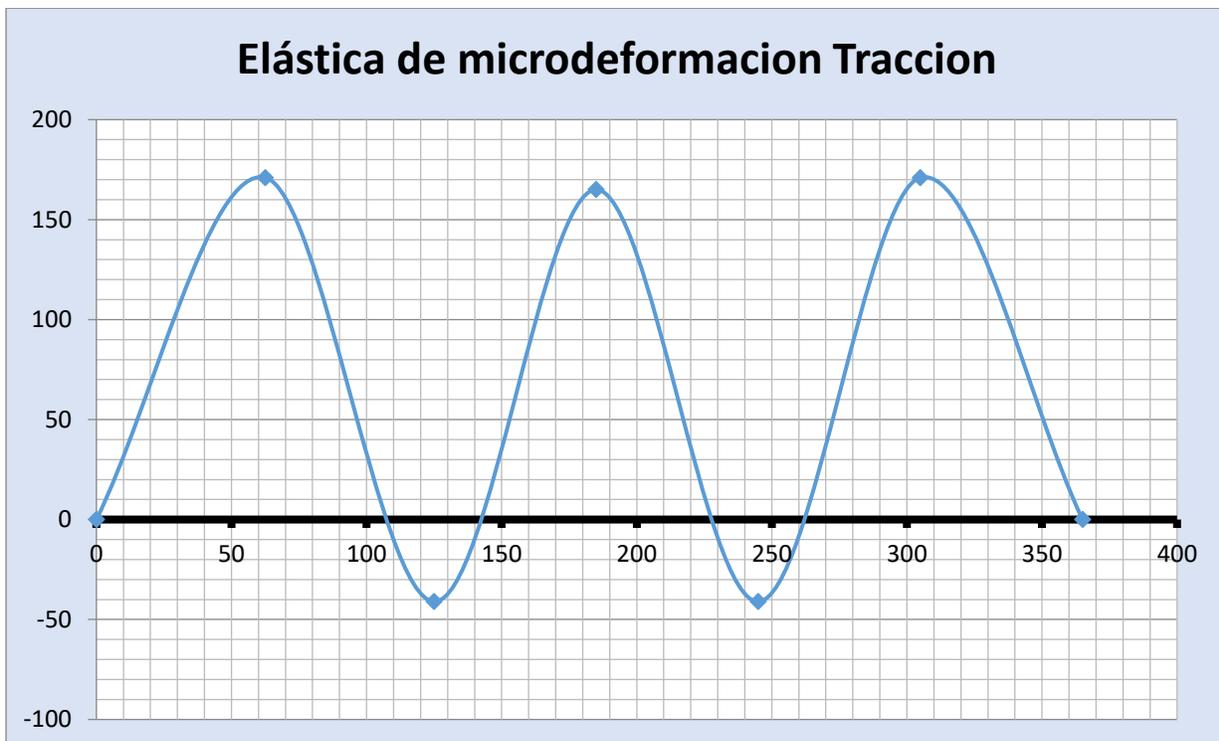
Tabla 67. Factores daño por vehículo determinados según AASHTO y método mecanicista

VEHICULO	AASHTO		CRITERIO AHUELLAMIENTO		CRITERIO FATIGA	
	RANGO	PROMEDIO	RANGO	PROMEDIO	RANGO	PROMEDIO
<b>Camión C2p</b> 	0.29-0.34	0.31	0.27-0.28	0.28	0.46-0.94	0.60
<b>Camión C2G</b> 	3.79-4.03	3.89	4.17-4.34	4.23	3.70-3.90	3.78
<b>Camión C3</b> 	4.93-5.26	5.06	5.16-6.66	5.49	5.48-7.36	6.47
<b>Camión C3S2</b> 	7.77-8.32	8.01	8.01-10.51	8.61	10.23-13.83	12.41
<b>Camión C3S3</b> 	6.46-6.78	6.58	6.46-8.18	6.74	8.21-13.47	10.66

Fuente: Elaboración propia

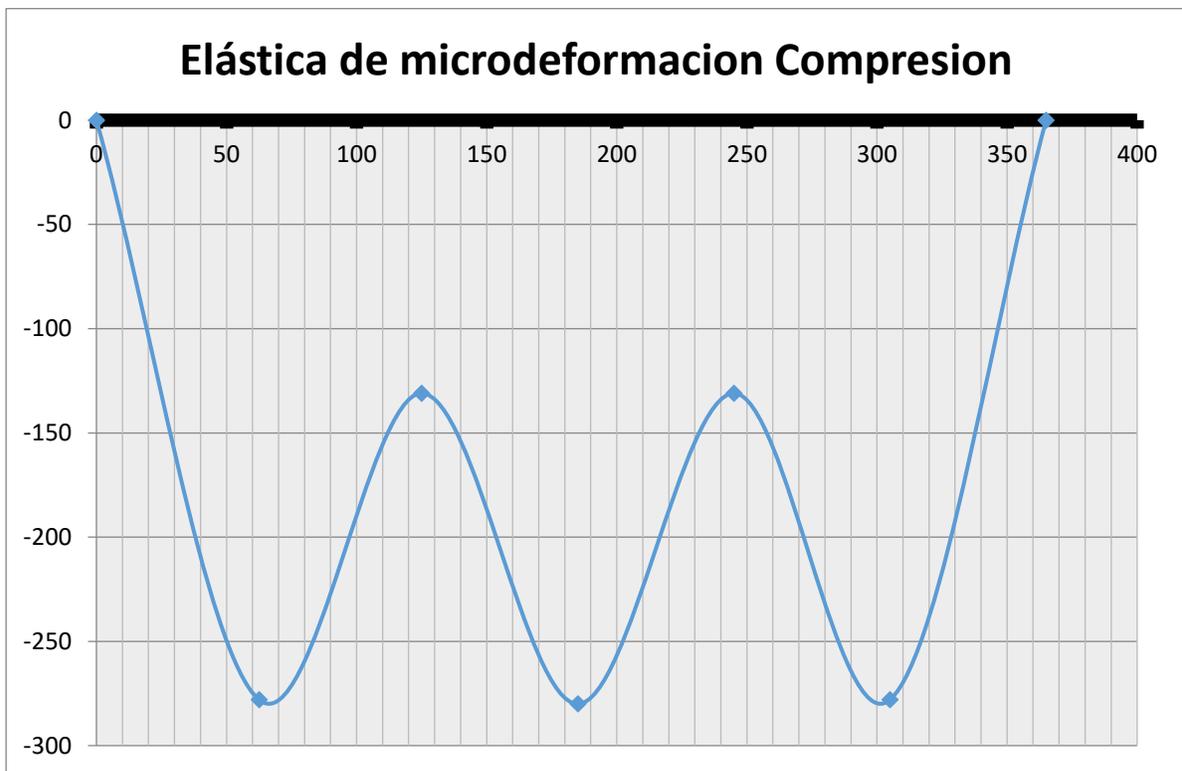
Como conclusión se puede establecer que según los resultados de factores daño obtenidos para los diferentes camiones, en forma general los valores de factor daño obtenidos por el método mecanicista controlando la compresión de la subrasante y los valores obtenidos por la metodología AASHTO presentan rangos de variación bajos y valores promedios similares estableciéndose una buena correspondencia entre estas dos metodologías, esta situación podría tener relación con el criterio de protección de capas a compresión utilizado en la metodología de dimensionamiento de las estructuras según AASHTO y la forma de la elástica de deformación en los ejes tandem y tridem. En cambio, al evaluar los factores daño según el método mecanicista controlando la tracción en la capa asfáltica la dispersión del rango de valores es alta y los factores daño obtenidos son mayores y no guardan mucha correspondencia según la metodología AASHTO, esta situación está muy relacionada con la forma de la curva elástica de las deformaciones de tracción donde el efecto de los ejes multilínea tiende a mostrar un comportamiento similar como si los efectos de cada línea actuaran en forma aislada Figura. 39 y no en forma conjunta como se obtienen en el análisis de compresión Figura. 40.

Figura. 39. Elástica de microdeformación (Tracción)



Fuente: Elaboración propia

Figura. 40. Elástica de micro deformación (Compresión)



Fuente: Elaboración propia

## 10 REFERENCIAS

- (1) AASHTO (1993). Guide for Design of pavements structures. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington DC.
- (2) Asphalt Institute (1991). Thickness Design Asphalt Pavements Highways streets. USA
- (3) AASHTO. (2008). ICGP Guía de Diseño Mecánico-Empírico de Pavimentos: Manual Práctico. Estados Unidos: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- (4) American Association of State Highway and Transportation Officials (2015). AASHTO. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. A manual of practice, USA
- (5) Austroads. (2017). Guide to Pavement Technology: Part 2: Pavement Structural Design. Sydney, Australia: Austroads Inc.
- (6) American Association of State Highway and Transportation Officials. (2022). AASHTO T 342-22: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). Washington, DC
- (7) Alfonso Murgueítio Valencia, Carlos Alberto Benavides Bastidas, Efraín de Jesús Solano. (1998). "Estudio de los factores daño de los vehículos que circulan por las carreteras colombianas." XI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de pavimentos. Santafé de Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería
- (8) American Association of State Highway and Transportation Officials. (1972). AASHTO guide for design of pavement structures (1st ed.). Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- (9) American Association of State Highway and Transportation Officials. (1986). AASHTO guide American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO guide for design of pavement structures (2nd ed.). Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- (10) American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO guide for design of pavement structures (2nd ed.). Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- (11) Bernardo Caicedo Hormaza. (2007). "Análisis del efecto sobre los pavimentos flexibles de trenes de carga de diferente tipología." Trabajo presentado para la empresa BAVARIA.

- (12) Carlos Alberto Benavides y Eugenio Chavarro. (1992) . Universidad del Cauca. Tesis de grado. Determinación de Módulos Dinámicos y leyes de fatiga de Concretos Asfálticos.
- (13) Department of Transportation Federal Highway Administration. (2007). Mechanistic Empirical Pavement Design Guide Implementation. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
- (14) DEACON, J.A., (1969). Load Equivalency in Flexible Pavements, Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 38, pp- 465 – 491.
- (15) Federal Highway Administration. (2006 , MAYO). Geotechnical Aspects of Pavements, Reference Manual, Washington, D.C, Department of Transportation Publication No. FHWA NHI-05-037. USA
- (16) Grenfell, J.R.A., Airey, G.D., and Thom, N.H. (2009). Development of the Nottingham Asphalt Tester - A Versatile New Tool to Investigate the Low Temperature Behaviour of Asphalt. Journal of the Transportation Research Board, 2095, 52-61.
- (17) Garnica Anguas, P. (2004). Conceptos Mecanicistas en Pavimentos. Secretaria de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte Publicación Técnica No.258. Sanfandila. Qro. Mexico
- (18) Huang, Y., Kenlayer (1993) computer program. Pavement Analysis and Design,
- (19) Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis And and Design (Vol. 2, pp. 401-409). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- (20) INVIAS. (1998). Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- (21) International Road Federation. (2004). A guide to the Structural Design of bitumen Surfaced Roads in Tropical and Sub-tropical Regions (2nd ed.). Geneva, Switzerland: International Road Federation.
- (22) IDEAM. (2012). Características Climatológicas de Ciudades Principales y Municipios Turísticos de Colombia.
- (23) Izzat, J.O., Lettier, J.A. & Taylor, C.A. (1967). The Shell group methods for thickness design of asphalt pavements. Annual Meeting of the National Asphalt Pavin Association. San Juan, Puerto Rico
- (24) Instituto Nacional de Vías (Invías). (2017). NTC 2017: Norma Técnica Colombiana, Diseño de pavimentos para carreteras. Bogotá, Colombia

- (25) Lea, J. D. (2009). Open Source Pavement Engineering. OpenPave. Davis, California, Estados Unidos.
- (26) Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). Manual de Carreteras - Sección Suelos y Pavimentos (Versión abril 2014). Lima, Perú. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- (27) Ministerio de Transporte. Instituto Nacional de Vías. (2022). Normas de ensayo para materiales de carretera I.N.V. E-749: Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas. Bogotá, Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- (28) Ministerio de Transporte. Instituto Nacional de Vías. (2022). Normas de ensayo para materiales de carretera I.N.V. E-256: ODULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS. Bogotá, Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- (29) Meza Soto, M. J. (2008). Aplicación de la Guía de Diseño de Pavimentos Flexibles AASHTO 2002 a las Condiciones Colombianas (Tesis de grado). Universidad del Cauca, Colombia.
- (30) Ministerio de transporte. Ministerio de Transporte. Instituto Nacional de Vías. (2022). Normas de ensayo para materiales de carretera I.N.V. E-159: Módulo resiliente de suelos y agregados. Bogotá, Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- (31) Menéndez Acurio Jose R. (2013). Ingeniería de pavimentos. Materiales y variables de diseño. Instituto de la construcción y gerencia. Tomo 1. Perú.
- (32) Ministerio de Vivienda y Urbanismo, División de Estudio y Fomento Habitacional. (2016). Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obra de Pavimentación. Santiago, Chile
- (33) Ministerio de Obras públicas y Transporte (2009). Resolución 1782 de (Mayo 8 de 2009). En A. U. (ministro de transporte), “Por la cual se modifica el artículo 8 ( peso bruto vehicular( de la resolución 4100 del 28 de Diciembre de 2004” (págs. 1 y siguientes decretos 2053 de 2003 ley 105 (1993), Bogotá: secretaria General Alcaldía Mayor de Bogotá”
- (34) Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2008). Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Lima, Perú

- (35) NCHRP. (2004). Guía para el diseño de pavimentos mecanístico-empíricos (MEPDG). Informe de investigación NCHRP 1-37A. Washington, D.C.: National Cooperative Highway Research Program.
- (36) National Cooperative Highway Research Program. (2013). NCHRP 1-28A: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice (2nd ed.). Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- (37) NCHRP. (1992). Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras (NCHRP), en colaboración con la Universidad de Cambridge, patrocinado por AASHTO en cooperación con la Federal Highway Administration de Estados Unidos.
- (38) Powell, W. D., Potter, J. F., Mayhew, H. C., & Nunn, M. E. (1984). The Structural Design of Bituminous Roads. TRRL Laboratory Report LR1132. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, United Kingdom.
- (39) Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2012). Catálogo de secciones estructurales de pavimentos para las carreteras de la República Mexicana. Ciudad de México: Dirección General de Desarrollo Carretero y de Conservación de Carreteras.
- (40) Shell International Petroleum Company Limited. (1978). SHELL Pavement Design Manual. London.
- (41) SHELL International petroleum Company Limited, Bisar 3.0 Program. London 1998.
- (42) Sobel M. A. Lerner N. & Palmas Velasco O. (2006). Precalculo Precálculo (6. ed.). Pearson Education.
- (43) Secretaria de Comunicaciones y transporte (1988). Análisis de los coeficientes de daño unitarios correspondientes a los vehículos autorizados en la red nacional de carreteras mexicanas. Publicación técnica No5. Queretaro, Qro. Instituto Mexicano del transporte.
- (44) Transport Research Laboratory (2022). Road Note 3: A Guide to the Structural Design of Surfaced Roads in Tropical and Sub-Tropical Regions. Fifth Edition. United Kingdom: Fpreign, Commonwealth & Development Center
- (45) Universidad del Cauca. Instituto de Posgrado en Vías e Ingeniería Civil. (1987). "Estudio del factor daño que producen los vehículos comerciales sobre el pavimento." ,Popayán , Cauca

- (46) Universidad del Cauca. Instituto Nacional de Vías. (2004.) "Estudio sobre volúmenes de tránsito, pesaje y seguridad vial en carreteras por las cuales se movilizan vehículos que transportan caña de azúcar y bagazo de caña de azúcar, en jurisdicción de las regionales Valle del Cauca, Cauca y Risaralda del INVIAS."
- (47) Universidad del Cauca. ASOCAÑA. (2011). "Contrato de prestación de servicios inmateriales, suscrito entre la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia - ASOCAÑA y la UNIVERSIDAD DEL CAUCA."
- (48) Universidad del Cauca. ASOCAÑA. (2017). "Estudio sobre tránsito, seguridad vial y factor daño de la estructura de pavimentos en carreteras por las cuales se movilizan vehículos que transportan caña de azúcar y bagazo de caña de azúcar, en la red vial de los departamentos del Valle del Cauca, Cauca y Risaralda."
- (49) Universidad del Cauca. ASOCAÑA. (2013). "Estudio sobre tránsito, evaluación de pontones y factor daño de la estructura de pavimentos, en carreteras por las cuales se movilizan vehículos que transportan caña de azúcar en la red vial del departamento del Meta."
- (50) Van der Poel, C., Rolt, J., and Vansteenkiste, S. (2016). A design methodology for asphalt pavements with interlayers. *Road Materials and Pavement Design*, 17(2), 292-307.
- (51) Vásquez Monteros, C. J. (2016). Factores de equivalencia de daño en pavimentos flexibles: análisis para condiciones típicas de Argentina (Tesis de maestría). Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- (52) Valle Rodas, R. (1976). *Carreteras, calles y aeropistas: Principios generales de la mecánica de suelos aplicados a la pavimentación y métodos para el cálculo de pavimentos flexibles* (6. edición). Buenos Aires, Argentina: El Ateneo.
- (53) WESLEA. Waterways Engineering Station Elastic Layer Analysis Pavement Suite, . for Windows Version 3.0 (1999) developed by David Timm et al.
- (54) WinJULEA (Windows Jacob Uzan Layered Elastic Analysis) developed by Dr. Jacob Uzan, Technion University Israel.

(55) Witczak, M. W., Uzan, J., & Marasteanu, M. O. (1999). A Mechanistic-empirical approach to pavement design for tropical conditions. National Cooperative Highway Research Program, Report 426. Washington, D.C.: Transportation Research Board.