



**ESTIMACIÓN DE MÓDULOS DE MATERIALES GRANULARES Y
FACTORES CAMIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE
METODOLOGÍA RACIONAL MEPDG**

KAREN FANDIÑO CASTRO

ÁNGELA VARGAS CAICEDO

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2022

**ESTIMACIÓN DE MÓDULOS DE MATERIALES GRANULARES Y
FACTORES CAMIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE
METODOLOGÍA RACIONAL MEPDG**

KAREN FANDIÑO CASTRO

ÁNGELA VARGAS CAICEDO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Civil

Director

ING. JUAN MIGUEL SÁNCHEZ DURÁN

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Ing. Juan Miguel Sánchez Durán

Jurado 1

Jurado 2

Bogotá D.C., octubre de 2022

Agradecimientos

Agradecemos a nuestro director de proyecto de grado el Ingeniero Juan Miguel Sánchez Durán, por su incondicional compromiso y entrega durante todo el desarrollo de esta investigación. A los demás docentes pertenecientes a la facultad de Ingeniería Civil, quienes durante toda la carrera nos aportaron grandes enseñanzas para nuestra vida profesional. Y especialmente a nuestras familias por todo el apoyo que siempre nos han dado para alcanzar nuestras metas.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	3
3.	MARCO TEÓRICO.....	4
3.1	Diseño de pavimentos por metodología racional.....	4
3.2	Diseño de pavimentos por metodología MEPDG.....	5
3.3	Variables de entrada.....	7
3.4	Indicadores de desempeño	9
3.5	Niveles de precisión del análisis	10
3.6	Materiales granulares de base y subbase.....	11
3.7	Daños en el pavimento flexible.....	17
3.8	Módulo resiliente	18
3.9	Modelo de agrietamiento por fatiga.....	21
3.10	Modelo de Ahuellamiento SHELL Modificado.....	22
3.11	Caracterización del tránsito de diseño	23
3.12	Cargas máximas legales y distribución de peso por eje para vehículos comerciales	24
3.13	Factor Camión.....	26
3.14	Espectro de carga	27
3.15	Rangos de tránsito.....	28
3.16	Cartas de diseño	29
3.17	Software WinJulea.....	33
4.	METODOLOGÍA.....	34
4.1	Características de entrada.....	34
4.2	Módulo inicial de las mezclas asfálticas	35
4.3	Módulo inicial de los materiales granulares	39
4.4	Cálculo de módulos en materiales granulares.....	42
4.5	Subdivisión de la estructura	42
4.6	Cargas.....	43

4.7	Área de contacto.....	44
4.8	Dirección de esfuerzos	44
4.9	Ajustes Modelo $K_1 - K_3$	45
4.10	Coefficiente Presión de tierras en reposo	47
4.11	Obtención de esfuerzos	48
4.12	Obtención de módulos	48
4.13	Cálculo de deformaciones actuantes	50
4.14	Parámetros de entrada	50
4.15	Presión de inflado.....	51
4.16	Cargas por eje.....	52
4.17	Puntos de evaluación.....	53
4.18	Obtención de deformaciones actuantes.....	57
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	59
5.1	Variación de los módulos de granulares obtenidos con los estructuras y materiales de los manuales INVÍAS 2017 y 2018.....	59
5.2	FECE por Agrietamiento en la Capa Asfáltica	70
5.3	FECE por Ahuellamiento en la Subrasante.....	78
6.	CONCLUSIONES	86
7.	BIBLIOGRAFÍA	89
ANEXOS		

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores típicos de la relación de Poisson μ	5
Tabla 2. Tipos de capas granulares.	12
Tabla 3. Uso típico de las diferentes clases de base granular.	13
Tabla 4. Requisitos de los agregados para bases granulares.	13
Tabla 5. Franjas granulométricas del material de base granular.	14
Tabla 6. Uso típico de las diferentes clases de subbase granular	15
Tabla 7. Requisitos de los agregados para subbases granulares.	16
Tabla 8. Franjas granulométricas del material de subbase granular.	16
Tabla 9. Cargas máximas por tipo de eje vigentes en Colombia.	25
Tabla 10. Rangos de tránsito considerados.....	29
Tabla 11. Carta de Diseño N°2 para R ₂ -S ₁ -T ₁	30
Tabla 12. Carta de Diseño N°2 para R ₂ -S ₁ -T ₅	30
Tabla 13. Carta de Diseño N°2 para R ₂ -S ₅ -T ₁	31
Tabla 14. Carta de Diseño N°2 para R ₂ -S ₅ -T ₅	31
Tabla 15. Carta de Diseño N°6 para R ₆ -S ₁ -T ₁	31
Tabla 16. Carta de Diseño N°6 para R ₆ -S ₁ -T ₅	32
Tabla 17. Carta de Diseño N°6 para R ₆ -S ₅ -T ₁	32
Tabla 18. Carta de Diseño N°6 para R ₆ -S ₅ -T ₅	32
Tabla 19. Materiales para cada tránsito de estudio, Manual Invías 2017	34
Tabla 20. Materiales para cada tránsito de estudio, Manual Invías 2018	34
Tabla 21. Variables para cada estructura de estudio.....	35
Tabla 22. Frecuencias de diseño	37
Tabla 23. Módulos iniciales para Mezcla Asfáltica.....	38
Tabla 24. Correlaciones para módulos iniciales en materiales granulares	39
Tabla 25. Módulos resilientes iniciales para cada capa	40
Tabla 26. Ajustes del modelo K ₁ -K ₃ para bases granulares	46
Tabla 27. Ajustes del modelo K ₁ -K ₃ para subbases granulares	46
Tabla 28. Pesos unitarios para cada capa.....	47

Tabla 29. Valores de parámetros para análisis de agrietamiento.	51
Tabla 30. Valores de presión de contacto de inflado según eje	52
Tabla 31. Factor de Equivalencia de Carga por Eje por Agrietamiento – Manual 2017	71
Tabla 32. Factor de Equivalencia de Carga por Eje por Agrietamiento – Manual 2018.....	75
Tabla 33. Factor de Equivalencia de Carga por Eje por Ahuellamiento – Manual 2017	79
Tabla 34. Factor de Equivalencia de Carga por Eje por Ahuellamiento – Manual 2018	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Software WinJulea	33
Figura 2. Curvas Isotérmicas	38
Figura 3. Subdivisión de las estructuras para materiales granulares	43
Figura 4. Dirección de esfuerzos	45
Figura 5. Esfuerzos obtenidos por el Software WinJulea.....	49
Figura 6. Puntos de evaluación eje SRS	53
Figura 7. Puntos de evaluación eje SRD.....	54
Figura 8. Análisis de daños de cargas para eje tándem	55
Figura 9. Puntos de evaluación eje TRD	55
Figura 10. Análisis de daños de cargas para eje trídem.....	56
Figura 11. Puntos de evaluación TrRD.....	56
Figura 12. Deformaciones actuantes para el eje de referencia de 8.2 ton.....	58
Figura 13. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras R ₂ Tamb = 14°C. Manual 2017	59
Figura 14. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras R ₂ Tamb = 14°C. Manual 2018	60
Figura 15. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras R ₆ Tamb = 30°C. Manual 2017	60
Figura 16. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras R ₆ Tamb = 30°C. Manual 2018	61
Figura 17. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras T1 – NESE=1.000.000. Manual 2017.....	64
Figura 18. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras T1 – NESE=1.000.000. Manual 2018.....	64
Figura 19. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras T5 – NESE=10.000.000. Manual 2017	65
Figura 20. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras T5 – NESE=10.000.000. Manual 2018.....	65
Figura 21. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras S1 – Mr = 5077 Psi (35 MPa). Manual 2017	67

Figura 22. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras S1 – Mr = 5077 Psi (35 MPa). Manual 2018	68
Figura 23. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras S5 – Mr = 10155 Psi (70 MPa). Manual 2017	68
Figura 24. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras S5 – Mr = 10155 Psi (70 MPa). Manual 2018	69
Figura 25. FECE Agrietamiento – Eje Simple Rueda Simple, Manual 2017.....	72
Figura 26. FECE Agrietamiento – Eje Simple Rueda Doble, Manual 2017	73
Figura 27. FECE Agrietamiento – Eje Tándem Rueda Doble, Manual 2017	74
Figura 28. FECE Agrietamiento – Eje Trídem Rueda Doble, Manual 2017	74
Figura 29. FECE Agrietamiento – Eje Simple Rueda Simple, Manual 2018.....	76
Figura 30. FECE Agrietamiento – Eje Simple Rueda Doble, Manual 2018	77
Figura 31. FECE Agrietamiento – Eje Tándem Rueda Doble, Manual 2018	77
Figura 32. FECE Agrietamiento – Eje Trídem Rueda Doble, Manual 2018.....	78
Figura 33. FECE Ahuellamiento – Eje Simple Rueda Simple, Manual 2017	80
Figura 34. FECE Ahuellamiento - Eje Simple Rueda Doble, Manual 2017	81
Figura 35. FECE Ahuellamiento – Eje Tándem Rueda Doble, Manual 2017.....	81
Figura 36. FECE Ahuellamiento – Eje Trídem Rueda Doble, Manual 2017	82
Figura 37. FECE Ahuellamiento – Eje Simple Rueda Simple, Manual 2018.....	84
Figura 38. FECE Ahuellamiento – Eje Simple Rueda Doble, Manual 2018.....	84
Figura 39. FECE Ahuellamiento – Eje Tándem Rueda Doble, Manual 2018.....	85
Figura 40. FECE Ahuellamiento – Eje Trídem Rueda Doble, Manual 2018	85

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Módulo resiliente	19
Ecuación 2. Esfuerzo Octaédrico.....	20
Ecuación 3. Modelo de agrietamiento AASHTO 2008	21
Ecuación 4. Modelo de ahuellamiento SHELL	23
Ecuación 5. FEC	27
Ecuación 6. Factor daño por vehículo comercial.....	27
Ecuación 7. Frecuencia de diseño.....	36
Ecuación 8. Tiempo total de aplicación de la carga	36
Ecuación 9. Área de contacto	44
Ecuación 10. Coeficiente de presión de tierras.....	48

GLOSARIO

Base: Es la capa granular ubicada bajo la carpeta asfáltica, su función principal es absorber los esfuerzos horizontales generados en la fibra inferior de la carpeta asfáltica. Se compone por un porcentaje de triturados, arena y una pequeña parte de material fino.

Carpeta Asfáltica: Compuesta por una mezcla de materiales pétreos seleccionados y bitumen, es la capa que recibe directamente las cargas vehiculares y efectos ambientales como la lluvia y radiación solar. Sirve como una capa impermeabilizante que protege las demás capas, y debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito.

CBR: Método de laboratorio utilizado para determinar un valor relativo de soporte de carga de los materiales. Corresponde a una cuantificación de la resistencia del suelo a la penetración, tomando como referencia a la piedra triturada. El valor de CBR se encuentra en función del contenido de agua, la densidad compactada y la textura del suelo en estudio.

Eje Simple: Se conoce también como eje sencillo, corresponde a aquel que no forma parte de un conjunto de ejes, se encuentra compuesto por una o dos llantas en cada extremo.

Eje Tándem: Se conoce también como eje doble, corresponde a aquel conjunto de dos ejes consecutivos del mismo vehículo, unidos mediante algún dispositivo mecánico o neumático y se encuentra compuesto por dos o cuatro llantas en cada extremo.

Eje Trídem: Es el conjunto de tres ejes consecutivos del mismo vehículo, unidos mediante algún dispositivo mecánico o neumático y se encuentra compuesto por tres o seis llantas en cada extremo.

Esfuerzo Cortante: Es aquel esfuerzo soportado en el sentido perpendicular respecto al eje principal de una estructura.

Esfuerzo Octaédrico: Es la representación del estado de esfuerzos cortantes, se obtiene realizando el promedio de los esfuerzos que actúan en las tres direcciones principales.

Módulo de elasticidad: Es la relación existente entre el esfuerzo y la deformación unitaria a la que está sometido un material. Este parámetro representa la rigidez del material ante una carga impuesta sobre el mismo.

Módulo resiliente: Es un parámetro que mide la capacidad de recuperación de un material ante esfuerzos repetitivos aplicados. Luego de cargas repetidas, el módulo llega a ser aproximadamente constante y el suelo puede asumirse como elástico.

Pavimento: Es la estructura vial formada por una o varias capas de materiales seleccionados construyéndose sobre la subrasante. Se caracteriza por resistir las cargas

impuestas por el tránsito y transmitir los esfuerzos y deformaciones tolerables al suelo de apoyo.

Sub-Base: Es la capa comprendida entre la subrasante y la base, cuyos materiales para su construcción son granulares, suelos estabilizados y escorias de alto horno; su función principal es disminuir la deformación de la estructura y resistir los esfuerzos transmitidos por las cargas de tránsito a través de las capas superiores.

Subrasante: Es el terreno natural que sirve como cimiento de una estructura de pavimento o la superficie final de explanación de una vía; su principal función es de resistirse a los esfuerzos y deformaciones producto de las cargas de tránsito.

ABREVIACIONES

AASHTO: Sigla en inglés para la American Association of State Highways and Transportation Officials.

CBR: Sigla en inglés del ensayo California Bearing Ratio.

FECE: Factores de Equivalencia de Carga por Eje.

MrD: Módulo resiliente de la subrasante para diseño.

MEPDG: Sigla en inglés para Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide.

NESE: Número de ejes simples equivalentes.

TMAP: Temperatura Media Anual Ponderada del Aire.

SRS: Eje simple de Rueda Sencilla

SRD: Eje simple de Rueda Doble

TRD: Eje Tándem de Rueda Doble

TrRD: Eje Trídem de Rueda Doble

1. INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica el uso de la metodología MEPDG es muy limitado y no es muy común que se implemente en el desarrollo de nuevos diseños de pavimentos. El concepto del modelo no ha sido adoptado como normatividad para diseño en Colombia, sin embargo, la metodología no es desconocida para los involucrados en las operaciones de la red vial, pues no es un secreto que la falta de recursos impide su aplicabilidad.

Actualmente en Colombia se diseñan estructuras de pavimento flexible a partir de la metodología AASHTO 86, donde se desconocen avances significativos los cuales podrían aportar a la obtención de un diseño más acorde a las circunstancias actuales. De todas maneras, persiste la necesidad de implementar otras alternativas para la conservación de las vías, pues en diferentes zonas del País, gracias a un incremento económico de varios sectores, ha aumentado el flujo de vehículos comerciales de carga generando un gran deterioro en los pavimentos y demás infraestructura vial.

Aunque son varios los factores que se imponen en la implementación del MEPDG, existen recientes investigaciones realizadas en Colombia donde se observa la efectividad del método en el diseño y rehabilitación de algunas vías.

Por consiguiente, aprovechando el trabajo realizado por la Universidad del Cauca para el INVIAS mediante la elaboración del Manual para Diseño de Pavimentos Asfálticos versión 2017 y 2018, se propone determinar el rango de valores de módulo en que efectivamente trabajan los materiales granulares en estructuras planteadas en las cartas de diseño del INVÍAS, y a la vez, establecer unos nuevos factores de camión (factores de equivalencia), con el fin de formular recomendaciones para que el diseño convencional (diseño con ejes equivalentes) pueda desarrollarse con parámetros actuales más consecuentes al estado del conocimiento, obteniendo estructuras más ajustadas y que seguramente tendrán un comportamiento mejor o por lo menos más aproximado a las condiciones del proyecto.

2. OBJETIVOS

2.1 General:

Estimar módulos de materiales granulares y factores camión en pavimentos flexibles para diferentes estructuras adaptando la metodología mecanístico – empírica (MEPDG) a la práctica actual de diseño en Colombia.

2.2 Específicos:

- Determinar el rango de valores de módulos en que trabajan los materiales granulares en estructuras del pavimento.
- Establecer nuevos factores camión (factores de daño) de una manera más real y adaptables a las características de los pavimentos en Colombia.
- Comparar los resultados obtenidos con los procedimientos y parámetros de diseño normalmente utilizados y formular conclusiones y recomendaciones tendientes a actualizarlos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Diseño de pavimentos por metodología racional

El método racional es una propuesta de diseño analítico el cual tiene en cuenta los estados de esfuerzo y deformación que influye en el comportamiento que se presentan en las capas que conforman el pavimento. Para calcular el esfuerzo y la deformación se requiere de software, donde se introducen las propiedades de los materiales como lo son el módulo elástico, relación de Poisson, espesor de las capas y demás, con el fin de determinar los estados de esfuerzos y deformación.

La metodología racional busca aplicar las teorías de multicapas para analizar el comportamiento, esto para determinar un diseño óptimo y durable del pavimento que se pretende construir, así mismo se requiere de unos datos de entrada como:

- Radio de carga
- Presión de contacto
- Espesor de capa
- Módulo elástico de cada capa
- Relación de Poisson

En la siguiente tabla se presenta los valores de la relación de Poisson que tradicionalmente en Colombia se han venido utilizando para el dimensionamiento de estructuras de pavimento flexible (Instituto Nacional de Vías, 2017):

Tabla 1. Valores típicos de la relación de Poisson μ ¹

Descripción del Material	μ típico
Base granular no ligada	0.40
Sub base granular no ligada	0.45

3.2 Diseño de pavimentos por metodología MEPDG

La guía de diseño de pavimentos mecanístico empírico (MEPDG) es la metodología más avanzada para el diseño de estructuras de pavimento. En el año 1986, surge la necesidad de tener una nueva guía de diseño de pavimentos basada en los conceptos mecanicistas, de esta manera, la “AASHTO Joint Task Force on Pavements”, la “Federal Highway Administration” y el “National Cooperative

¹ Datos tomados de “Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Altos y Medios Volúmenes de Tránsito” (Instituto Nacional de Vías, 2017)

Highway Research Program”, patrocinaron el desarrollo de un procedimiento de diseño M-E (Mecanicista – empírico) bajo el proyecto denominado NCHRP 1-37A. El objetivo principal del 1-37A fue el desarrollar una guía para el diseño y rehabilitación de pavimentos que estuviera basada en los modelos mecanicistas existentes y que reflejaran el estado del arte en la materia tanto para pavimentos flexibles y rígidos, dando como resultado la guía denominada MEPDG (Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide) (Hernández, Garnica, & Solorio, 2016)

La parte mecánica de la metodología se basa en los análisis de esfuerzos, deformaciones y deflexiones que presente el pavimento, pues estos resultados generan un daño que se irán acumulando e incrementando con el tiempo. Finalmente, la parte empírica es la que relacionará ese daño acumulado con los deterioros observados en los pavimentos.

Esta guía de diseño presenta un cambio radical a la forma tradicional del diseño de pavimentos, por ejemplo, se diferencia de la antigua AASHTO en que la MEPDG predice distintos indicadores del pavimento, proporcionando daños esperados que sufrirá la estructura; por lo tanto, el diseñador podrá generar acciones para extender la vida útil de la red vial. Por otra parte, la guía al realizar un proceso iterativo da como resultado deterioros y no espesores del pavimento.

3.3 Variables de entrada

Para proponer un diseño inicial o una rehabilitación del pavimento se debe tener en cuenta las siguientes variables de entrada del sitio:

Tránsito:

- Tránsito promedio diario
- % de camiones en el carril de diseño
- % de camiones en la dirección de diseño
- Velocidad de operación
- Crecimiento del tránsito de camiones
- Distribuciones de carga eje (simple, tándem, trídem)
- Distribución normalizada del volumen de camiones
- Configuraciones de carga por eje
- Factores de distribución mensual
- Factores de distribución por horarios
- Separación entre neumáticos duales
- Presión del neumático

Clima:

- Temperatura cada hora
- Precipitación
- Velocidad del viento
- Humedad relativa
- Nubosidad

Subrasante:

- Ensayos de clasificación
- Ensayos volumétricos
- Ensayos de resistencia

Con los anteriores datos de entrada, se obtendrá un diseño inicial que se debe someter a pruebas según factores iniciales, criterios de desempeño y valores de confiabilidad a través de la predicción de deterioros y de irregularidad.

3.4 Indicadores de desempeño

La guía de diseño toma en cuenta funciones de transferencia y ecuaciones de regresión para predecir los indicadores de desempeño considerados importantes en los sistemas de gestión de pavimentos, los cuales fueron calibrados usando la base de datos del LTPP (Long Term Pavement Performance). (Hernández, Garnica, & Solorio, 2016)

Los indicadores para pavimentos nuevos y sobre carpetas de concreto asfáltico que considera la guía son:

- Agrietamiento transversal
- Agrietamiento tipo piel de cocodrilo
- Agrietamiento longitudinal
- Roderas
- IRI

Los indicadores obtenidos deben compararse con los que se tengan considerados como referencia para aceptar o rechazar el modelo inicial. El IRI (International Roughness Index) se considera un elemento clave con respecto a la funcionalidad y seguridad. (Martínez Díaz & Pérez, 2015)

3.5 Niveles de precisión del análisis

El MEPDG permite al diseñador trabajar con tres diferentes niveles de precisión dependiendo de los requisitos de la vía, la conformidad económica e, incluso, el plazo del diseño. La elección de uno u otro nivel implica necesariamente calcular un número mayor o menor de entradas.

Nivel 1: Es el más preciso y, por lo tanto, el más fiable. Se utiliza en el caso de vías muy transitadas o para el análisis de áreas con alto nivel de problemas de seguridad. Requiere aproximadamente 100 entradas. Los datos de materiales se obtienen de pruebas, los datos de tráfico de la medición de estaciones y sistemas de "pesaje en movimiento" (WIM), y los datos de entradas climáticas de estaciones meteorológicas.

Nivel 2: Es el intermedio de precisión y el más utilizado para el diseño ordinario. Utiliza datos de agencias oficiales, correlaciones o estimaciones para determinar las entradas requeridas. Por ejemplo, las entradas de tráfico se calculan en función de datos oficiales y el módulo dinámico en función de los resultados de las pruebas realizado para aglutinantes y agregados o en otras propiedades mecánicas de la mezcla.

Nivel 3: Es el menos preciso. Se utiliza para el diseño de vías con poco tráfico. Los datos se seleccionan entre los valores predeterminados existentes a nivel nacional o regional. Por lo tanto, las mezclas se caracterizan con las propiedades físicas

generales que se supone que tienen con respecto a su tipo y aglutinante. Las cargas de tráfico se obtienen de una vía de similar categoría. (Martínez Díaz & Pérez, 2015)

3.6 Materiales granulares de base y subbase

Según la guía de Especificaciones de construcción del INVIAS, existen materiales granulares que se consideran adecuados al momento de construir un pavimento, donde éstos pueden ser implementados en las capas de base y subbase. Al construir un pavimento, las capas conformadas con material granular deberán tener un proceso de trituración de la roca o mezcla de suelo granular de calidad. Así mismo, el desempeño de cada capa dependerá de la fase sólida que corresponde a la granulometría, limpieza, propiedades de las partículas, forma, grado de compactación y esfuerzo de confinamiento.

El material granular en muchos casos depende de los cambios de humedad de la capa, el cual es generado dependiendo de la zona en que se esté ejecutando el proyecto, ya que en materiales muy arenosos o con demasiados finos, puede llegar a modificar los esfuerzos de confinamiento de la capa.

3.6.1 Especificaciones generales de las capas granulares para base y subbase

El INVIAS presenta en su manual del 2017 la siguiente tabla donde resume los tipos de capas granulares y los tipos de ensayos que se deberán realizar al material a utilizar para cada capa:

Tabla 2. Tipos de capas granulares.²

No		Tipo	Artículo INVIAS
1		A	
2	SBG – 50	B	320
3		C	
4		A	
5	SBG – 38	B	320
6		C	
7		A	
8	BG – 40	B	330
9		C	
10		A	
11	BG – 27	B	330
12		C	
13		A	
14	BG – 38	B	330
15		C	
16		A	
17	BG – 25	B	330
18		C	

3.6.2 Clasificación de bases granulares

En el artículo 330-13 del capítulo 3 del INVÍAS se definen tres clases de base granular en función de la calidad de los agregados (clase A, B y C). Las clases de

² Datos tomados de “Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Altos y Medios Volúmenes de Tránsito” (Instituto Nacional de Vías, 2017)

base granular se usarán como se indica en la tabla 2, en función del nivel de tránsito del proyecto. (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Tabla 3. Uso típico de las diferentes clases de base granular.³

Clase de Base Granular	Nivel del Tránsito
Clase C	NT1
Clase B	NT2
Clase A	NT3

En el mencionado artículo, se hace énfasis en que los agregados para la construcción de la base granular deben satisfacer requisitos de calidad como la realización de ensayos de dureza, durabilidad, limpieza, geometría de las partículas y resistencia del material. Para el entendimiento de este documento, vale resaltar los rangos de aceptación para la resistencia del material en la siguiente tabla:

Tabla 4. Requisitos de los agregados para bases granulares.⁴

Característica	Norma de ensayo INV	Base Granular		
		Clase C	Clase B	Clase A
Resistencia del material				
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado. El CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión.	E - 148	≥ 80	≥ 80	≥ 95

³ Datos tomados de “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, capítulo 3 Afirmados, Subbases y Bases” (Instituto Nacional de Vías, 2013)

⁴ Datos tomados de “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, capítulo 3 Afirmados, Subbases y Bases” (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Además de satisfacer requisitos de calidad, los agregados para la base granular se deben ajustar a algunas franjas granulométricas, por ejemplo, para niveles del tránsito NT3 se usarán bases granulares de gradación gruesa (*Instituto Nacional de Vías, 2013*). Por lo tanto, para las iteraciones de este proyecto se tendrá como referencia la base BG-40 para el NT3 y la base BG-38 para el NT2.

Tabla 5. Franjas granulométricas del material de base granular. ⁵

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm/ U:S Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.0	0.425	0.075
	1 ½"	1"	¾"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.200
% PASA								
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN GRUESA								
BG – 40	100	75-100	65-90	45-68	30-50	15-32	7-20	0-9
BG – 27	-	100	75-100	52-78	35-59	20-40	8-22	0-9
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN FINA								
BG – 38	100	70-100	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	5-15
BG – 25	-	100	70-100	50-80	35-65	20-45	10-30	5-15

⁵ Datos tomados de “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, capítulo 3 Afirmados, Subbases y Bases” (*Instituto Nacional de Vías, 2013*)

3.6.3 Clasificación de subbases granulares

En el artículo 320-13 del capítulo 3 del INVÍAS se definen tres clases de subbase granular en función de la calidad de los agregados (clase A, B y C). Las clases de subbase granular se usarán como se indica en la tabla 5, en función del nivel de tránsito del proyecto. (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Tabla 6. Uso típico de las diferentes clases de subbase granular

Clase de Subbase Granular	Nivel del Tránsito
Clase C	NT1
Clase B	NT2
Clase A	NT3

De acuerdo con el artículo mencionado, se hace énfasis en que los agregados para la construcción de la subbase granular deben satisfacer requisitos de calidad como la realización de ensayos de dureza, durabilidad, limpieza y resistencia del material. Para el entendimiento del desarrollo de este documento, vale resaltar los rangos de aceptación para la resistencia del material en la siguiente tabla:

Tabla 7. Requisitos de los agregados para subbases granulares.⁶

Característica	Norma de ensayo INV	Subbase Granular		
		Clase C	Clase B	Clase A
Resistencia del material				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo.	E - 148	30	30	40

Para la definición de la subbase granular, se deberá cumplir con las siguientes franjas granulométricas como lo sugiere el Invías:

Tabla 8. Franjas granulométricas del material de subbase granular.⁷

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm/ U:S Standard)								
	50	37.5	25.0	12.5	9.5	4.75	2.0	0.425	0.075
	2"	1 ½"	1"	1/2"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.200
	% PASA								
SBG – 50	100	70-95	60-90	45-75	40-70	25-55	15-40	6-25	2-15
SBG – 38	-	100	75-95	55-85	45-75	30-60	20-45	8-30	2-15

⁶ Datos tomados de “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, capítulo 3 Afirmados, Subbases y Bases” (Instituto Nacional de Vías, 2013)

⁷ Datos tomados de “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, capítulo 3 Afirmados, Subbases y Bases” (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Según la información de la tabla 7, para las iteraciones de este proyecto se tendrá como referencia la subbase SBG – 50 para los niveles de tránsito NT2 y NT3.

3.7 Daños en el pavimento flexible

Una estructura de pavimento flexible puede presentar diferentes tipos de daño, los cuales pueden ser clasificados como: fisuras, deformaciones, pérdida de capas estructurales, entre otros. Durante el desarrollo de esta investigación, el interés se enfoca en conocer el daño en la fibra inferior de la capa asfáltica y la deformación vertical en la subrasante.

3.7.1 Agrietamiento

Corresponde a discontinuidades en la carpeta asfáltica, en la misma dirección del tránsito o transversales a él. Este tipo de daño es indicio de la existencia de esfuerzos de tensión en alguna de las capas de la estructura, los cuales han superado la resistencia del material afectado. (Universidad Nacional de Colombia, 2006). La categoría del daño por agrietamiento, se encuentran las grietas longitudinales, grietas transversales, fisuras y piel de cocodrilo.

3.7.2 Ahuellamiento

Es la depresión superficial de la estructura de un pavimento flexible, que se produce en la trayectoria longitudinal, sobre las zonas de canalización del tránsito,

como resultado de la deformación plástica permanente en la capa del pavimento. (Instituto Nacional de Vías, 2018).

3.8 Módulo resiliente

Se conoce como deformaciones resilientes o deformaciones elásticas que tienen una recuperación instantánea y suelen denominarse plásticos aquellos materiales que permanecen en el pavimento luego de que causara una deformación. De esta manera, se puede decir que un material granular resiliente es aquel que tiene la posibilidad de recuperarse de forma repetitiva ante las cargas aplicadas. El módulo resiliente se puede obtener por medio de ensayos de laboratorio, como lo es el de CBR y por estimaciones de las características mecánicas de la subrasante y el espesor de la capa granular.

Las metodologías actuales para diseño de pavimentos consideran que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales constitutivos de la sección de una carretera o aeropista, es el parámetro denominado Módulo de Resiliencia. (Instituto Mexicano del Transporte, 2001)

3.8.1 Módulo resiliente en laboratorio

El módulo resiliente ha sido muy utilizado para caracterizar la relación no lineal entre el esfuerzo y la deformación de un suelo sometido a una sollicitación de carga cíclica. Por esta razón, se han desarrollado diferentes modelos constitutivos

que pretenden modelar el módulo resiliente de los suelos y agregados (Instituto Nacional de Vías, 2017).

La obtención del módulo es aplicable para vías que se caracterizan con tránsito alto donde se necesite conocer el desempeño mecánico de las capas granulares. Se tendrá como base la realización del ensayo de laboratorio acorde a los procedimientos técnicos del INVIAS según la norma INV E-156 del año 2013. Como resultado de un ensayo triaxial dinámico, se obtiene un modelo que representa la ecuación constitutiva del material, en función de los estados de esfuerzos a los que estará sometido el material granular, y el cual tiene la siguiente ecuación (Instituto Nacional de Vías, 2018):

$$M_r = K_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{K_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{K_3}$$

Ecuación 1. Módulo resiliente

Donde:

M_r : Módulo resiliente, en psi.

θ : Invariante de esfuerzos= $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

σ_1 : Esfuerzo principal mayor.

σ_2 : Esfuerzo principal intermedio.

σ_3 : Esfuerzo principal menor o presión de confinamiento o de cámara.

τ_{oct} : Esfuerzo de corte octaédrico, que se obtiene con la siguiente ecuación:

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

Ecuación 2. Esfuerzo Octaédrico

P_a : Presión atmosférica.

K_1 , K_2 y K_3 : Constantes de regresión, que dependen del material analizado y son obtenidas del ajuste de datos del ensayo al modelo de la ecuación del módulo resiliente.

3.8.2 Modelo $K_1 - K_3$

El modelo $K_1 - K_3$ también se conoce como modelo universal el cual incluye el esfuerzo cortante octaédrico (τ_{oct}) en lugar del desviador. Este cambio proporciona mayor información acerca del cambio en los esfuerzos normales y de corte durante el ensayo, adicionalmente se ha encontrado que describe muy bien el comportamiento tanto de suelos granulares como finos. Las constantes de ajuste en este modelo indican que el módulo crece proporcional a los esfuerzos totales cuando el coeficiente K_2 es positivo, y cuando el K_3 es negativo el módulo decrece conforme se incrementa el esfuerzo de corte octaédrico (τ_{oct}) (Instituto Nacional de Vías, 2017). El último párrafo descrito sobre el significado de las constantes de ajuste, podrá influir en las conclusiones de este trabajo sobre los módulos obtenidos bajo el modelo Universal.

3.9 Modelo de agrietamiento por fatiga

La guía de diseño mecánico – empírica, considera dos tipos de fisuras relacionadas con la carga, las fisuras tipo piel de cocodrilo y las fisuras longitudinales. Se asume que las fisuras tipo piel de cocodrilo se inician en la parte inferior de las capas asfálticas y se propagan a la superficie con el continuo tránsito de las cargas, mientras que las fisuras longitudinales se inician en la superficie de la capa asfáltica (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008).

El número permitido de repeticiones de carga por eje necesario para el enfoque del índice de daño incremental para predecir ambos tipos de fisuras relacionadas con la carga es la siguiente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

$$N_f = 0.00432 * 18.4 * k_{f1} * (C) * (C_H) * \beta_{f1} * (\epsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}} * (E_{CA})^{k_{f3}\beta_{f3}}$$

Ecuación 3. Modelo de agrietamiento AASHTO 2008

Donde:

N_f : Número admisible de repeticiones de carga para causar el agrietamiento por fatiga.

E_{CA} : Módulo dinámico de la mezcla asfáltica, en Psi.

k_{f1} , k_{f2} , k_{f3} : Parámetros de calibración global en campo $k_{f1}=0.007566$, $k_{f2}=-3.9492$, $k_{f3}=-1.281$.

β_{f1} , β_{f2} , β_{f3} : Constantes de calibración de campo específica local o específicas de la mezcla; estas constantes se asumen con un valor igual a 1,0.

ϵ_t : Deformación unitaria de tracción en los puntos críticos y calculada por el modelo de respuesta, en pulg/pulg.

V_b : porcentaje de asfalto efectivo en volumen de la mezcla asfáltica, (%)

V_a : Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica

$$M: 4.84 \left[\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right]$$

C_H : Factor de corrección de espesor dependiente del tipo de fisuramiento (piel de cocodrilo o longitudinal).

C : 10^M

3.10 Modelo de Ahuellamiento SHELL Modificado

El método SHELL establece como criterios básicos para el diseño estructural el control del agrietamiento de las capas asfálticas y el control del ahuellamiento de la subrasante, para lo cual utiliza la determinación de las siguientes solicitaciones (Instituto Nacional de Vías, 2017):

a) Deformación unitaria por tracción ϵ_t en la fibra inferior de las capas asfálticas para el control del agrietamiento.

b) Deformación unitaria vertical por compresión en la fibra superior de la subrasante ϵ_z para el control de la deformación de la subrasante.

Para el control del ahuellamiento en este proyecto se utilizará la siguiente expresión correspondientes a un nivel de confiabilidad del 85%:

$$N_z = 1.94 * 10^{-7} (\epsilon_z)^{-4}$$

Ecuación 4. Modelo de ahuellamiento SHELL

donde:

N_z : Número de repeticiones de carga por eje admisibles para el control del ahuellamiento

ϵ_z : Deformación vertical por compresión de la subrasante del modelo en análisis

3.11 Caracterización del tránsito de diseño



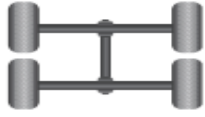
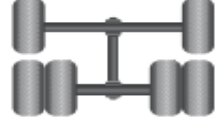
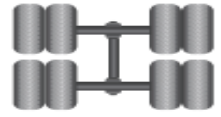

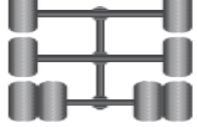
La variable del tránsito es fundamental para el análisis y el diseño de cualquier estructura de pavimento. Al realizar una correcta estimación, se podrá obtener estructuras capaces según lo proyectado por el diseñador.

Para la determinación del tránsito en el diseño de pavimentos asfálticos, se debe tener presente algunos aspectos cuantificados como el tránsito promedio diario (TPD), valores de cargas máximas legales de vehículos comerciales, factores de equivalencia de carga para cada tipo de vehículo, espectro de carga, entre otras más. Con la información suministrada, se procede a realizar los análisis de proyección del tránsito manejando periodos de 10 a 15 años.

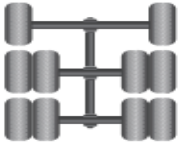
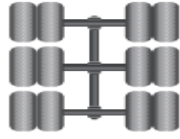
3.12 Cargas máximas legales y distribución de peso por eje para vehículos comerciales

Los vehículos transmiten sus cargas a la estructura de pavimento a través de sus ejes y éstos inducen esfuerzos tanto mayores cuanto más considerables sean las cargas. El Ministerio de Transporte ha reglamentado las cargas máximas legales de los vehículos de carga que operan en el país. En la siguiente tabla se presentan las cargas máximas por tipo de eje vigentes en Colombia (Instituto Nacional de Vías, 2017).

Tabla 9. Cargas máximas por tipo de eje vigentes en Colombia.⁸

Sistema de Eje	Configuración del sistema	Peso Máximo por eje kg	Configuración
Sencillo	Dos Ruedas	6000	
	Cuatro Ruedas	11000	
Tándem	Cuatro Ruedas	11000	
	Seis Ruedas	17000	
	Ocho Ruedas	22000	
Trídem	Seis Ruedas	16500	
	Ocho Ruedas	19000	

⁸ Datos tomados de “Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Altos y Medios Volúmenes de Tránsito” (Instituto Nacional de Vías, 2017)

Diez Ruedas	21500	
Doce Ruedas	24000	

3.13 Factor Camión

En términos de ejes equivalentes, el factor camión se basa en las cargas transmitidas por las diversas convergencias de los vehículos, como una carga patrón en el carril y periodo de diseño. El factor camión (FC) se conoce como la suma de los factores de daño de cada eje de un vehículo comercial que tenga dos o más ejes.

3.13.1 Cuantificación utilizando el método Mecanístico – Empírico

Para la determinación del factor equivalente de carga de un eje en específico, se aplica el método mecanicista el cual permite calcular esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en diferentes puntos de la estructura. El factor equivalente de carga es determinado por la siguiente expresión:

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

Ecuación 5. FEC

3.13.2 Factor Daño por Vehículo Comercial

Es el índice indicado por el número de ejes equivalentes de 80 kN que actúan en una estructura de pavimento, el cual se puede obtener por la recolección de factores de carga equivalente de cada eje que corresponde a las características técnicas de cada vehículo.

$$FDV = \sum_{i=1}^n FEC_i$$

Ecuación 6. Factor daño por vehículo comercial

Donde:

FDV: Factor Daño por vehículo comercial

FEC_i: Factores de Equivalencia de Carga de cada eje del vehículo.

n: Número de ejes del vehículo

3.14 Espectro de carga

Es la representación de la distribución de las frecuencias de carga para cada tipo de eje y vehículo, lo cual permite determinar el número de repeticiones de carga de cada rango en el carril de diseño.

Para la determinación de los espectros de carga se debe tener la información del pesaje de diversos vehículos de los cuales se tiene los siguientes indicadores:

- Clase o sistemas de eje
- Rangos de carga por sistema de eje
- Valor medio del rango de cargas o marcas de clase y desviación estándar
- Magnitud de carga representativa del rango
- Frecuencia de repeticiones de carga

3.15 Rangos de tránsito

Considerando el Manual de Pavimentos Asfálticos en vías con Medios y Altos volúmenes de tránsito según versiones de los años 2017 y 2018, se estipularon los siguientes rangos de tránsito expresando el número de ejes equivalentes de 80 kN, que circulan en el carril de diseño durante la etapa de diseño:

Tabla 10. Rangos de tránsito considerados⁹

Designación de Rangos de Tránsito	Rangos de Tránsito en Ejes Equivalentes
T1	$500.000 < N \leq 1.000.000$
T2	$1.000.000 < N \leq 2.000.000$
T3	$2.000.000 < N \leq 3.500.000$
T4	$3.500.000 < N \leq 5.000.000$
T5	$5.000.000 < N \leq 10.000.000$
T6	$10.000.000 < N \leq 15.000.000$
T7	$15.000.000 < N \leq 20.000.000$
T8	$20.000.000 < N \leq 30.000.000$
T9	$30.000.000 < N \leq 40.000.000$

3.16 Cartas de diseño

Como datos de entrada para dar inicio a las iteraciones y obtención de los módulos para materiales granulares, se tiene como referencia las cartas de diseño número 2 y 6 del Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y

⁹ Datos tomados de "Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito" (Instituto Nacional de Vías, 2017)

Altos Volúmenes de Tránsito de los años 2017 y 2018. De acuerdo con la temperatura media anual promedio del aire (TMAP) de 14 y 30°C, el Módulo resiliente de la subrasante de diseño (MrD) de 35 y 70 MPa y el tránsito de 1 y 10 millones en ejes equivalentes, se obtiene las siguientes estructuras para la capa asfáltica, base granular y sub base granular:

Tabla 11. Carta de Diseño N°2 para $R_2-S_1-T_1$ ¹⁰

Temperatura	MrD	Estructura (cm)	Capas
14 °C	35 MPa	10	CA
		20	BG
		30	SBG

Tabla 12. Carta de Diseño N°2 para $R_2-S_1-T_5$ ¹¹

Temperatura	MrD	Estructura (cm)	Capas
14 °C	35 MPa	18	CA
		20	BG
		30	SBG

¹⁰ Datos tomados de “Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito” (Instituto Nacional de Vías, 2017)

¹¹ Datos tomados de “Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito” (Instituto Nacional de Vías, 2017)

Tabla 13. Carta de Diseño N°2 para $R_2-S_5-T_1$ ¹²

Temperatura	MrD	Estructura (cm)	Capas
14 °C	70 MPa	9	CA
		15	BG
		20	SBG

Tabla 14. Carta de Diseño N°2 para $R_2-S_5-T_5$ ¹³

Temperatura	MrD	Estructura (cm)	Capas
14 °C	70 MPa	16.5	CA
		20	BG
		25	SBG

Tabla 15. Carta de Diseño N°6 para $R_6-S_1-T_1$ ¹⁴

Temperatura	MrD	Estructura (cm)	Capas
30 °C	35 MPa	14.5	CA
		20	BG
		35	SBG

¹² Datos tomados de "Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito" (Instituto Nacional de Vías, 2017)

¹³ Datos tomados de "Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito" (Instituto Nacional de Vías, 2017)

¹⁴ Datos tomados de "Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito" (Instituto Nacional de Vías, 2017)

Tabla 16. Carta de Diseño N°6 para $R_6-S_1-T_5$ ¹⁵

Temperatura	MrD	Estructura (cm)	Capas
30 °C	35 MPa	20	CA
		30	BG
		35	SBG

Tabla 17. Carta de Diseño N°6 para $R_6-S_5-T_1$ ¹⁶

Temperatura	MrD	Estructura (cm)	Capas
30 °C	70 MPa	13.5	CA
		15	BG
		15	SBG

Tabla 18. Carta de Diseño N°6 para $R_6-S_5-T_5$ ¹⁷

Temperatura	MrD	Estructura (cm)	Capas
30 °C	70 MPa	20	CA
		20	BG
		25	SBG

¹⁵ Datos tomados de "Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito" (Instituto Nacional de Vías, 2017)

¹⁶ Datos tomados de "Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito" (Instituto Nacional de Vías, 2017)

¹⁷ Datos tomados de "Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito" (Instituto Nacional de Vías, 2017)

3.17 Software WinJulea

El programa elástico multicapa desarrollado por Jacob Uzan es conocido por su abreviación WinJulea (Windows Jacob Uzan Layered Elastic Analysis) el cual funciona como una plataforma de análisis para una estructura de pavimento flexible. Al ingresar los datos de entrada como el espesor de cada capa, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, condiciones de carga, entre otros, se obtienen valores de esfuerzos y deformaciones para ser analizados posteriormente. El Software WinJulea permite modelar estructuras de pavimento compuestas máximo por 16 capas y 100 puntos de interés, así mismo, puede arrojar respuestas mecánicas de gran interés como esfuerzos normales, esfuerzos octaédricos y deformaciones en tres direcciones (x, y, z).

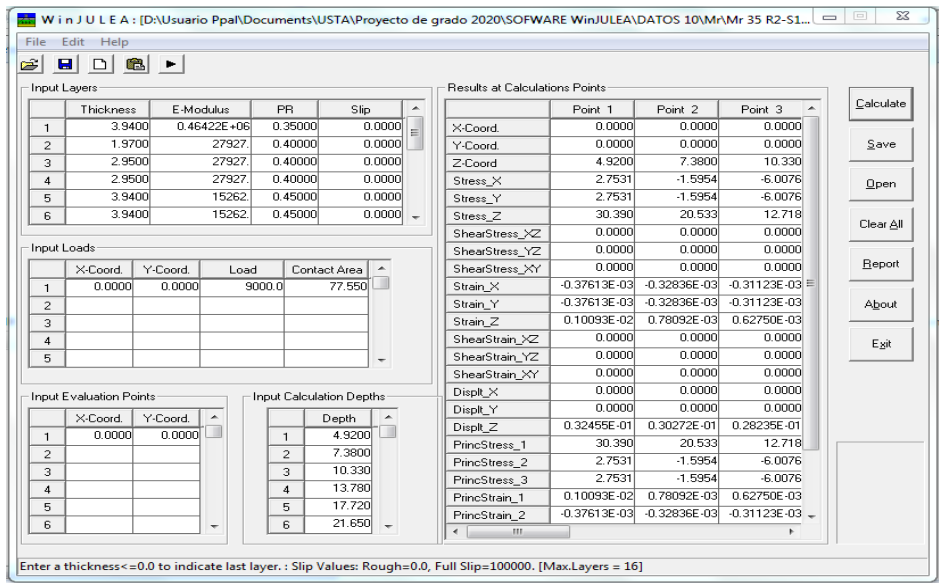


Figura 1. Software WinJulea

4. METODOLOGÍA

4.1 Características de entrada

Las estructuras de estudio definidas para el desarrollo de este proyecto se contemplaron bajo la guía de los manuales del INVÍAS 2017 y 2018. Para ambos casos, se tomó como referencia inicial las estructuras de pavimento planteadas en las cartas de diseño consignadas en el capítulo 2 de este documento.

Antes de dar inicio al proceso iterativo, se establecen las características de tránsito, temperatura, subrasante y materiales que tendrá cada caso de estudio:

Tabla 19. Materiales para cada tránsito de estudio, Manual Invías 2017

Nivel de tránsito	NEE	Base Granular		Subbase Granular	
NT2	1.000.000	BG 38B	CBR 80%	SBG 50 B	CBR 30%
NT3	10.000.000	BG 40A	CBR 95%	SBG 50 A	CBR 40%

Tabla 20. Materiales para cada tránsito de estudio, Manual Invías 2018

Nivel de tránsito	NEE	Base Granular		Subbase Granular	
NT2	1.000.000	BG 25B	CBR 80 %	SBG 38 B	CBR 30%
NT3	10.000.000	BG 25A	CBR 95 %	SBG 38 A	CBR 40 %

Tabla 21. Variables para cada estructura de estudio

Nombre	Temp	Temp	Subrasante	Subrasante	Tránsito	Tránsito
	14° C	30° C	35MPa	70MPa	1.000.000	10.000.000
	R ₂	R ₆	S ₁	S ₅	T ₁	T ₅
R ₂ S ₁ T ₁	X		X		X	
R ₂ S ₁ T ₅	X		X			X
R ₂ S ₅ T ₁	X			X	X	
R ₂ S ₅ T ₅	X			X		X
R ₆ S ₁ T ₁		X	X		X	
R ₆ S ₁ T ₅		X	X			X
R ₆ S ₅ T ₁		X		X	X	
R ₆ S ₅ T ₅		X		X		X

Las ocho estructuras de estudio que se analizarán en este documento, conservan la misma cantidad de variables: dos temperaturas, dos subrasantes y dos tránsitos, de la misma manera para el manual 2017 y 2018.

4.2 Módulo inicial de las mezclas asfálticas

Los manuales del INVÍAS 2017 y 2018 coinciden con la misma metodología para obtener el módulo dinámico en mezclas asfálticas. A partir de la frecuencia de diseño y la temperatura del ensayo, el protocolo permite elaborar cinco curvas

maestras reducidas o curvas isotérmicas (Instituto Nacional de Vías, 2018). A partir de las curvas, se podrá estimar el valor de módulo para la mezcla asfáltica.

El valor del módulo se puede relacionar con la frecuencia de diseño del pavimento, la cual es función de la velocidad de los vehículos comerciales y del espesor de las capas asfálticas. La frecuencia se determina mediante la siguiente fórmula de frecuencia angular (Instituto Nacional de Vías, 2018):

$$F = \frac{1}{2\pi t}$$

Ecuación 7. Frecuencia de diseño

Donde:

F: Frecuencia de diseño en Hz

t: Tiempo total de aplicación de la carga en segundos

Para la determinación del tiempo total de aplicación de la carga se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Log } t = 0.005h - 0.2 - 0.94 \log(V)$$

Ecuación 8. Tiempo total de aplicación de la carga

Donde:

h: espesor probable de la capa asfáltica (cm)

V: velocidad característica de los vehículos comerciales (Km/h)

t: Tiempo total de aplicación de la carga en segundos

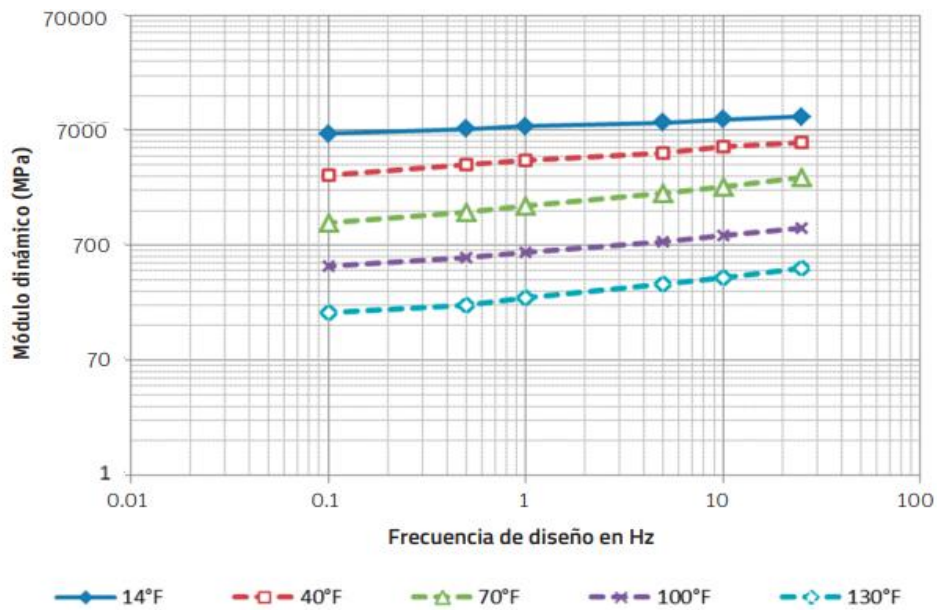
Según lo que expone el manual del INVÍAS sobre la frecuencia de diseño, se realizan dichas operaciones considerando una velocidad de 50Km/h para vehículos comerciales. Los valores de espesores para las capas asfálticas se toman como referencia de las cartas de diseño referenciadas en el capítulo 2 de este documento. Las frecuencias obtenidas para las dos temperaturas de estudio se encuentran a continuación:

Tabla 22. Frecuencias de diseño

Temperatura de ensayo	Espesor promedio CA (cm)	Tiempo (s)	Frecuencia Hz
14°C (57°F)	13,4	0,018	8,5
30°C (86°F)	17,0	0,019	8,2

Continuando con el protocolo del manual, se podrá hallar el valor del módulo para la mezcla asfáltica a partir de las curvas isotérmicas. Basta con entrar a la gráfica con el valor de la frecuencia y temperatura en grados Fahrenheit.

Figura 2. Curvas Isotérmicas¹⁸



Al realizar los cálculos de la frecuencia de diseño y la lectura en las curvas isotérmicas presentadas por el INVÍAS, se obtienen los siguientes valores de módulos para las mezclas asfálticas de acuerdo a cada temperatura:

Tabla 23. Módulos iniciales para Mezcla Asfáltica

Temperatura (°C)	E (MPa)	E (psi)
14	3.200	464.217
30	1.600	232.108

¹⁸Gráfica tomada de "Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito 2da Edición" (Instituto Nacional de Vías, 2018)

4.3 Módulo inicial de los materiales granulares

Una de las características del módulo resiliente es que se puede obtener a partir del ensayo de CBR y por características mecánicas de la subrasante, por lo tanto, para obtener los primeros valores de entrada para las capas granulares, se emplea como referencia algunas correlaciones del mecanismo AASHTO 93.

A partir de la información del valor del tránsito, el porcentaje de CBR de los materiales (que se puede consultar en las tablas 18 y 19 de este documento) y las correlaciones del coeficiente estructural, se obtiene los módulos iniciales o semilla que servirán de apoyo para el proceso iterativo. El concepto del coeficiente estructural a_i , se puede definir como la relación empírica entre el número estructural SN y el espesor de la capa; también se define como la capacidad del material para funcionar como un componente estructural del pavimento. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993). Las correlaciones utilizadas fueron las siguientes:

Tabla 24. Correlaciones para módulos iniciales en materiales granulares

Capa	E (psi)	a_i
BG	$10^{\left(\frac{a_i+0,977}{0,249}\right)}$	$0,032 * CBR^{0,32}$
SBG	$10^{\left(\frac{a_i+0,839}{0,227}\right)}$	$0,058 * CBR^{0,19}$

Los valores obtenidos de los módulos resilientes iniciales para cada caso de estudio se observan en la siguiente tabla:

Tabla 25. Módulos resilientes iniciales para cada capa

R₂S₁T₁				
W₁₈	Capa	CBR %	E (Psi)	espesor (cm)
1.000.000	CA		464.217	10
	BG_B	80	27.927	20
	SBG_B	30	15.262	30
	Subrasante		5.077 (35MPa)	
R₂S₁T₅				
W₁₈	Capa	CBR %	E (Psi)	espesor (cm)
10.000.000	CA		464.217	18
	BG_A	95	29.891	20
	SBG_A	40	16.256	30
	Subrasante		5.077 (35MPa)	
R₂S₅T₁				
W₁₈	Capa	CBR %	E (Psi)	espesor (cm)
1.000.000	CA		464.217	9
	BG_B	80	27.927	15
	SBG_B	30	15.262	20
	Subrasante		10.155 (70MPa)	
R₂S₅T₅				
W₁₈	Capa	CBR %	E (Psi)	espesor (cm)
10.000.000	CA		464.217	16.5
	BG_A	95	29.891	20
	SBG_A	40	16.256	25
	Subrasante		10.155 (70MPa)	

R₆S₁T₁				
W₁₈	Capa	CBR %	E (Psi)	espesor (cm)
1.000.000	CA		232.108	14.5
	BG_B	80	27.927	20
	SBG_B	30	15.262	35
	Subrasante		5.077 (35MPa)	
R₆S₁T₅				
W₁₈	Capa	CBR %	E (Psi)	espesor (cm)
10.000.000	CA		232.108	20
	BG_A	95	29.891	30
	SBG_A	40	16.256	35
	Subrasante		5.077 (35MPa)	
R₆S₅T₁				
W₁₈	Capa	CBR %	E (Psi)	espesor (cm)
1.000.000	CA		232.108	13.5
	BG_B	80	27.927	15
	SBG_B	30	15.262	15
	Subrasante		10.155 (70MPa)	
R₆S₅T₅				
W₁₈	Capa	CBR %	E (Psi)	espesor (cm)
10.000.000	CA		232.108	20
	BG_B	95	29.891	20
	SBG_B	40	16.256	25
	Subrasante		10.155 (70MPa)	

4.4 Cálculo de módulos en materiales granulares

Al diseñar estructuras de pavimentos bajo la metodología mecánico empírica, se requiere conocer las propiedades y características de cada una de las capas. Por lo tanto, el módulo de resiliencia es la base para caracterizar el comportamiento del suelo y especialmente el material granular.

4.5 Subdivisión de la estructura

La estructura del pavimento puede ser modelada como una estructura multicapa, de esta manera se podrá determinar los esfuerzos producidos por el tránsito. La tabla 25 de este documento, presenta la información de los espesores de cada una de las estructuras a analizar, por lo tanto, para subdividir cada estructura se tuvo como referencia la literatura del manual de AASHTO 2008 donde sugiere lo siguiente: si el espesor de la base granular es mayor a 6", la primera subcapa de la base será de 2" y el espesor restante, se volverá a dividir en subcapas de igual proporción en valores enteros.

Para la subbase granular se hará la subdivisión cuando su espesor sea mayor a 8". (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008). La subdivisión de capas sólo se aplicó al material granular, de esta manera, la capa de la carpeta asfáltica y su material cementado no cambia.

Figura 3. Subdivisión de las estructuras para materiales granulares



Al subdividir cada capa de la estructura, se le asigna el módulo inicial definido para el diseño AASHTO 93 y explicado en el capítulo anterior en este documento.

4.6 Cargas

De acuerdo con las prácticas en el diseño de pavimentos siempre se simula la mitad del eje, conocido popularmente en la literatura como el semieje. Lo anterior se basa en el eje de referencia del eje simple de rueda doble de 8,2 Ton.

Para la simulación en el software el valor de la carga que se ingresa es de 9000 lb, pues el eje de 8,2 Ton pesa 18000 lb y se asume sólo la mitad del eje.

4.7 Área de contacto

En la simulación del software además del valor de la carga mencionada anteriormente, se requiere el área de contacto que existe entre la llanta y la superficie del pavimento. Por lo tanto, se hallará como la siguiente relación:

Ecuación 9. Área de contacto

$$\text{Área de contacto} = \frac{\text{Carga llanta}}{\text{Presión de contacto}}$$

Al revisar los parámetros que maneja el manual, éste utiliza una presión de inflado de ruedas de 750kPa asumiendo que es similar a la presión de contacto. Al expresar en párrafos anteriores que la carga simulada será de 9000lb, se define un mayor valor de presión de contacto en 800 kPa. De esta manera, se obtiene el siguiente valor a ingresar en el software:

$$\text{Área de contacto} = \frac{9000lb}{800kPa * \frac{3000PSI}{20680}}$$

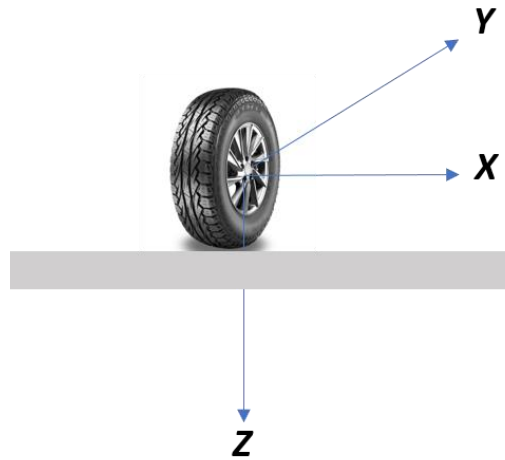
$$\text{Área de contacto} = 77,55 \text{ in}^2$$

4.8 Dirección de esfuerzos

El software calcula los esfuerzos en el centro de cada capa de la estructura. Al ingresar al programa con una estructura de pavimento con varias subcapas, cada una de estas va a tener un valor de esfuerzo en las siguientes tres direcciones: σ_{xx} ,

σ_{yy} , σ_{zz} ; donde el esfuerzo en dirección Y será en el mismo sentido de la circulación, y el esfuerzo en dirección X corresponde al transversal a la vía.

Figura 4. Dirección de esfuerzos



4.9 Ajustes Modelo $K_1 - K_3$

A partir de los valores de las constantes K_1 - K_3 y los valores de esfuerzos que arroja el software WinJulea, se podrá calcular el módulo resiliente para cada capa de las estructuras de pavimento presentadas en la tabla 25 en este documento. A continuación, se presentan los parámetros de los ajustes efectuados para los materiales granulares estudiados en el anexo 4 del Manual del INVÍAS del 2017:

Tabla 26. Ajustes del modelo K_1 - K_3 para bases granulares¹⁹

Bases Granulares		Modelo $K_1 - K_3$		
Muestra	K_1	K_2	K_3	
BG25A	865.557	0.622	-0.119	
BG25B	539.010	0.404	0.345	
BG38B	605.398	0.622	-0.064	
BG40A	853.779	0.569	0.130	

Tabla 27. Ajustes del modelo K_1 - K_3 para subbases granulares²⁰

Subbases Granulares		Modelo $K_1 - K_3$		
Muestra	K_1	K_2	K_3	
SBG38A	643.018	0.670	-0.195	
SBG38B	791.608	0.542	0.135	
SBG50A	716.389	0.571	0.155	
SBG50B	616.194	0.675	-0.099	

¹⁹ Datos tomados de "Anexo 4 del Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito" (Instituto Nacional de Vías, 2017)

²⁰ Datos tomados de "Anexo 4 del Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito" (Instituto Nacional de Vías, 2017)

4.10 Coeficiente Presión de tierras en reposo

Continuando con el protocolo del anexo 4 del manual del INVÍAS, para hallar el módulo resiliente a partir del modelo universal, se deben conocer los esfuerzos totales vertical y horizontal. Para calcular el esfuerzo horizontal se debe conocer la presión de tierras en reposo. Para determinar estos valores, se deben saber los pesos unitarios de cada una de las capas de suelo por encima del punto donde se pretenda determinar el módulo resiliente. De acuerdo con los valores usados en el manual, se establecieron los siguientes pesos unitarios:

Tabla 28. Pesos unitarios para cada capa

Capa	Pesos Unitarios	
	γ (KN/m ³)	γ (lb/ft ³)
CA	22.1	140,57
BG	20.1	127,85
SBG	19	120,86

Para hallar el esfuerzo vertical será multiplicar el peso unitario de cada capa con su espesor, este valor en la hoja de cálculo será conocido como σ_v (Psi). A partir de este esfuerzo vertical, se halla el esfuerzo vertical a la mitad de la capa el cual será identificado en la hoja de cálculo como σ_{vm} (Psi).

El coeficiente de presión de tierras en reposo se estima en función del coeficiente de Poisson (Instituto Nacional de Vías, 2017), así:

$$k_0 = 1 - \sin \varphi$$

Ecuación 10. Coeficiente de presión de tierras

donde φ será 30° (siendo un valor conservador para materiales granulares) dando como resultado $k_0 = 0,50$ para todas las iteraciones.

4.11 Obtención de esfuerzos

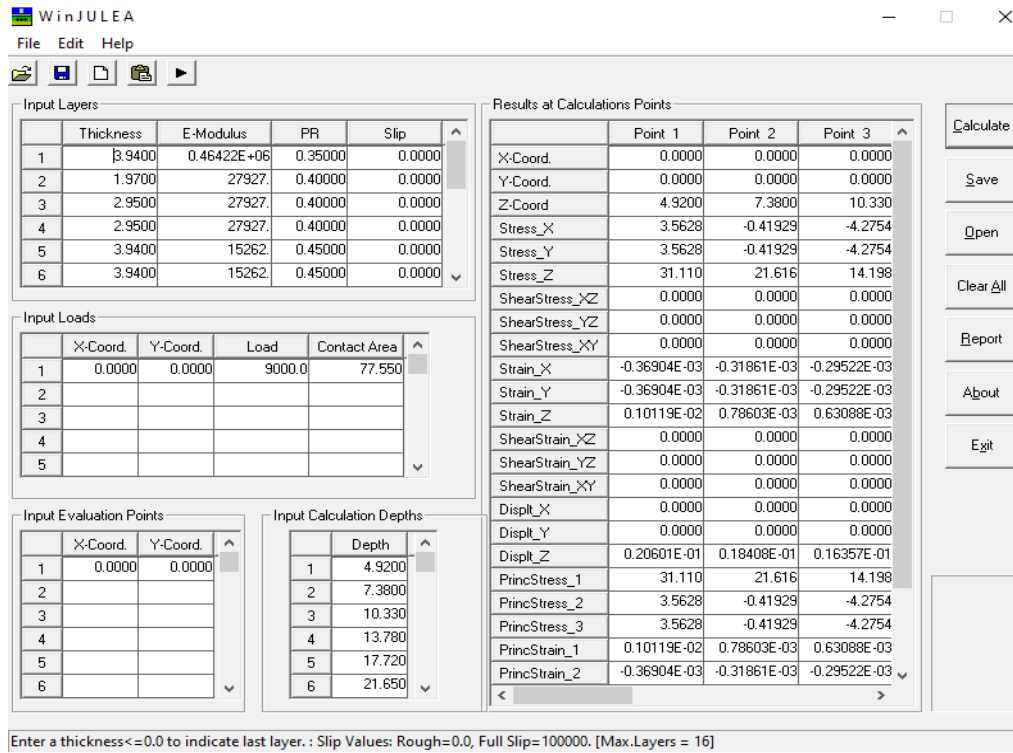
A partir de todos los parámetros anteriormente expuestos, se procede a correr el programa y obtener los esfuerzos en las tres direcciones. Los valores que se van a extraer del software para programar la hoja de cálculo corresponden a seis puntos calculados denominados: *Stress_X*, *Stress_Y*, *Stress_Z*.

4.12 Obtención de módulos

Los esfuerzos que se obtienen a partir del software corresponden a la acción de la carga de la rueda, y junto a los esfuerzos geostáticos correspondientes al mismo peso de las capas del pavimento, se podrá obtener la invariante de esfuerzos y el cortante octaédrico detallados en la ecuación 1 de este documento. Finalmente,

con los cálculos mencionados se desarrolla la ecuación constitutiva para la obtención del módulo resiliente en materiales granulares.

Figura 5. Esfuerzos obtenidos por el Software WinJulea



De acuerdo con el protocolo del manual, la aceptación de los módulos obtenidos para cada capa de la estructura, deberá presentar un error de convergencia menor al 5%, de lo contrario, se deberá realizar el número de iteraciones necesarias hasta que cumpla. Es importante aclarar que para cada iteración que se realice, se deberá correr nuevamente el programa por el ajuste de los nuevos módulos hallados en la última iteración, es decir, servirán como valor de entrada y de esta manera se obtendrá nuevos valores de esfuerzos. Todo lo descrito anteriormente, se realiza en

una hoja de cálculo organizada para repetir el número de iteraciones independientes para cada estructura de pavimento.

4.13 Cálculo de deformaciones actuantes

Luego de las iteraciones realizadas en el capítulo anterior para el cálculo de módulos en cada una de las capas de las estructuras, se procede a determinar las deformaciones actuantes a partir de un modelo de agrietamiento y ahuellamiento propuesto por el manual de INVÍAS, los cuales fueron descritos en el estado del arte de este documento.

4.14 Parámetros de entrada

Para determinar el agrietamiento en la capa asfáltica el modelo utilizado se describe en la ecuación No 3 de este documento, y los valores de los parámetros requeridos se registran en la tabla 29.

A partir del modelo de ahuellamiento Shell detallado en la ecuación No 4 de este documento, se tendrá en cuenta el producto entre $[1.94 * 10^{-7}]$ y la deformación vertical obtenida del software $(\varepsilon_z)^{-4}$. No será necesario otros valores de parámetros de entrada para el cálculo de la deformación por ahuellamiento.

Tabla 29. Valores de parámetros para análisis de agrietamiento. ²¹

Parámetro	Valor
k_{f1}	0.007566
V_a	5
V_b	12
M	0.076870
C	1.193632
C_H	264.73
β_{f1}	1.00
k_{f2}	-3.9492
β_{f2}	1.00
k_{f3}	-1.281
β_{f3}	1.00

4.15 Presión de inflado

El modelo empírico mecanicista resalta que la presión de contacto de las llantas será diferente para un eje simple como para un eje tándem, por lo tanto, en la hoja de cálculo para cada eje se tendrá en cuenta los siguientes valores:

²¹ Datos tomados de "Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Altos y Medios Volúmenes de Tránsito" (Instituto Nacional de Vías, 2017)

Tabla 30. Valores de presión de contacto de inflado según eje

Eje	Presión kPa	Presión Psi
Simple	800	116.05
Tándem	750	108.80

4.16 Cargas por eje

De acuerdo a la tabla No 9 de este documento, donde se presentan las cargas máximas por tipo de eje vigentes en Colombia, la hoja de cálculo para la obtención de las deformaciones se organiza según el tipo de eje con tres valores de carga distinto, sin superar el valor máximo permitido. En la simulación se evaluará también el eje de referencia de 8.2 ton.

Tabla 31. Valores de carga para cada tipo de eje

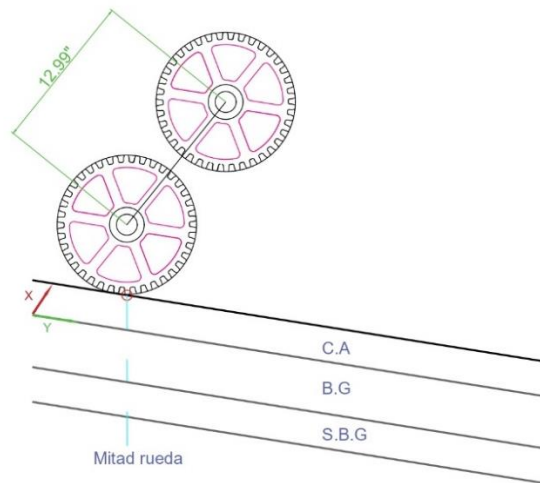
Eje	Carga (t-f)
SRS	1.0
SRS	4.0
SRS	6.0
SRD	4.0
SRD	7.0
SRD	11.0
TRD	12.0
TRD	18.0
TRD	22.0
TrRD	14.0
TrRD	20.0
TrRD	24.0

4.17 Puntos de evaluación

Para obtener el número de repeticiones admisibles en cada tipo de eje, debe tenerse como referencia los siguientes puntos de evaluación según las distancias estándar entre ejes y ruedas que existen en los camiones actuales:

- a) Eje simple de rueda sencilla (SRS): la distancia entre centros de ruedas es de 12.99" (33cm), y su punto de evaluación es de bajo de una sola rueda x,y [0,0].

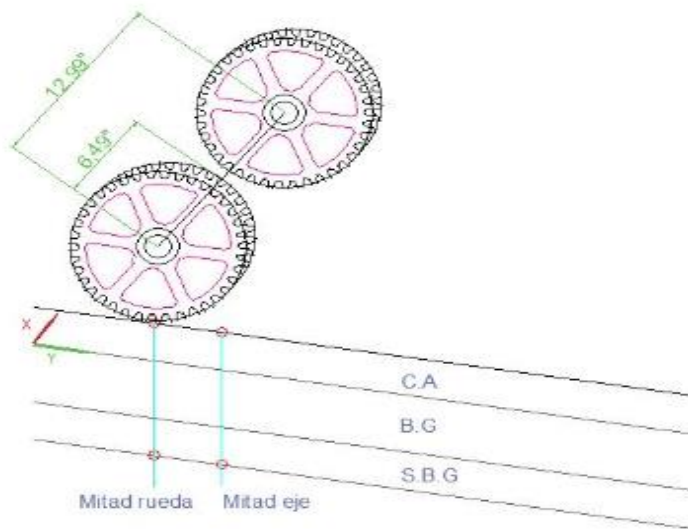
Figura 6. Puntos de evaluación eje SRS



- b) Eje simple de rueda doble (SRD): su configuración de distancia entre eje de rueda es [0,0] y [12.99;0], pero sus puntos de evaluación en el software son de bajo de una sola rueda [0,0] y en el centro del eje x,y [6.49;0].

Figura 7. Puntos de evaluación eje SRD

EJE SRD



- c) Eje tándem de rueda doble: sus puntos de evaluación son de bajo de una sola rueda $x, y [0;0]$, en el centro de ejes de ruedas $x,y [6.49;0]$, $x,y [0; 26.57]$, $x,y [6.49;26.57]$. La anterior configuración se basa en los análisis de daños por ejes que hace AASHTO 2008 y se puede ver representado en el siguiente diagrama:

Figura 8. Análisis de daños de cargas para eje tándem²²

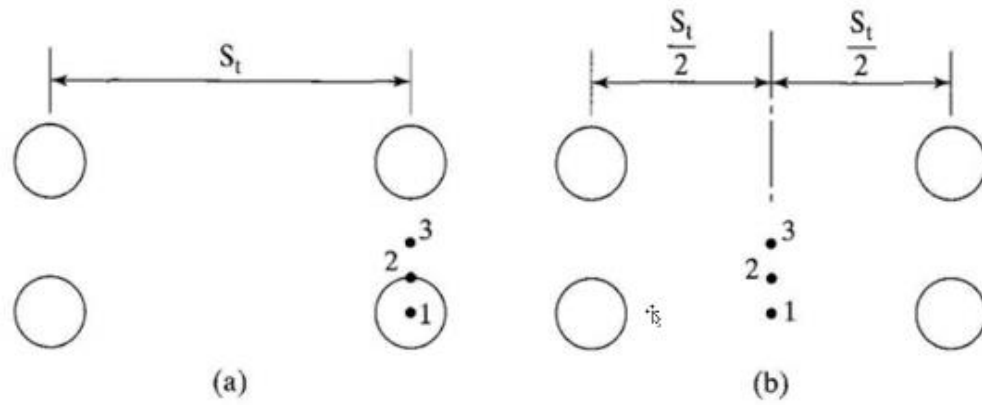
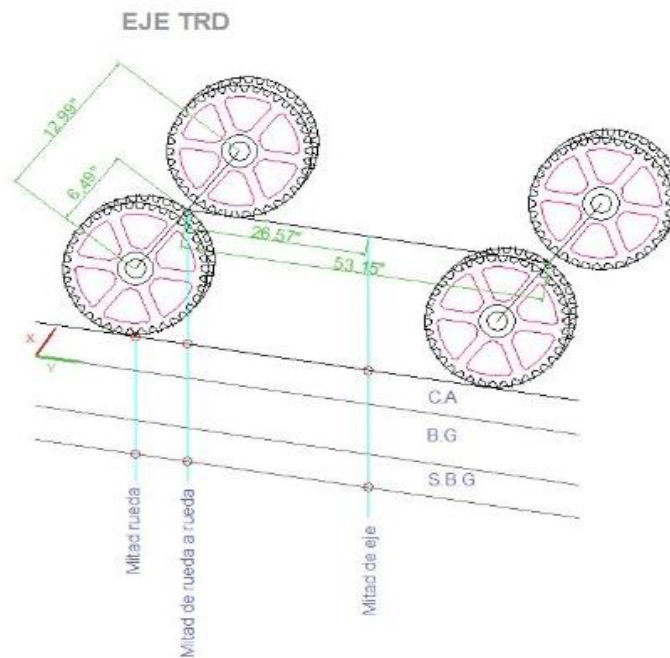


Figura 9. Puntos de evaluación eje TRD



²² Diagrama tomado de (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

d) Eje trídem de rueda doble: sus puntos de evaluación son de bajo de una sola rueda x, y $[0;0]$, y en el centro de ejes de ruedas x,y $[6.49;0]$, x,y $[0; 26.57]$, x,y $[6.49;26.5]$. Lo anterior significa que se modelan las seis cargas, pero los puntos de análisis son debajo de una sola llanta del extremo y en centro del eje. La anterior configuración se basa en los análisis de daños por ejes que hace AASHTO 2008 y se puede ver representado en el siguiente diagrama:

Figura 10. Análisis de daños de cargas para eje trídem²³

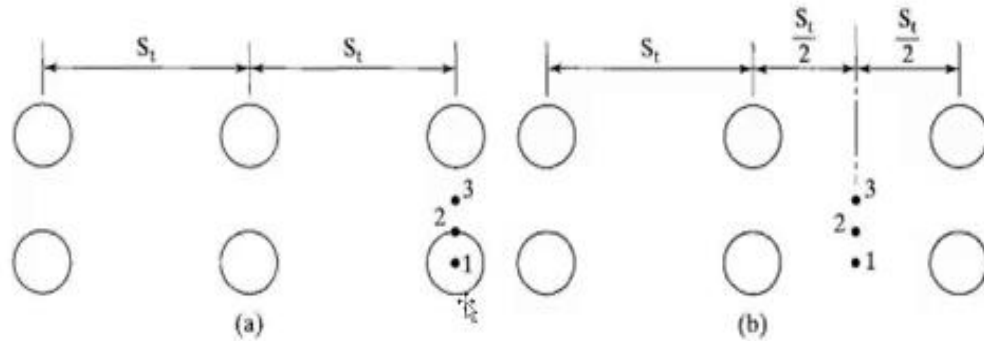
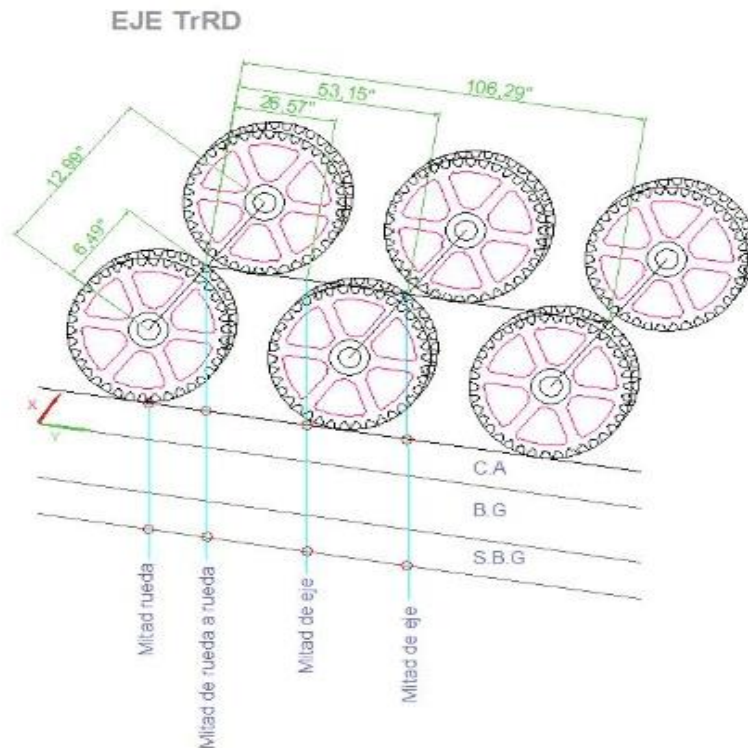


Figura 11. Puntos de evaluación TrRD

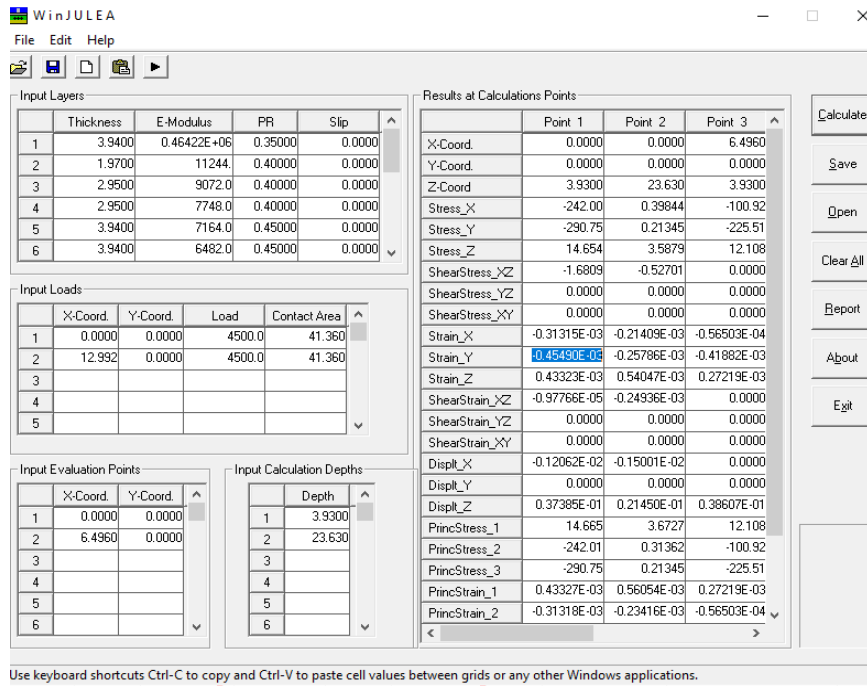
²³ Diagrama tomado de (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)



4.18 Obtención de deformaciones actuantes

A partir de las configuraciones y distancias entre ruedas para cada tipo de eje presentadas anteriormente, los puntos de evaluación, los módulos obtenidos y los valores de profundidades de análisis para cada estructura, se procede a ingresar toda esta información al software para hallar las deformaciones actuantes de tracción como de compresión. Las deformaciones por tracción ε_t se leen en los puntos impares del programa y corresponden a la carpeta asfáltica; por otra parte, las deformaciones por compresión ε_v se leen en los puntos pares del software y corresponden a la subrasante de la estructura.

Figura 12. Deformaciones actuantes para el eje de referencia de 8.2 ton



5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Variación de los módulos de granulares obtenidos con los estructuras y materiales de los manuales INVÍAS 2017 y 2018

A continuación, se presenta gráficamente la variación en profundidad de los módulos obtenidos para los materiales granulares en diferentes estructuras de pavimento, de acuerdo con los parámetros entrada definidos en los manuales de los años 2017 y 2018 publicados por el INVÍAS.

En primera instancia se presentan los resultados agrupados en gráficas que permiten comparar los módulos granulares obtenidos para estructuras dimensionadas con similares materiales de capas asfálticas (R2 ó R5).

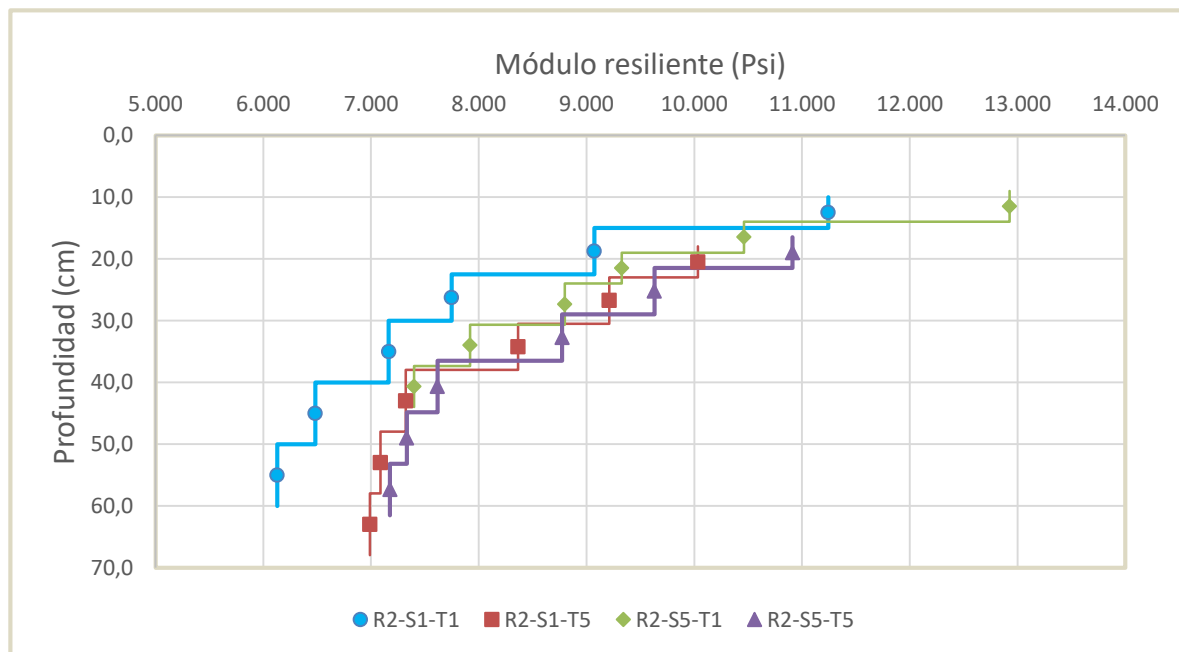


Figura 13. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras R2 Tamb = 14°C. Manual 2017

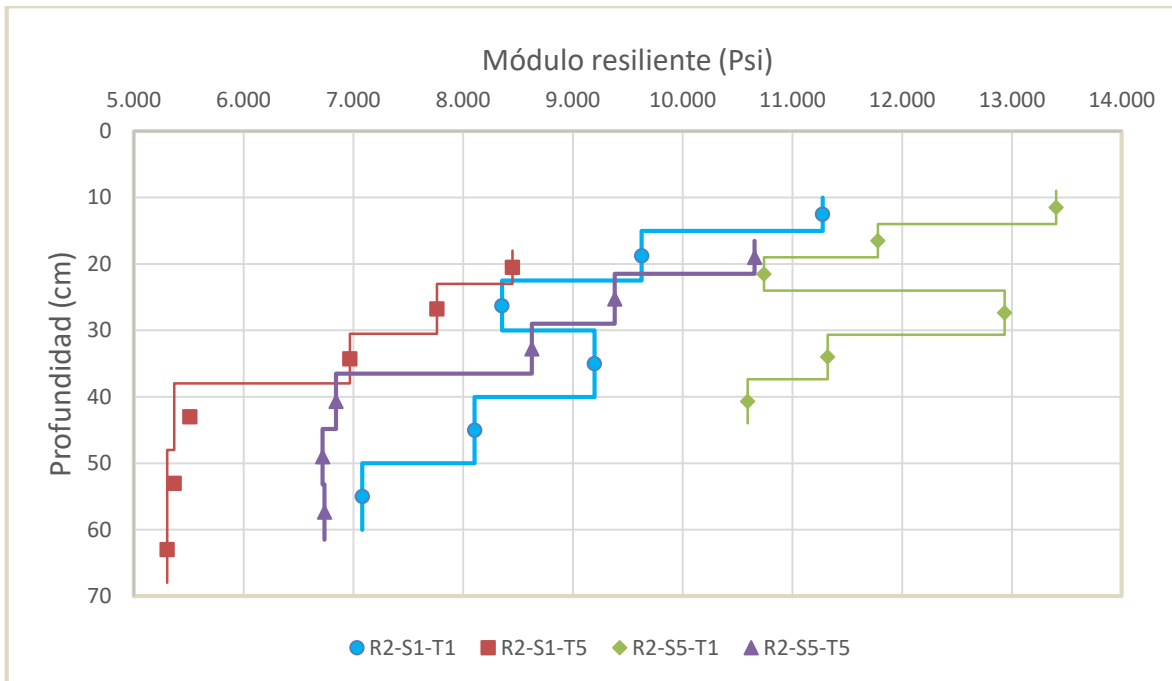


Figura 14. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras R_2 $T_{amb} = 14^\circ\text{C}$. Manual 2018

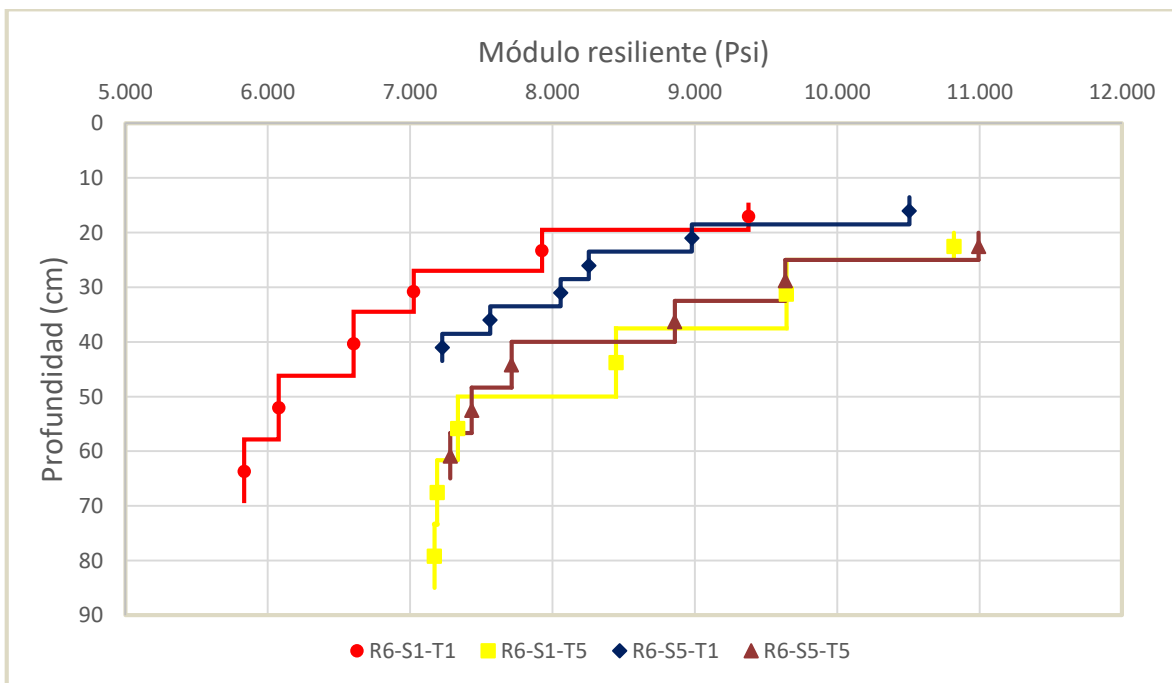


Figura 15. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras R_6 $T_{amb} = 30^\circ\text{C}$. Manual 2017

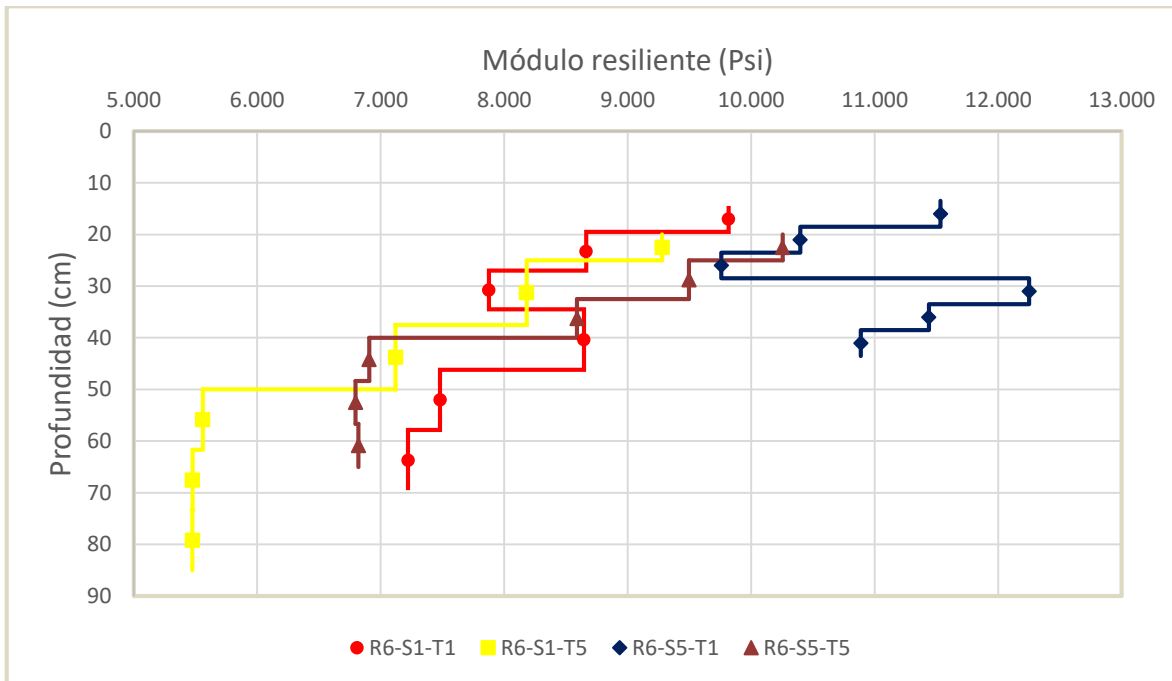


Figura 16. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras R₆ Tamb = 30°C. Manual 2018

Mediante las gráficas resumen de resultados se puede corroborar que el módulo de los materiales granulares tiende a disminuir con la profundidad, ya que según el modelo $K_1 - K_3$, el módulo aumenta tanto con el confinamiento (proporcionado por la subrasante) como con el esfuerzo desviador aplicado (producido por la carga actuante). Así entonces, las capas inferiores, al estar apoyadas directamente sobre la subrasante, tienen un menor confinamiento y adicionalmente, en ellas el esfuerzo debido a la aplicación de la carga en superficie también es menor, debido a su disipación en profundidad, por lo que desarrollan menores módulos resilientes.

Para entender mejor las gráficas debe explicarse que el módulo de los granulares se calculó mediante un proceso iterativo y que en todos los casos se dividieron tanto la capa de base como la de subbase, cada una en tres subcapas. Así en cada serie o línea quebrada se está mostrando como varía en profundidad el módulo promedio de cada subcapa granular (calculado en la mitad y que se marca con un punto).

Según lo anterior, en la gráfica la profundidad de cero corresponde a la superficie del pavimento, las líneas comienzan en una profundidad igual al espesor de las capas asfálticas de las estructuras evaluadas, los tres primeros puntos de arriba hacia abajo representan los módulos resilientes de las subcapas en que se dividió la base granular y los tres últimos o inferiores a los de la subbase granular. Cabe añadir, que las líneas o series que alcanzan mayor profundidad corresponden a estructuras de pavimento de mayores espesores y capacidad estructural.

Sin embargo, en las cuatro estructuras dimensionadas para el nivel de tránsito bajo escogido (T1), al modelar con los parámetros seleccionados para los materiales granulares del manual 2018, se presentan inconsistencias, ya que los módulos de los materiales de subbase están dando mayores a los de la base granular, a pesar de que los esfuerzos que se desarrollan en la capa inferior son menores. En este caso se podría tratar de un material de subbase de mayor módulo resiliente que el

de base o que, en condiciones de bajos niveles de esfuerzo desarrolla mayores módulos que el de base granular con el modelo escogido.

Para concluir el análisis de estas gráficas iniciales, se anota que a mayor espesor de capas asfálticas (profundidad donde empiezan las líneas que indican el módulo de cada subcapa granular) las bases granulares desarrollan módulos menores, ya que el esfuerzo debido a la carga aplicada en superficie es menor. Análogamente, para espesores similares de capas asfálticas, el módulo de las bases granulares subyacentes es mayor cuando el módulo de las mezclas asfálticas es más bajo, por esto para las estructuras R6 ($T_{amb}= 30^{\circ}C$), que corresponden a una región climática de mayor temperatura ambiente, las bases granulares desarrollan módulos mayores que en estructuras R2 ($T_{amb}= 14^{\circ}C$), si el espesor de capas de rodadura es similar.

En segunda instancia, se elaboraron gráficas con los mismos resultados, agrupando las estructuras analizadas por el tránsito de diseño (NESE= 1.000.000 ó NESE= 10.000.000) y el manual INVIAS (2017 ó 2018) del cual se sacaron las constantes del modelo $K_1 - K_3$ para estimar los módulos de los granulares. A continuación, se muestran las gráficas obtenidas:

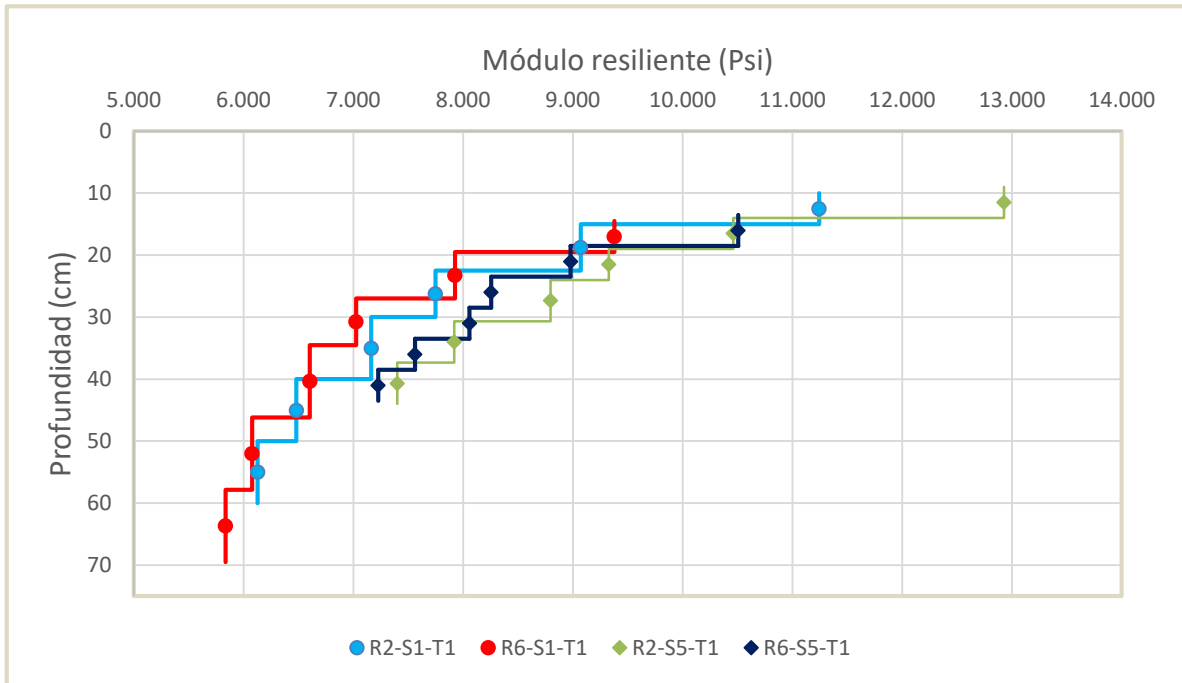


Figura 17. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras T1 – NESE=1.000.000. Manual 2017

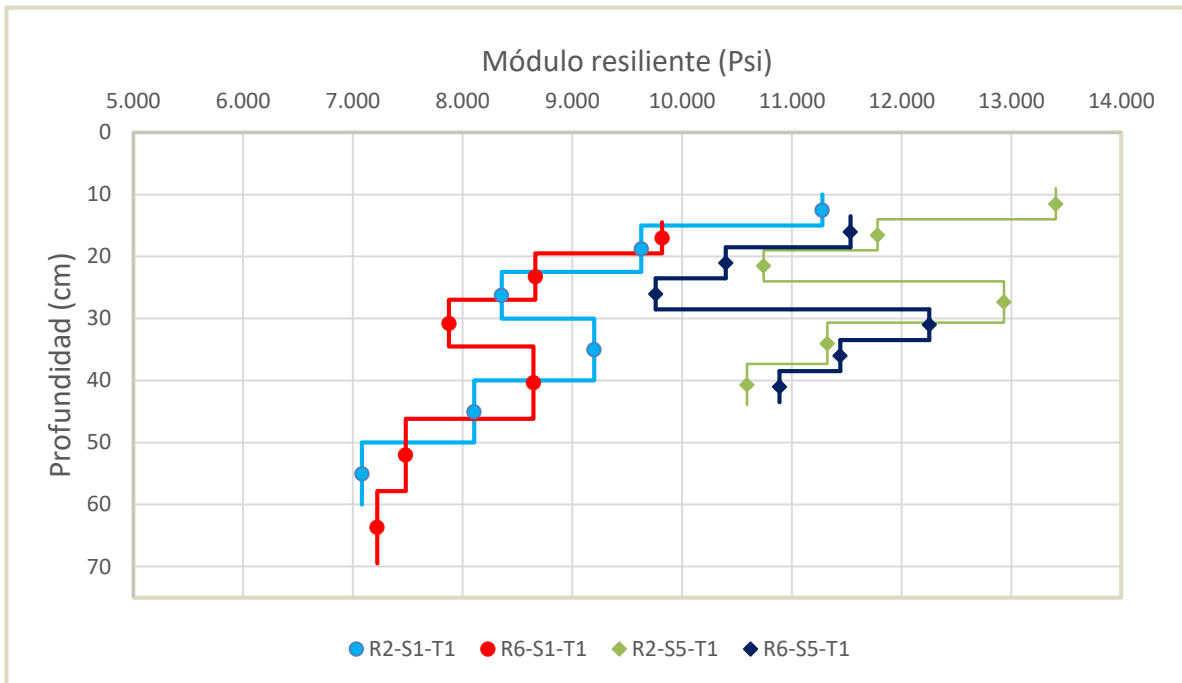


Figura 18. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras T1 – NESE=1.000.000. Manual 2018

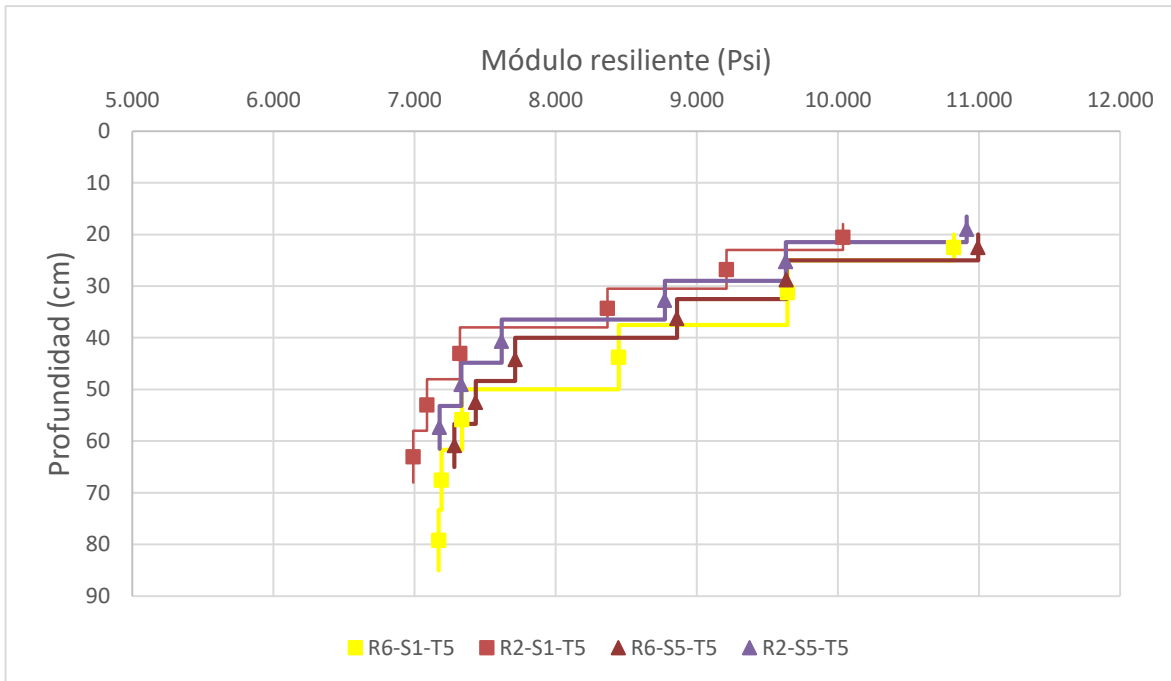


Figura 19. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras T5 – NESE=10.000.000. Manual 2017

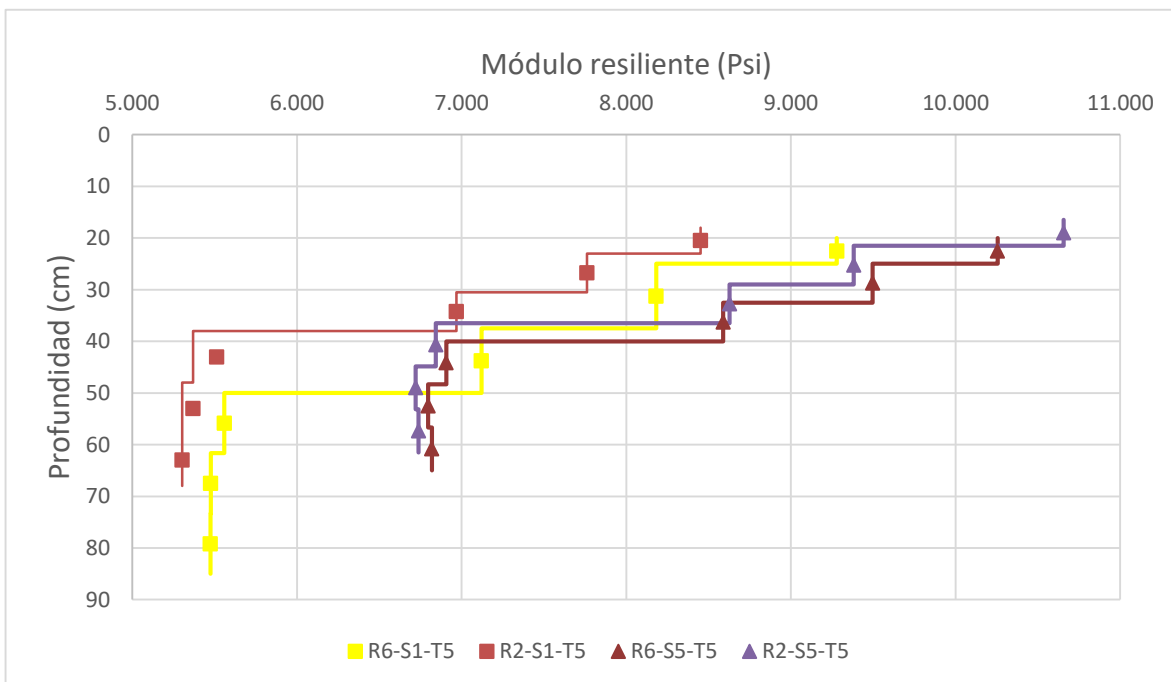


Figura 20. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras T5 – NESE=10.000.000. Manual 2018

En las figuras 17 a 20 puede verse que la inconsistencia observada de obtener mayores módulos en algunas capas de la subbase granular que en las de la base que están encima, se presentó únicamente cuando se analizó el modelo con las estructuras propuestas para un nivel de tránsito T1 y con los coeficientes del modelo $K_1 - K_3$ sacados del manual Invías 2018 (Figura 18). Al respecto, hay que añadir que los materiales granulares evaluados para el nivel de tránsito bajo (T1) son BG-B y SBG-B mientras que para el nivel de tránsito alto (T5) se utilizaron materiales de mejor calidad tipo BG-A y SBG-A, y además, que las bases granulares tienen mayor tamaño máximo de agregados que las subbases por lo que para materiales del mismo origen y trituración, con similares granulometrías, podrían desarrollar módulos mayores bajo similares o inferiores condiciones de esfuerzos.

Del análisis de este segundo juego de gráficas puede concluirse, en términos generales, que las bases granulares desarrollan mayores módulos en estructuras para tránsitos bajos (T1) y por el contrario, las subbases granulares desarrollan mayores módulos en estructuras para tránsitos altos (T5). Esto se explica porque para tránsitos bajos se requieren menores espesores de carpeta asfáltica, que hacen que el esfuerzo en las capas granulares superiores sea mayor y en complemento, porque en las estructuras para tránsitos altos se tienen espesores mayores de granulares que implican que se desarrollen menores esfuerzos en las capas inferiores y la subrasante.

Pese a que la anterior tendencia es la predominante, en determinados casos, como en la Figura 20, parece ser que la influencia de la subrasante (confinamiento) en los módulos de los granulares puede ser mayor que la de los espesores de capa, ya que en estas gráficas los módulos de los granulares obtenidos, tanto en capas de base como de subbase, son siempre mayores (en todas las profundidades) en las estructuras sobre la subrasante fuerte (S5) que en las estructuras sobre la subrasante débil (S1), sin importar los espesores de capas asfálticas.

Para concluir con el análisis de estos resultados, en la instancia final los resultados fueron agrupados por tipo de subrasante (S1 y S5) y Manual Invías (2017 ó 2018), obteniéndose las siguientes gráficas:

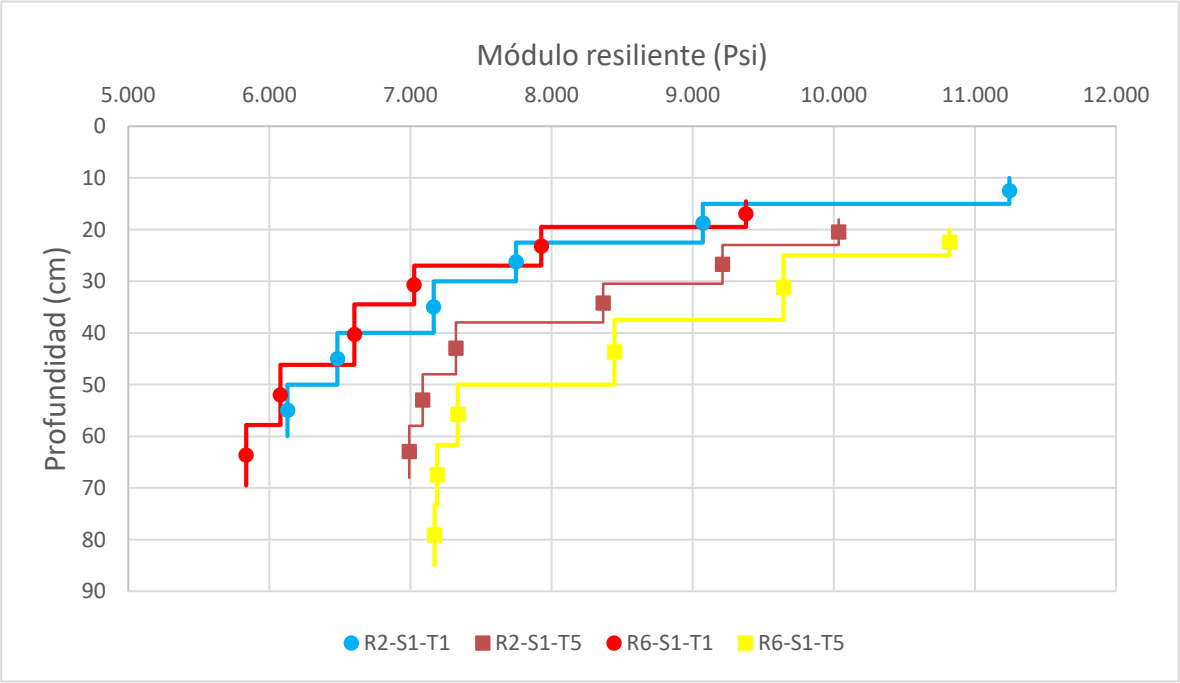


Figura 21. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras S1 – $M_r = 5077 \text{ Psi (35 MPa)}$. Manual 2017

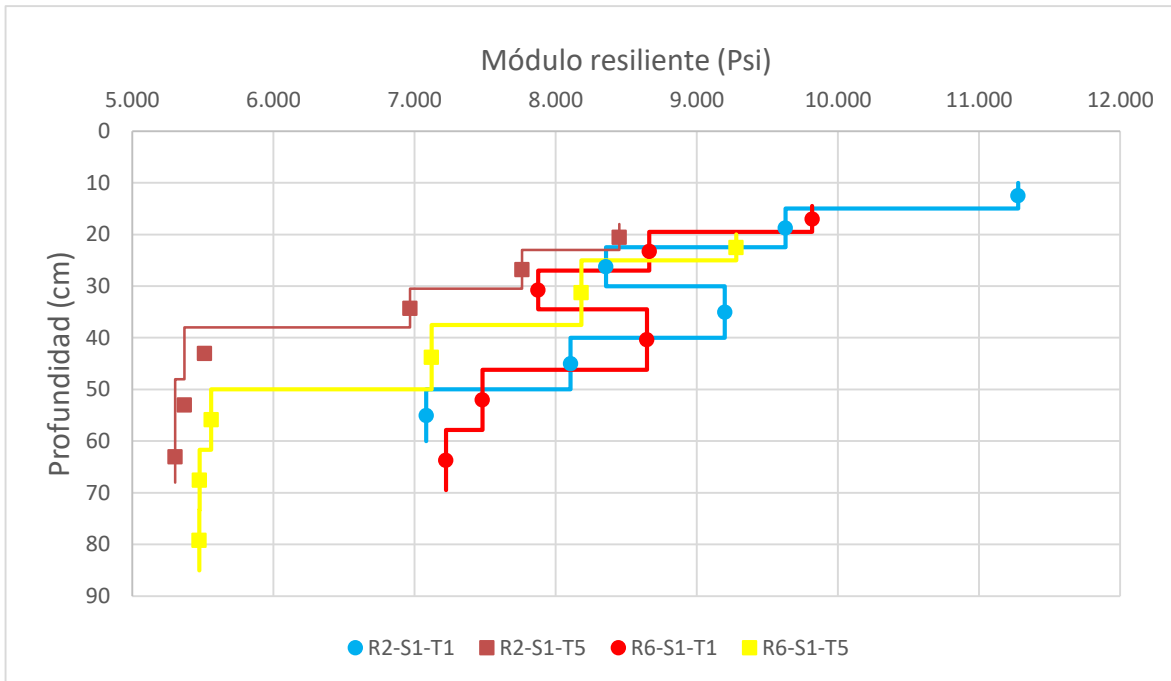


Figura 22. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras S1 – $M_r = 5077$ Psi (35 MPa). Manual 2018

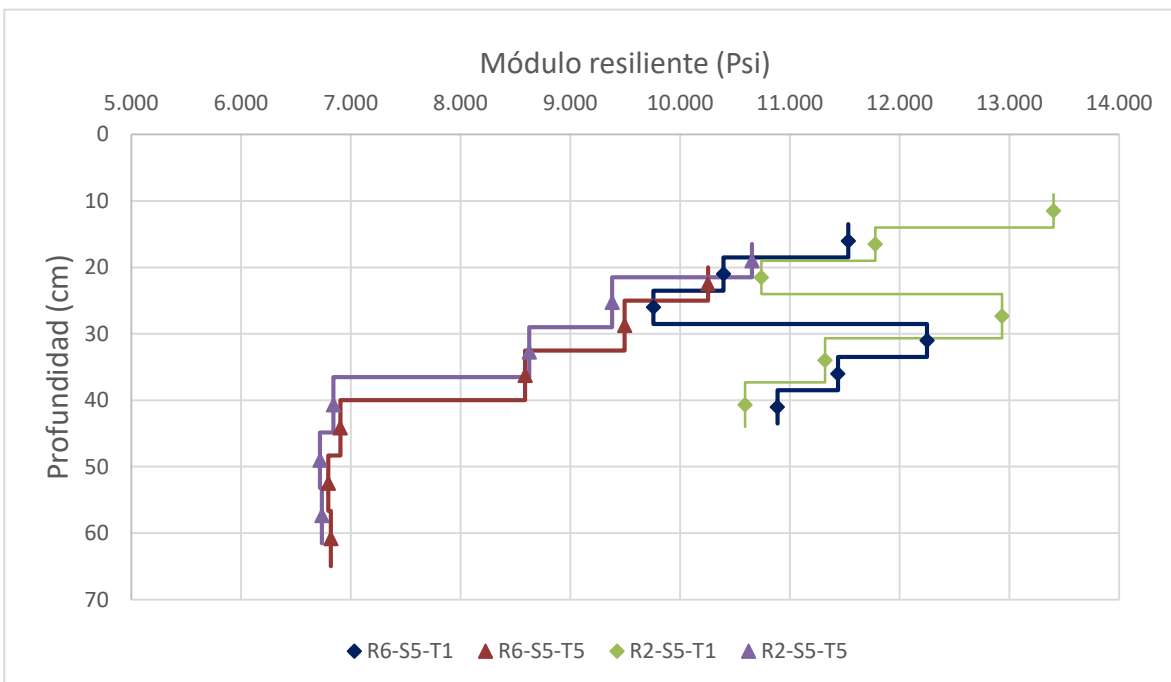


Figura 23. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras S5 – $M_r = 10155$ Psi (70 MPa). Manual 2017

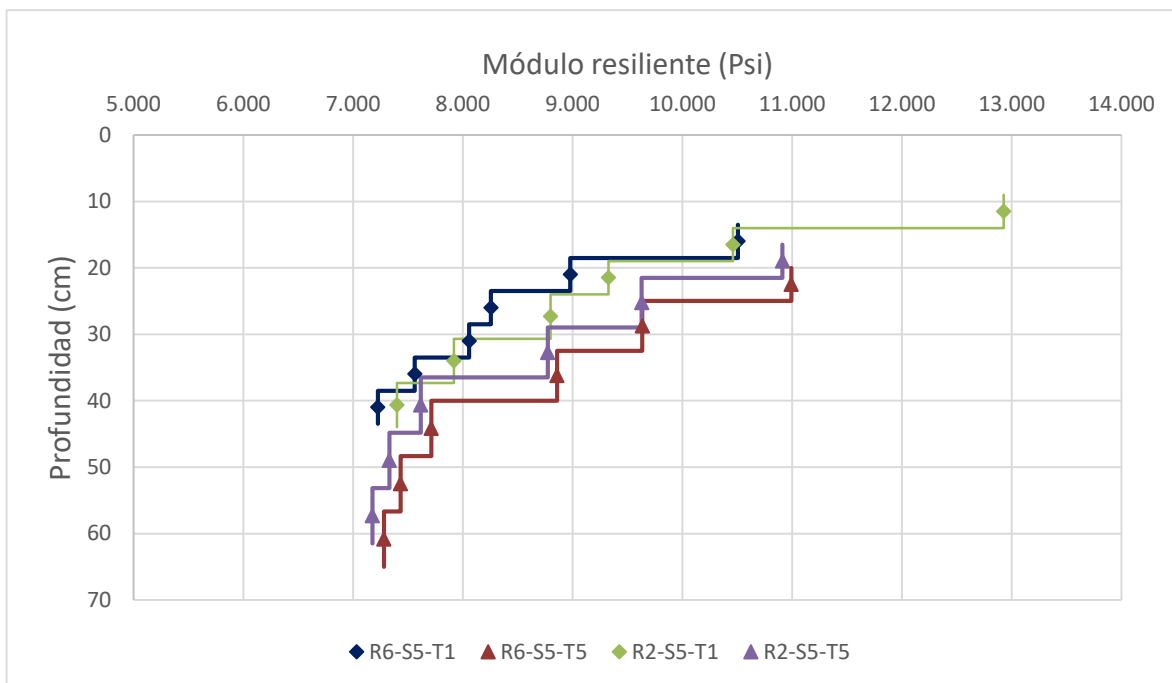


Figura 24. Variación del módulo de granulares con la profundidad, estructuras S5 – $M_r = 10155 \text{ Psi (70 MPa)}$. Manual 2018

Dado que con las gráficas anteriores ya se habían analizado la influencia de la subrasante, el tránsito y el clima, así como de los espesores de capas asfálticas y granulares, en los resultados obtenidos, se considera prudente conceptuar acerca del bajo valor de los módulos obtenidos en los granulares (5.000 a 13.500 Psi).

Así entonces, mientras para el diseño por el método AASHTO 93 se consideran módulos de bases granulares entre 25.000 y 30.000 Psi y de subbase entre 15.000 y 20.000 Psi, en este caso los resultados obtenidos varían entre 7.000 y 13.500 Psi para las bases y de 5.000 a 9.000 Psi para las subbases (e incluso cercanos a

13.000 Psi, si se consideran las inconsistencias encontradas). Cabe añadir que en gran parte de las capas se obtuvieron módulos incluso menores al de la subrasante en las estructuras S5 ($M_r = 10.155$ Psi).

5.2 FECE por Agrietamiento en la Capa Asfáltica

Con los módulos de los granulares obtenidos y los demás parámetros utilizados para su cálculo, se modelaron las estructuras de pavimento seleccionadas de ambos manuales INVIAS (2017 y 2018) bajo la acción de diversas cargas distribuidas en diferentes configuraciones de ejes (simple rueda sencilla, simple rueda doble, tándem rueda doble y trídem rueda doble).

De esta manera se obtuvieron las deformaciones tangenciales actuantes en la fibra inferior de las capas asfálticas y reemplazando esta en la ecuación del modelo de fatiga escogido, para así calcular el número de repeticiones admisibles de cada configuración y carga de eje en las diferentes estructuras.

Dividiendo el número de repeticiones admisibles para el eje de referencia AASHTO (eje simple de rueda doble de 80 kN ó 18 Kips) cada tipo de eje en el número de repeticiones admisibles para cada tipo de eje, se obtuvieron los siguientes Factores de Equivalencia de Carga por Eje (FECE):

Tabla 32. Factor de Equivalencia de Carga por Eje por Agrietamiento – Manual 2017

Tipo de Eje	Carga (t-f)	R _{2S1T1}	R _{2S1T5}	R _{2S5T1}	R _{2S5T5}	R _{6S1T1}	R _{6S1T5}	R _{6S5T1}	R _{6S5T5}	4 ^a Potencia
SRS	1.0	0.01	0.002	0.01	0.002	0.003	0.002	0.004	0.002	0.001
SRS	4.0	0.42	0.25	0.48	0.28	0.35	0.26	0.39	0.26	0.13
SRS	6.0	1.18	0.92	1.26	0.97	1.13	0.97	1.20	0.96	0.68
SRD	4.0	0.12	0.08	0.13	0.08	0.09	0.08	0.10	0.08	0.06
SRD	7.0	0.64	0.58	0.65	0.59	0.61	0.56	0.62	0.56	0.53
SRD	8.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
SRD	11.0	2.31	2.98	2.20	2.85	2.51	2.96	2.42	2.96	3.24
TRD	12.0	0.59	0.28	0.69	0.33	0.47	0.32	0.55	0.31	0.41
TRD	18.0	1.87	1.15	2.06	1.25	1.67	1.32	1.86	1.31	2.07
TRD	22.0	3.22	2.34	3.43	2.48	3.03	2.67	3.30	2.66	4.63
TrRD	14.0	0.38	0.13	0.48	0.16	0.27	0.15	0.33	0.15	0.14
TrRD	20.0	1.09	0.44	1.30	0.53	0.85	0.53	1.02	0.52	0.57
TrRD	24.0	1.83	0.81	2.11	0.96	1.50	0.99	1.76	0.98	1.19

Con el fin de tener un punto de comparación de los resultados obtenidos, se calcularon también los factores de carga por la denominada Ley de la Cuarta Potencia, la cual no tiene en cuenta la estructura, la subrasante ni el modo de falla, pero se utiliza normalmente como una simplificación de la metodología establecida por AASHTO a partir de la AASHTO Road Test realizada entre 1958 y 1960.

Como puede observarse los factores camión obtenidos por fatiga o agrietamiento de las capas asfálticas difieren, desde un poco menos hasta significativamente más, de los calculados por la simplificación de la Cuarta Potencia, por lo que para poder observar mejor y comparar los resultados obtenidos se graficaron para cada tipo de eje, como se presenta a continuación.

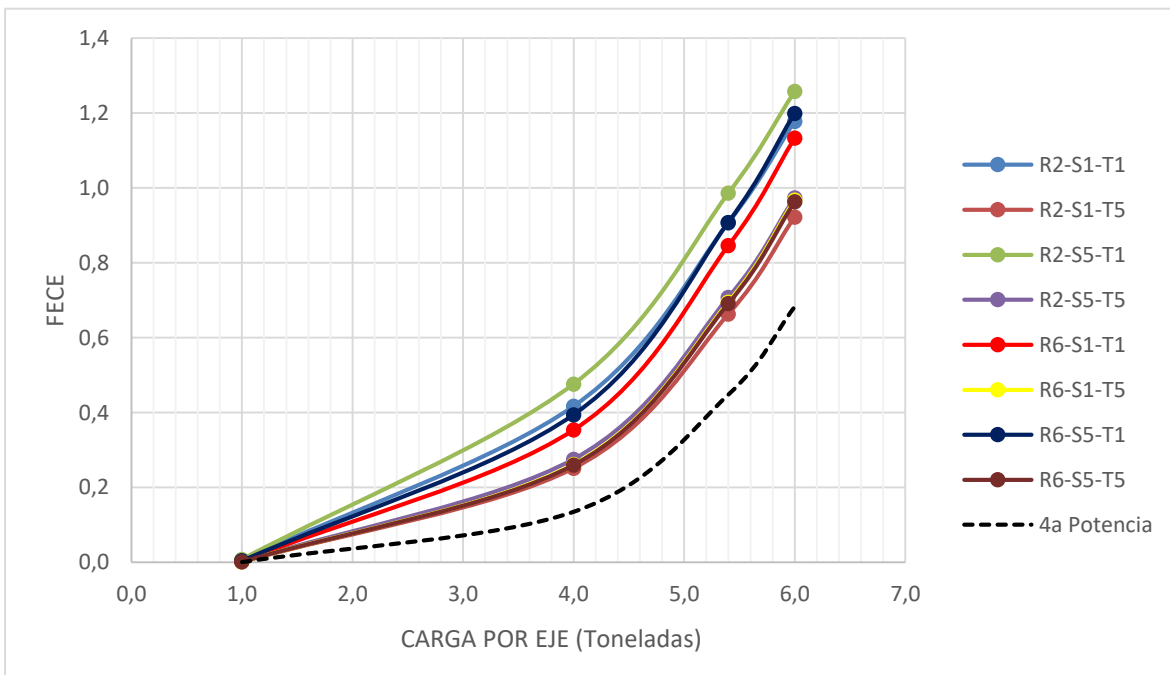


Figura 25. FECE Agrietamiento – Eje Simple Rueda Simple, Manual 2017

Como puede observarse en la Figura 25, en todas las estructuras analizadas, desde la de menor espesor (R2-S5-T1) a la de mayor (R6-S1-T5) los factores de equivalencia calculados para los Ejes Simples de Rueda Simple (SRS) son mayores a los que se obtienen por la simplificación de la Cuarta Potencia. Esto quiere decir que el efecto de estos ejes en la fatiga de las mezclas asfálticas (agrietamiento) es

siempre mayor al que se estima cuando se diseñan pavimentos por el método racional y con ejes equivalentes, en lugar del espectro de carga.

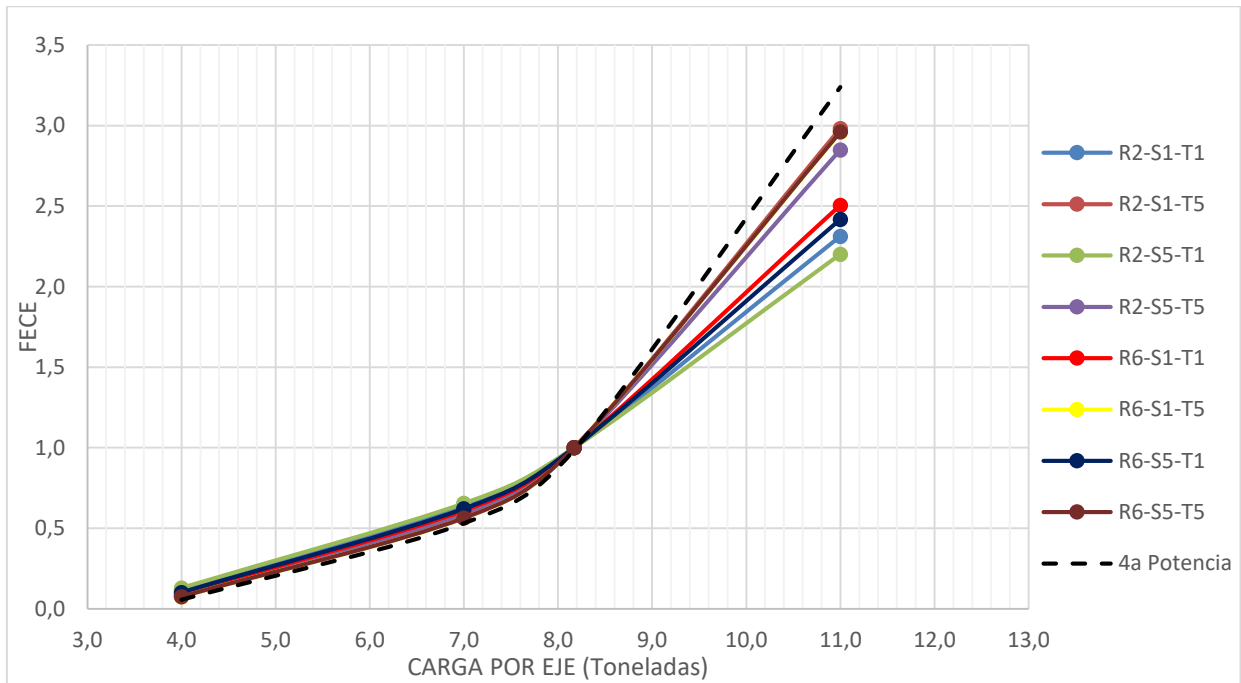


Figura 26. FECE Agrietamiento - Eje Simple Rueda Doble, Manual 2017

De la figura anterior y las siguientes, que corresponden a los factores de equivalencia (FECE) calculados para los ejes Simple de Rueda Doble (SRD) y Tándem de Rueda Doble (TRD), puede observarse que sólo en algunos casos se excede el FECE calculado por la simplificación de la Cuarta Potencia, y normalmente esto no sucede con las cargas más elevadas, por lo que en teoría se podría afirmar que no se comete un error grave al calcular el factor de equivalencia o daño por fatiga (agrietamiento) utilizando la Cuarta Potencia cuando se trata de estos dos tipos de ejes (SRD y TRD).

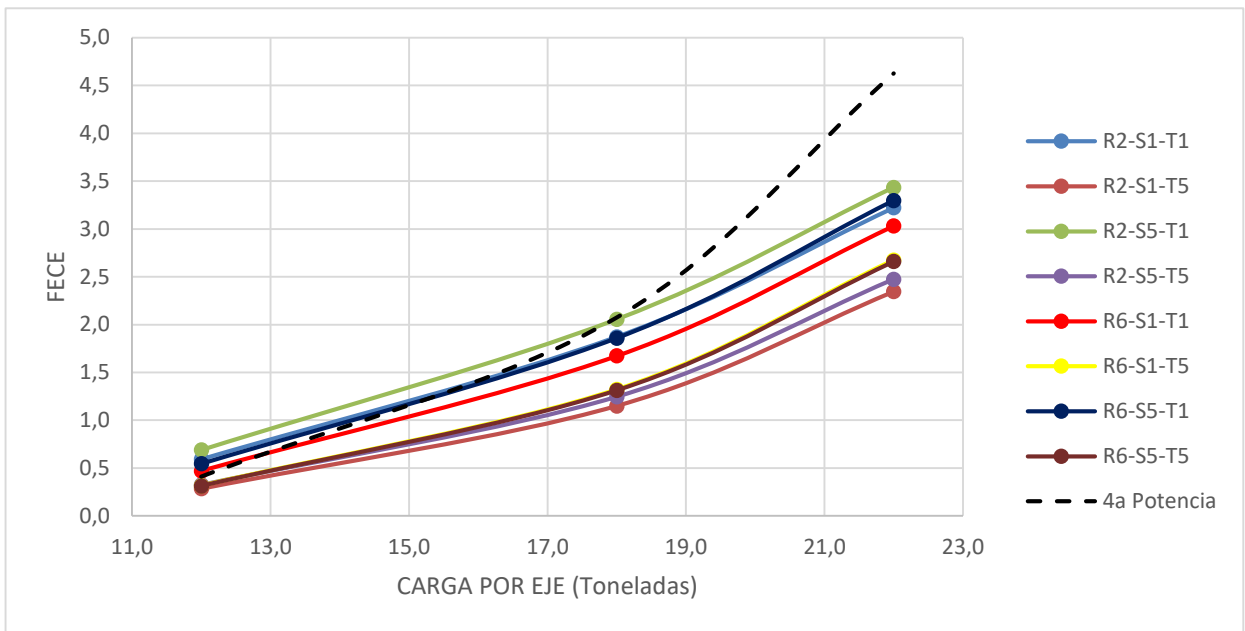


Figura 27. FECE Agrietamiento – Eje Tándem Rueda Doble, Manual 2017

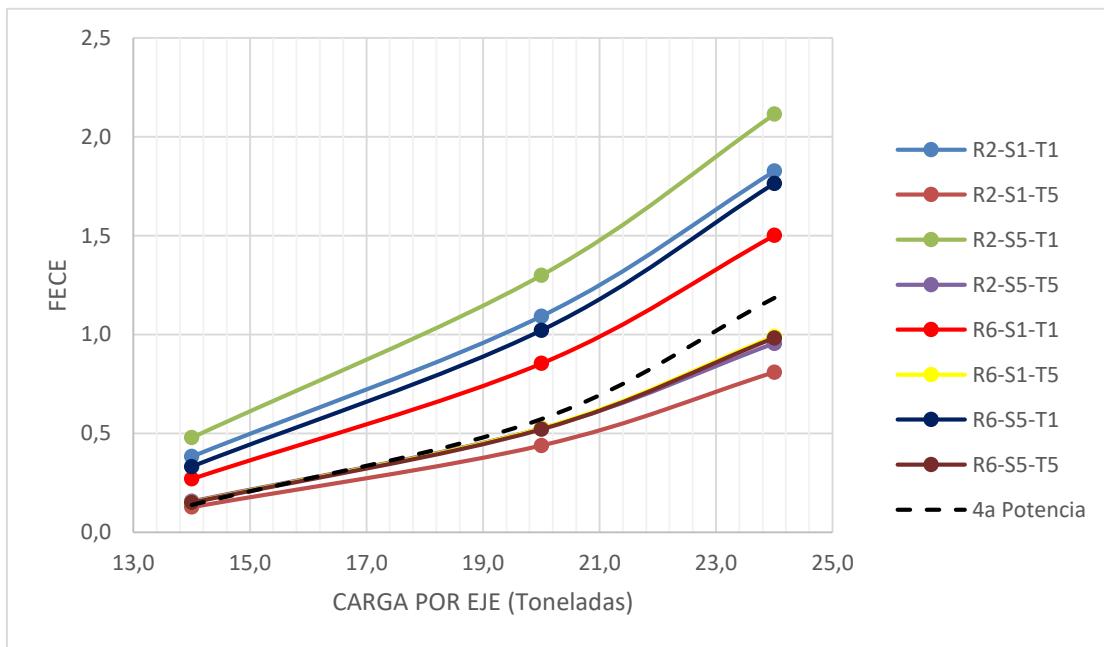


Figura 28. FECE Agrietamiento – Eje Trídem Rueda Doble, Manual 2017

En contraste, para el eje Trídem de Rueda Doble (TrRD) la simplificación de la Cuarta Potencia subestima considerablemente el FECE por agrietamiento en las 4 estructuras recomendadas por el manual para el nivel de tránsito bajo (T1) evaluado. En las estructuras más robustas, que fueron dimensionadas para un nivel de tránsito mayor (T5), los FECE por fatiga de las capas asfálticas obtenidos están por debajo del calculado por la regla de la Cuarta Potencia.

El mismo ejercicio de calcular los FECE por agrietamiento de las capas asfálticas se realizó con las estructuras del Manual 2018, obteniendo resultados muy similares, como se puede ver en la tabla y las gráficas que se presentan a continuación.

Tabla 33. Factor de Equivalencia de Carga por Eje por Agrietamiento – Manual 2018

Tipo de Eje	Carga (t-f)	R ₂ S ₁ T ₁	R ₂ S ₁ T ₅	R ₂ S ₅ T ₁	R ₂ S ₅ T ₅	R ₆ S ₁ T ₁	R ₆ S ₁ T ₅	R ₆ S ₅ T ₁	R ₆ S ₅ T ₅	4 ^a Potencia
SRS	1.0	0.01	0.002	0.01	0.002	0.004	0.002	0.005	0.002	0.001
SRS	4.0	0.43	0.24	0.46	0.27	0.37	0.26	0.43	0.26	0.13
SRS	6.0	1.21	0.88	1.28	0.96	1.17	0.96	1.26	0.95	0.68
SRD	4.0	0.12	0.08	0.12	0.08	0.10	0.08	0.10	0.07	0.06
SRD	7.0	0.64	0.58	0.64	0.59	0.61	0.58	0.62	0.56	0.53
SRD	8.2									
SRD	11.0	2.29	2.99	2.27	2.86	2.48	3.10	2.37	2.96	3.24
TRD	12.0	0.62	0.26	0.67	0.32	0.51	0.30	0.60	0.31	0.41

Tipo de Eje	Carga (t-f)	R ₂ S ₁ T ₁	R ₂ S ₁ T ₅	R ₂ S ₅ T ₁	R ₂ S ₅ T ₅	R ₆ S ₁ T ₁	R ₆ S ₁ T ₅	R ₆ S ₅ T ₁	R ₆ S ₅ T ₅	4ª Potencia
TRD	18.0	1.95	1.06	2.10	1.22	1.78	1.27	2.02	1.28	2.07
TRD	22.0	3.33	2.18	3.59	2.43	3.21	2.59	3.48	2.60	4.63
TrRD	14.0	0.41	0.11	0.45	0.15	0.30	0.14	0.38	0.21	0.14
TrRD	20.0	1.16	0.38	1.28	0.51	0.94	0.48	1.14	0.74	0.57
TrRD	24.0	2.16	0.71	2.14	0.92	1.64	0.90	1.96	1.39	1.19

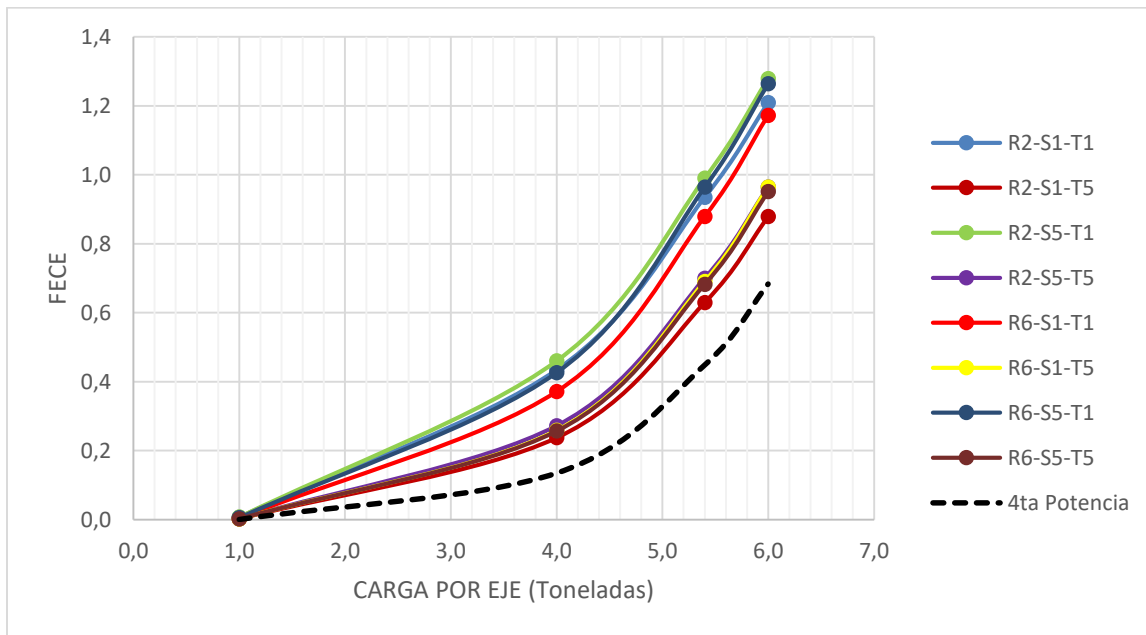


Figura 29. FECE Agrietamiento – Eje Simple Rueda Simple, Manual 2018

Análogamente, para el eje Simple de Rueda Simple (SRS) la denominada Ley de la Cuarta Potencia siempre subestima el daño que se ocasiona a las capas asfálticas debido a la deformación por tracción en la fibra inferior causada por los neumáticos.

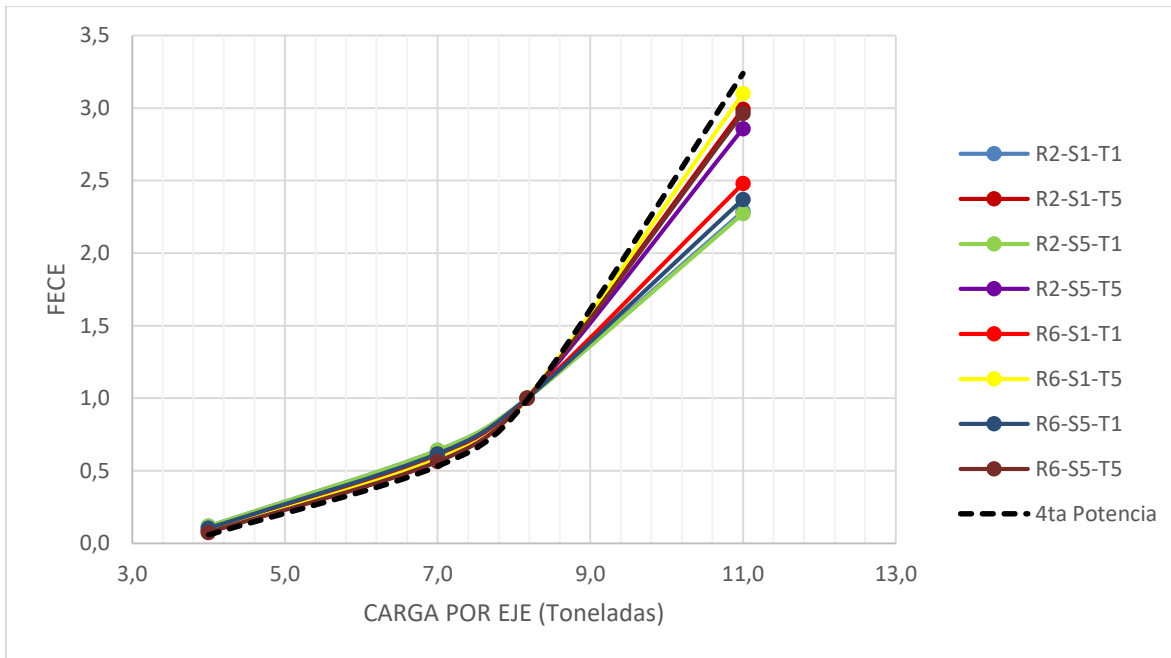


Figura 30. FECE Agrietamiento – Eje Simple Rueda Doble, Manual 2018

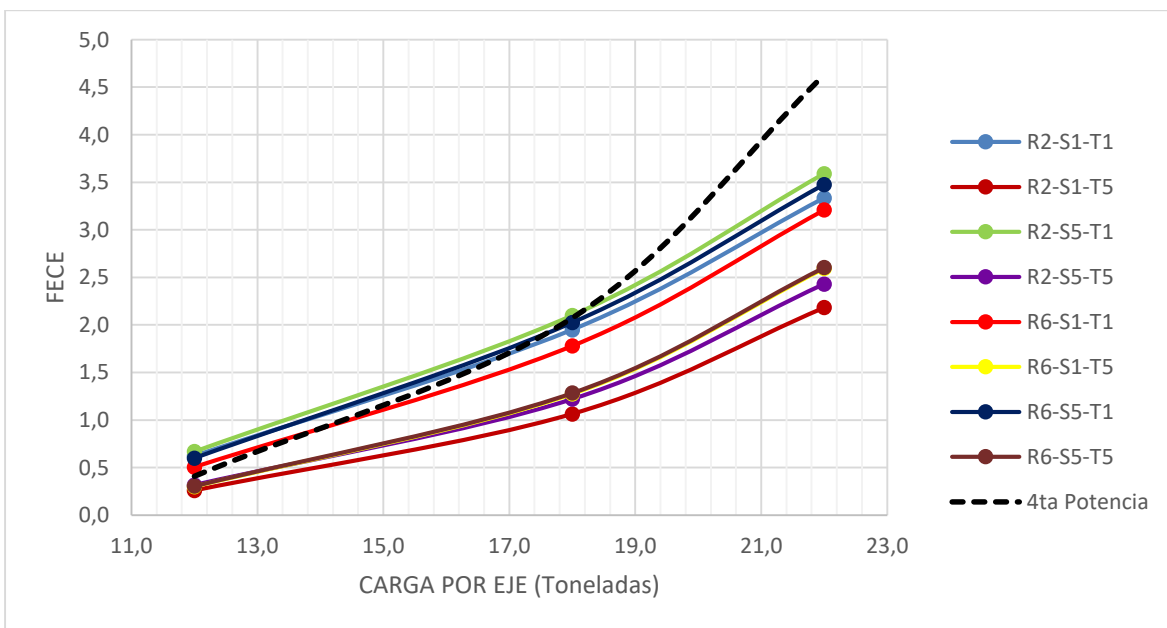


Figura 31. FECE Agrietamiento – Eje Tándem Rueda Doble, Manual 2018

Similarmenete, en las figuras 30 y 31 se evidencia que para los ejes Simple de Rueda Doble (SRD) y Tándem de Rueda Doble (TRD), utilizar la fórmula de la Cuarta Potencia para calcular el factor de daño por fatiga de las capas asfálticas está por el lado de la seguridad en la mayor parte de los casos o por lo menos en los más críticos, que se presentan cuando las cargas por eje son mayores.

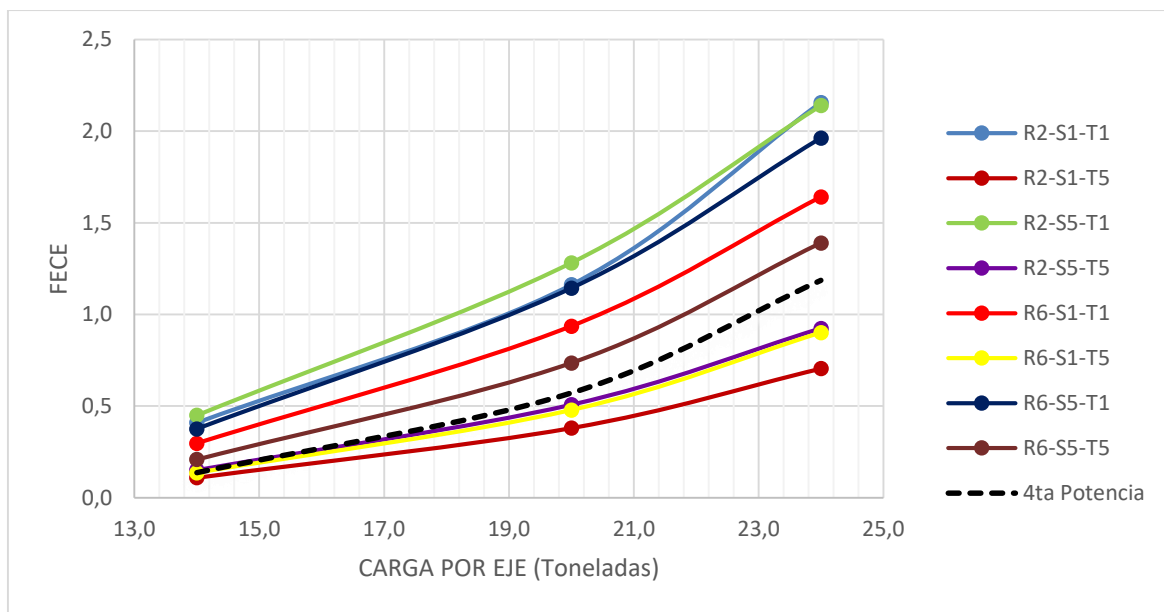


Figura 32. FECE Agrietamiento – Eje Trídem Rueda Doble, Manual 2018

5.3 FECE por Ahuellamiento en la Subrasante

A partir de los mismos cálculos efectuados de esfuerzos y deformaciones para las estructuras de los manuales INVIAS seleccionados sometidas a las diferentes cargas por eje y configuraciones, se extrajeron los datos correspondientes a la deformación vertical actuante sobre la subrasante para calcular las repeticiones

admisibles por ahuellamiento mediante la ecuación del modelo adoptado. Dividiendo las repeticiones admisibles del eje de referencia en cada estructura entre las admisibles para cada combinación de tipo y carga por eje se obtuvieron los factores de equivalencia de carga por eje para ahuellamiento de la subrasante que se presentan a continuación:

Tabla 34. Factor de Equivalencia de Carga por Eje por Ahuellamiento – Manual 2017

Tipo de Eje	Carga (t-f)	R₂S₁T₁	R₂S₁T₅	R₂S₅T₁	R₂S₅T₅	R₆S₁T₁	R₆S₁T₅	R₆S₅T₁	R₆S₅T₅	4^a Potencia
SRS	1.0	0.0003	0.0003	0.0005	0.0003	0.0003	0.0003	0.0005	0.0003	0.0005
SRS	4.0	0.09	0.07	0.12	0.08	0.08	0.07	0.12	0.08	0.13
SRS	6.0	0.43	0.38	0.56	0.40	0.40	0.36	0.56	0.40	0.68
SRD	4.0	0.06	0.06	0.06	0.06	0.057	0.056	0.059	0.06	0.06
SRD	7.0	0.54	0.54	0.55	0.54	0.541	0.536	0.544	0.54	0.53
SRD	8.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
SRD	11.0	3.23	3.27	3.19	3.26	3.25	3.28	3.19	3.26	3.24
TRD	12.0	0.30	0.33	0.40	0.31	0.30	0.35	0.25	0.31	0.41
TRD	18.0	1.50	1.70	1.96	1.57	1.51	1.79	1.83	1.56	2.07
TRD	22.0	3.30	3.80	4.25	3.48	3.31	4.00	3.98	3.46	4.63
TrRD	14.0	0.18	0.11	0.20	0.11	0.111	0.110	0.174	0.111	0.14
TrRD	20.0	0.49	0.49	0.80	0.46	0.45	0.49	0.72	0.46	0.57
TrRD	24.0	1.01	1.01	1.63	0.95	0.93	1.05	1.48	0.94	1.19

Con el fin de evidenciar mejor la tendencia y variabilidad de los resultados respecto a los factores camión que se obtienen de aplicar la formulación de la Cuarta Potencia se graficaron los resultados, como se muestra a continuación.

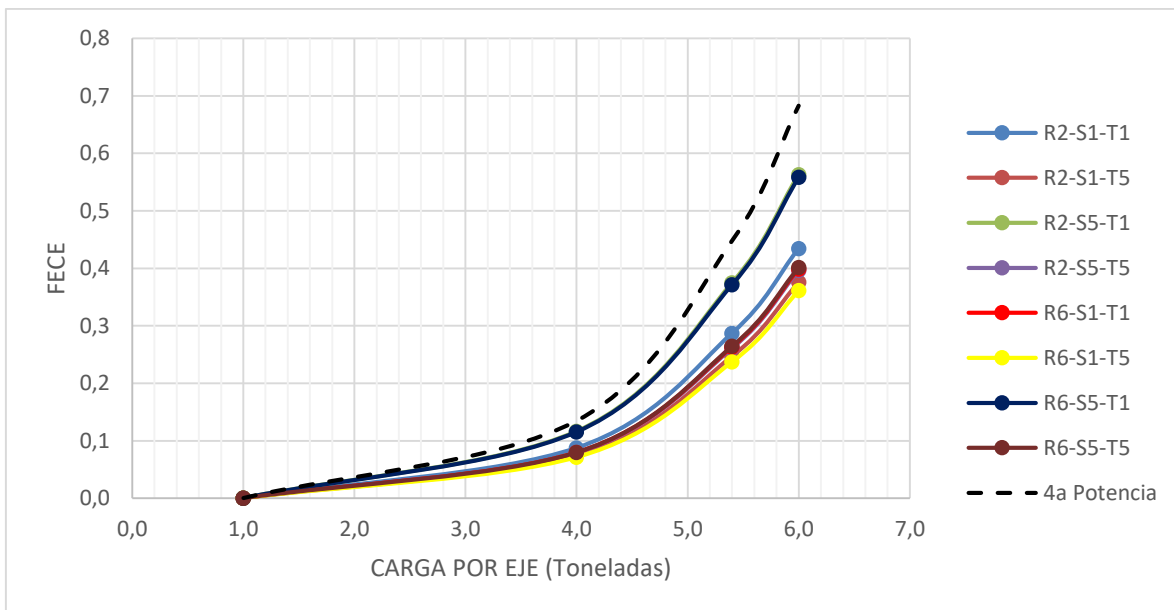


Figura 33. FECE Ahuellamiento – Eje Simple Rueda Simple, Manual 2017

Del análisis de las figuras 33, 34 y 35, puede concluirse que se está por el lado de seguridad en todos los casos al calcular con la simplificación de la Cuarta Potencia los Factores de Equivalencia de Carga por Eje para el mecanismo de falla del pavimento por ahuellamiento de la subrasante, tanto para los ejes Simple de Rueda Sencilla (SRS) y Tándem de Rueda Doble (TRD), en los que se obtuvieron valores menores con el procedimiento realizado, como para el eje Simple de Rueda Doble (SRD) donde los resultados prácticamente coincidieron para todas las cargas.

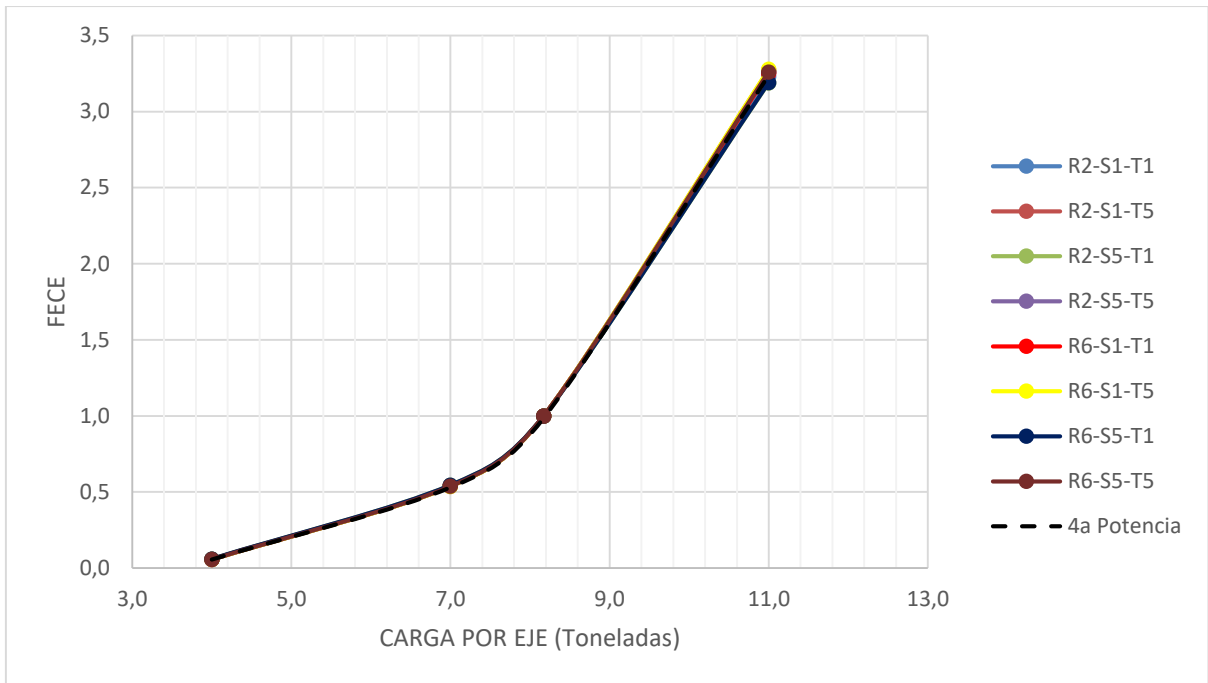


Figura 34. FECE Ahuellamiento - Eje Simple Rueda Doble, Manual 2017

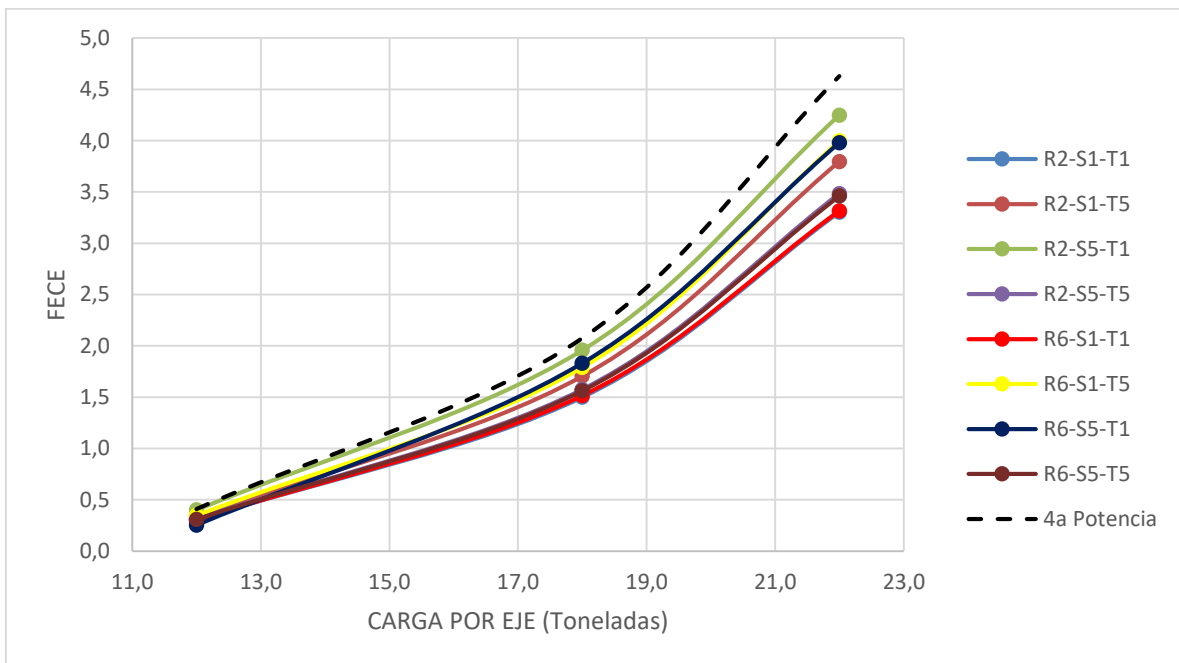


Figura 35. FECE Ahuellamiento – Eje Tándem Rueda Doble, Manual 2017

Según la figura 36 a continuación, para los ejes Trídem de Rueda Doble (TRD) la tendencia no es en todos los casos la misma. Para las estructuras de menores espesores, en este caso, las dos que corresponden a las condiciones de menor tránsito (T1) y subrasante más fuerte (S5), se obtuvieron mayores FECE por ahuellamiento mediante el análisis realizado que al aplicar la fórmula de la Cuarta Potencia. Esto puede deberse a que las curvas de deterioro que relacionan el número de repeticiones admisibles por ahuellamiento con la deformación vertical en la fibra superior de la subrasante, no tienen en cuenta la resistencia de esta última.

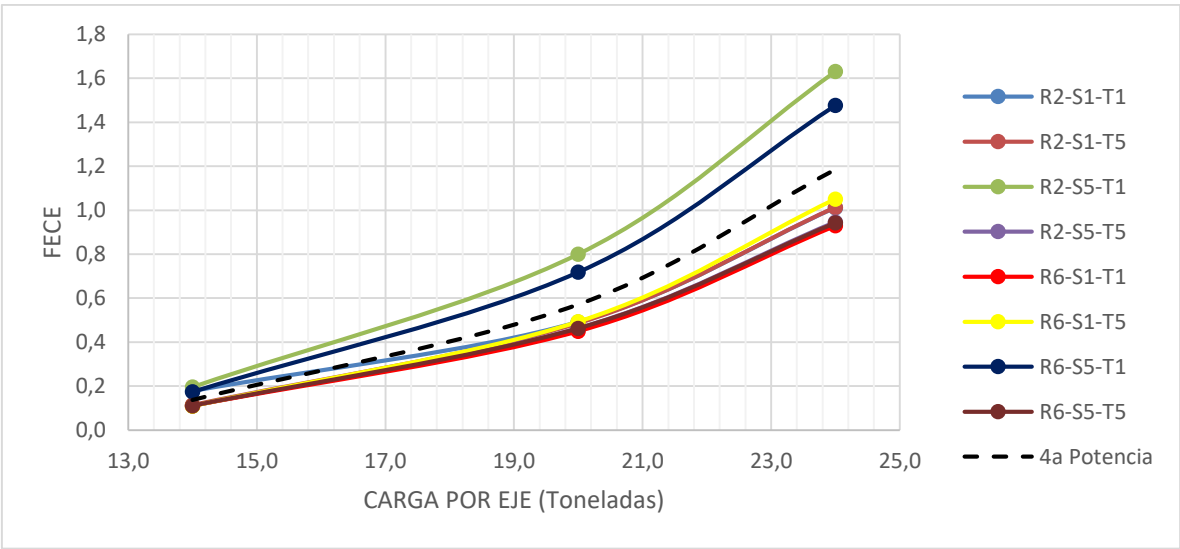


Figura 36. FECE Ahuellamiento – Eje Trídem Rueda Doble, Manual 2017

Los factores de equivalencia de carga por eje por ahuellamiento se calcularon también para las estructuras seleccionadas del manual INVIAS 2018, obteniéndose las tablas y gráficas a continuación.

Tabla 35. Factor de Equivalencia de Carga por Eje por Ahuellamiento – Manual 2018

Tipo de Eje	Carga (t-f)	R ₂ S ₁ T ₁	R ₂ S ₁ T ₅	R ₂ S ₅ T ₁	R ₂ S ₅ T ₅	R ₆ S ₁ T ₁	R ₆ S ₁ T ₅	R ₆ S ₅ T ₁	R ₆ S ₅ T ₅	4 ^a Potencia
SRS	1.0	0.0003	0.0003	0.0005	0.0003	0.0003	0.0003	0.0005	0.0003	0.0005
SRS	4.0	0.09	0.07	0.12	0.08	0.08	0.07	0.13	0.08	0.13
SRS	6.0	0.44	0.37	0.58	0.39	0.41	0.36	0.62	0.40	0.68
SRD	4.0	0.058	0.056	0.06	0.057	0.057	0.056	0.060	0.057	0.06
SRD	7.0	0.541	0.539	0.545	0.538	0.539	0.539	0.546	0.538	0.53
SRD	8.2	1.00								
SRD	11.0	3.23	3.28	3.18	3.26	3.25	3.28	3.18	3.26	3.24
TRD	12.0	0.31	0.36	0.42	0.31	0.30	0.37	0.44	0.31	0.41
TRD	18.0	1.53	1.82	2.03	1.59	1.51	1.91	2.12	1.57	2.07
TRD	22.0	3.38	4.06	4.40	3.51	3.29	4.27	4.60	3.49	4.63
TrRD	14.0	0.13	0.12	0.21	0.11	0.11	0.12	0.23	0.12	0.14
TrRD	20.0	0.52	0.51	0.85	0.47	0.46	0.53	0.93	0.50	0.57
TrRD	24.0	1.06	1.07	1.73	0.95	0.94	1.11	1.90	1.02	1.19

En este caso, los resultados encontrados fueron similares. Resumiendo, tanto para el eje Simple de Rueda Sencilla (SRS) como para el Tándem de Rueda Doble (TRD) se obtienen menores FECE por ahuellamiento en la subrasante que con la simplificación de la Cuarta Potencia, para los ejes Simples de Rueda Doble (SRD) se obtiene prácticamente el mismo resultado para cualquier carga y sólo se obtienen factores mayores cuando se analizan las dos estructuras de menor espesor de capas asfálticas y granulares bajo la carga del eje Trídem de Rueda Doble (TrRD).

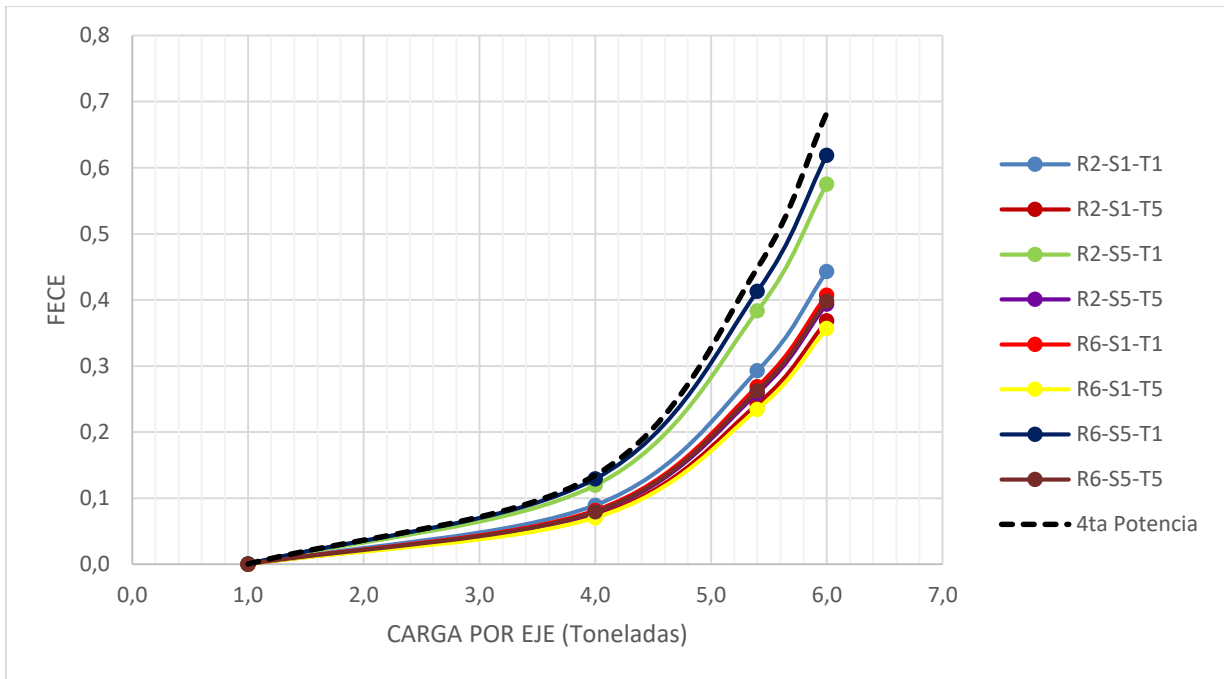


Figura 37. FECE Ahuellamiento – Eje Simple Rueda Simple, Manual 2018

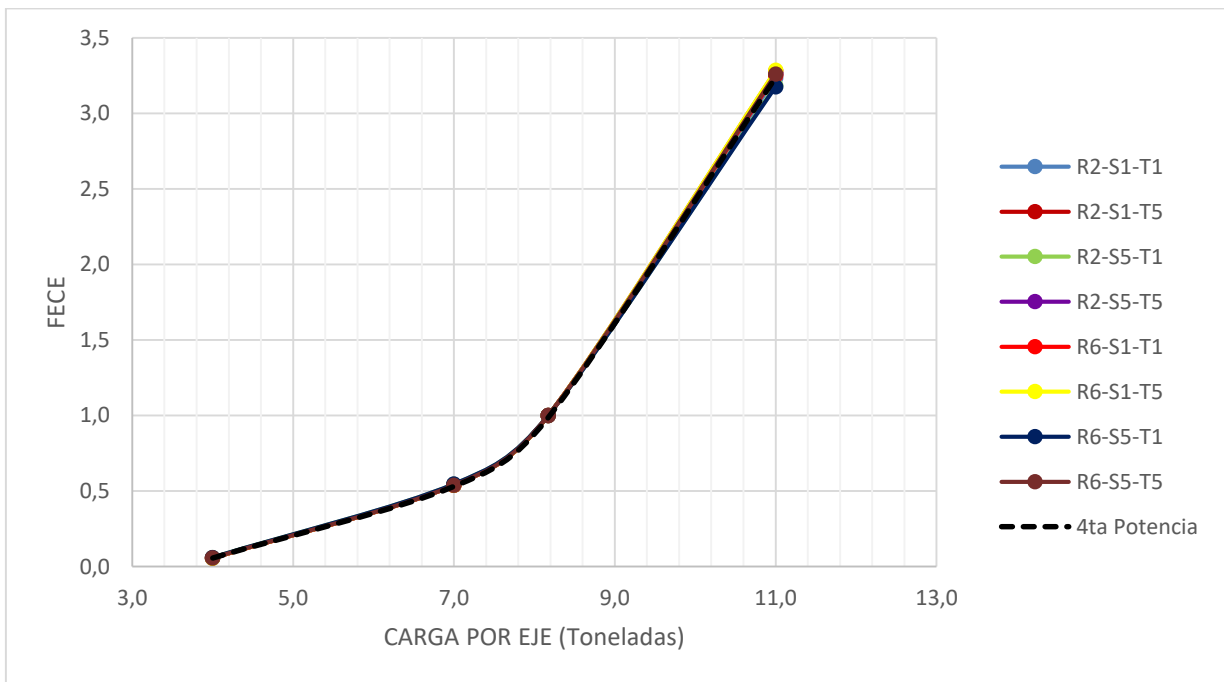


Figura 38. FECE Ahuellamiento - Eje Simple Rueda Doble, Manual 2018

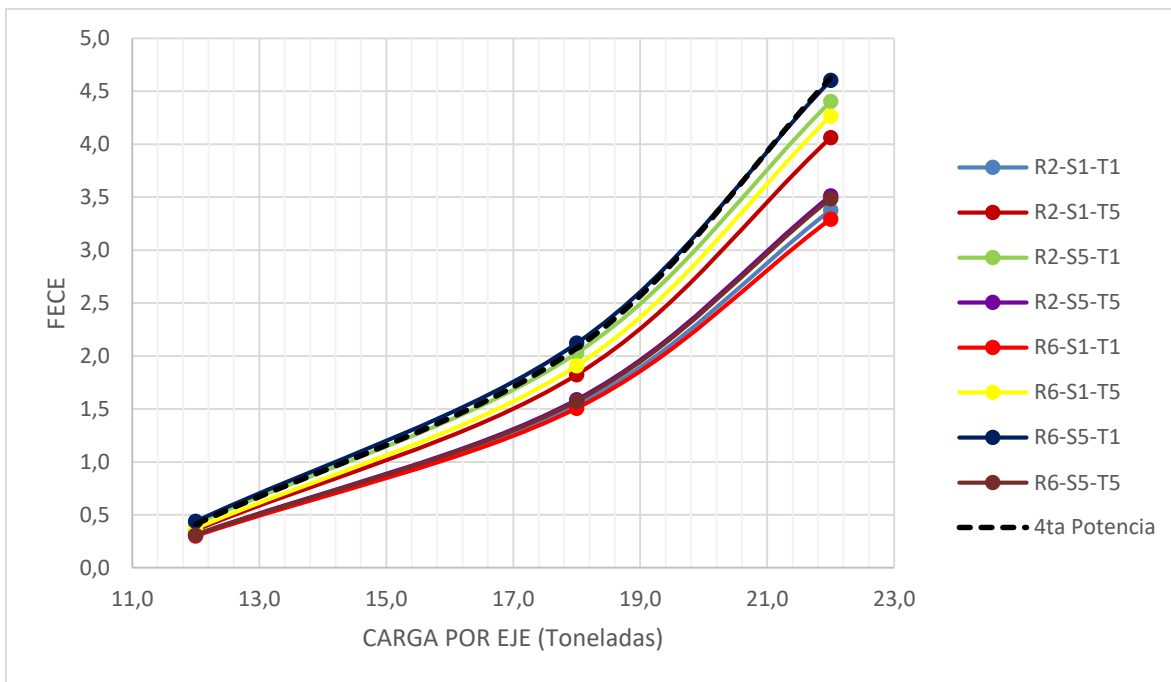


Figura 39. FECE Ahuellamiento – Eje Tándem Rueda Doble, Manual 2018

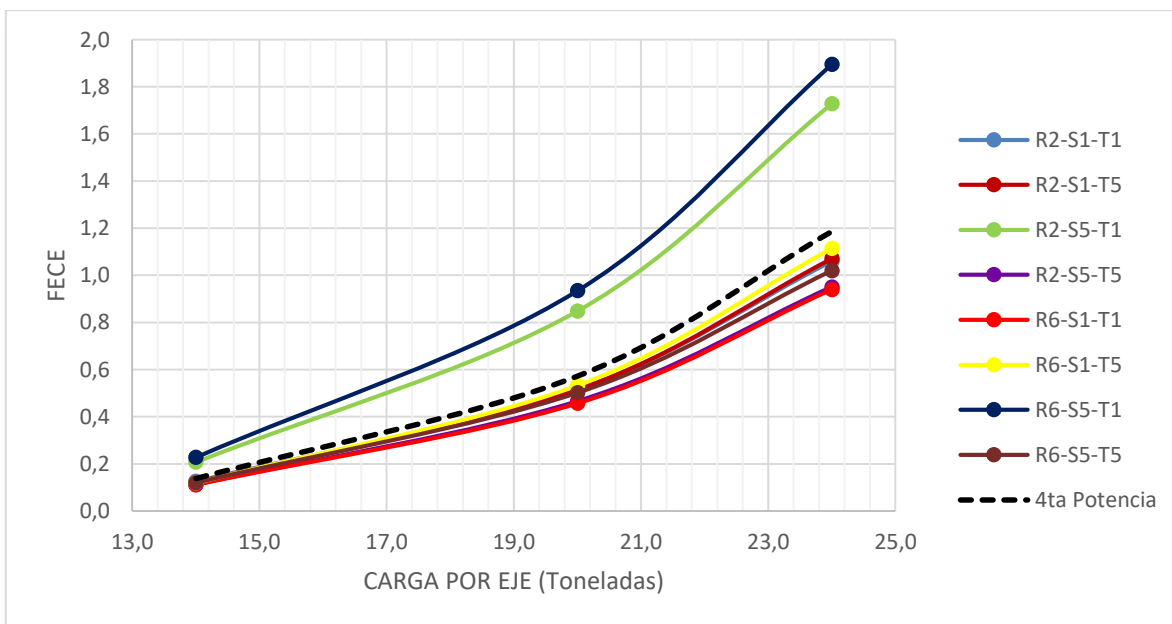


Figura 40. FECE Ahuellamiento – Eje Trídem Rueda Doble, Manual 2018

6. CONCLUSIONES

Con base en los módulos de granulares estimados mediante la metodología MEPDG y la aplicación del modelo $K_1 - K_3$ con los parámetros evaluados por la Universidad del Cauca, que se presentan en los manuales INVIAS 2017 y 2018, puede establecerse que los materiales granulares desarrollan módulos menores a los que normalmente se utilizan para dimensionamiento de pavimentos con la metodología AASHTO 1993. Aun cuando en algunos casos se presentaron inconsistencias, es evidente que los módulos son menores a los supuestos y disminuyen con la profundidad.

El anterior resultado puede no ser tan crítico al utilizar la metodología AASHTO 1993 para dimensionar pavimentos, dado que esta es empírica y sus formulaciones se establecieron con base en estos valores elevados de módulos de granulares. Sin embargo, al utilizar estos valores máximos que corresponden a granulares sometidos a altos niveles de esfuerzos, que no se presentan normalmente en los pavimentos, para modelar una estructura mediante el método racional, se estaría sobre estimando el apoyo de las capas asfálticas y por lo tanto sub dimensionando su espesor. Esto se evidencia específicamente al comparar los FECE por fatiga calculados mediante la metodología MEPDG con los que se obtienen con la formulación de la Cuarta Potencia.

Así entonces, se verifica que para condiciones de altas cargas por eje las estructuras con mezclas asfálticas rígidas apoyadas sobre bases granulares son poco recomendables, porque a mayor espesor de las capas de rodadura los granulares de base estarán sometidos a menores esfuerzos y por lo tanto desarrollarán menores módulos. Lo ideal sería utilizar una base estabilizada cuyo módulo es bastante mayor y no depende del estado de esfuerzos al que esté sometida. Así se tendrá un mejor apoyo y por lo tanto menores deformaciones tangenciales o de tensión en las capas más rígidas (menor consumo de fatiga).

Finalmente, los factores camión estimados evidencian la problemática más frecuente en las vías de Bogotá y del País, que es el daño por agrietamiento de las capas asfálticas, debido tanto a las cargas excesivas por eje, debido a la falta de control, como a la diferencia de rigidez entre las mezclas asfálticas (que son usualmente bastante rígidas) y la capa sobre la que se apoyan (granulares que desarrollan bajos módulos). Por esta razón, se encontró que para el mecanismo de falla de agrietamiento por fatiga los factores camión son más críticos que para la falla por ahuellamiento de la subrasante. Cabe aclarar, que normalmente el factor que condiciona los diseños es la fatiga y en adición, que el ahuellamiento que normalmente se presenta en las vías de Bogotá y las carreteras de Colombia es en las mezclas asfálticas por circulación lenta de vehículos y/o altas temperaturas del pavimento. Las pocas veces que se presenta ahuellamiento desde la subrasante en

estos pavimentos se debe a estructuras granulares de bajo espesor o con presencia de agua que causa ablandamiento y que se incrementen los esfuerzos debidos al tráfico sobre la subrasante.

7. BIBLIOGRAFÍA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavements Structures 1993*. Washington: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008). *AASHTO Guide for Design of Pavements Structures 2008*. Washington: AASHTO.
- Arias, E. (2020). *Propuesta para una Guía de Diseño Mecánica - Empírica para Pavimentos Flexibles y Semi-Rígidos de Costa*. San José.
- Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica. (2002). *Catálogo de Deterioros de Pavimentos Flexibles*. México.
- Garnica, P. (2012). *Espetros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.
- Hernández, R., Garnica, P., & Solorio, R. (2016). Visión general sobre la nueva guía de diseño mecanicista AASHTO-ME y los modelos de deterioro para pavimentos flexibles. *Asociación Mexicana del Asfalto A.C.*
- Higuera, C. (2010). *Nociones Sobre Metodos De Diseño De Estructuras De Pavimentos De Carreteras. Vol 1*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2001). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*. Querétaro.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Capítulo 3 - Afirmados, Subbases y Bases. En *INVÍAS, Especificaciones generales de construcción de carreteras* (págs. Art 330-13). Bogotá: Ministerio de Transporte.
- Instituto Nacional de Vías. (2017). *Anexo 4 Caracterización de la Resistencia de Diseño de la Subrasante. Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Altos y Medios Volúmenes de Tránsito*. Popayán: Ministerio de Transporte de Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2017). *Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Altos y Medios Volúmenes de Tránsito*. Popayán: Ministerio de Transporte de Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2018). *Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito. 2da Edición*. Popayán: Ministerio de Transporte de Colombia.
- Izquierdo, C. (2019). *Análisis Mecanicista para evaluar el Pavimento de la trocha 12 - Vía de acceso al pozo Trogon, Municipio de Guamal, Meta*. Bogotá.

- Macea, L., Fuentes, L., & Alvarez, A. (2013). *Evaluación de Factores Camión de los Vehículos Comerciales de Carga que circulan por la Red Vial Principal Colombiana*. Barranquilla.
- Martínez Díaz, M., & Pérez, I. (2015). Mechanistic-empirical pavement design guide: features and distinctive. *Revista de la Construcción*, 32-40.
- Mena, W. (2013). *Implementación del Modelo Climático de la MEPDG "AASHTO 2008" en Colombia para Tres Condiciones Climáticas*. Medellín.
- Prozzi, J., & Hong, F. (2006). *Traffic Characterization for a Mechanistic-Empirical Pavement Design*. Austin, Texas.
- Universidad Nacional de Colombia. (2006). *Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles*. Bogotá: Ministerio de Transporte.