

**ANÁLISIS DEL FACTOR DE DAÑO DE EQUIPOS MODULARES ESPECIALES
CON CARGAS EXTRAPESADAS Y EXTRADIMENSIONADAS EN UNA
ESTRUCTURA TÍPICA DE PAVIMENTO FLEXIBLE EN COLOMBIA**

JAVIER GIOVANNI ROJAS TURGA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
DIVISION DE INGENIERIA
MAESTRIA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTA D.C.**

2019

**ANÁLISIS DEL FACTOR DE DAÑO DE EQUIPOS MODULARES ESPECIALES
CON CARGAS EXTRAPESADAS Y EXTRADIMENSIONADAS EN UNA
ESTRUCTURA TÍPICA DE PAVIMENTO FLEXIBLE EN COLOMBIA**

PRESENTADO POR:

JAVIER GIOVANNI ROJAS TURGA

**PROYECTO DE GRADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL
TÍTULO DE MAGISTER EN INFRAESTRUCTURA VIAL**

DIRECTOR:

ING. MSc. JUAN MIGUEL SÁNCHEZ DURÁN

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

DIVISION DE INGENIERIA

MAESTRIA EN INFRAESTRUCTURA VIAL

BOGOTA D.C.

2019

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
TÍTULO DEL PROYECTO	3
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
OBJETIVOS	5
JUSTIFICACIÓN	6
ESTADO DEL ARTE.....	10
METODOLOGÍA	58
DESARROLLO METODOLOGICO	61
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	120
BIBLIOGRAFÍA	122

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Transporte fluvial tanques de Ecopetrol	15
Ilustración 2: Transporte terrestre tanques Ecopetrol	16
Ilustración 3: Transporte terrestre e instalación de tanques	17
Ilustración 4: Características de los modulares	25
Ilustración 5: Dimensiones de modulares	26
Ilustración 6: Dimensiones de modulares - Vista perfil	27
Ilustración 7: Equipo modular con carga de aproximadamente 800 toneladas	27
Ilustración 8: Transporte extrapesado y extradimensionado	28
Ilustración 9: Transporte extrapesado y extradimensionado	29
Ilustración 10: Transporte extrapesado y extradimensionado Parque Villonaco	30
Ilustración 11: Transporte extrapesado y extradimensionado Parque Villonaco	30
Ilustración 12: Transporte extrapesado y extradimensionado tambores	31
Ilustración 13: Transporte extrapesado y extradimensionado Vhicoa	31
Ilustración 14: Transporte extrapesado y extradimensionado Puente Río Orinoco	32
Ilustración 15: Transporte extrapesado y extradimensionado Planta La Chorrera	32
Ilustración 16: Estructura de pavimento flexible	34
Ilustración 17: Estructura de pavimento flexible	35
Ilustración 18: Estructura de pavimento rígido	36
Ilustración 19: Estructura de pavimento articulado	37
Ilustración 20: Estructura de zona industrial recibiendo transporte especial	38
Ilustración 21: Configuración de ruedas para semitrailer típico	43
Ilustración 22: Relación entre la presión de contacto y la presión de llanta	45
Ilustración 23: Estado de esfuerzos en la subrasante	48
Ilustración 24: Tiempo de pulsación vs profundidad bajo superficie	49
Ilustración 25: Ahuellamiento	50
Ilustración 26: Ahuellamiento	51
Ilustración 27: Descripción Software easyLOAD	55
Ilustración 28: Pantalla de descripción del programa PITRA PAVE	56
Ilustración 29: Pantalla de inicio del programa OPENPAVE	56
Ilustración 30: Modular 6 Líneas – Vigas – Modular 6 Líneas	61
Ilustración 31: Transporte en Modular 6 Líneas – Vigas – Modular 6 Líneas	62
Ilustración 32: Transporte en Modular 6 Líneas – Vigas – Modular 6 Líneas	63
Ilustración 33: Distribución de Carga por Línea	64
Ilustración 34: Distribución de Carga por Línea y Rueda Ejes Delanteros	65
Ilustración 35: Distribución de Carga por Línea y Rueda Ejes Traseros	66
Ilustración 36: Ruta a Transitar	68
Ilustración 37: Ruta a Transitar	69
Ilustración 38: Serie Histórica del tránsito (Caucasia – La Apartada)	76
Ilustración 39: Grafica de serie histórica de tránsito (Caucasia – La Apartada)	77
Ilustración 40: Estructura típica de pavimentos según cartilla INVIAS	83
Ilustración 41: Estructura 1 Para Análisis CBR=3	84
Ilustración 42: Estructura 2 Para Análisis CBR=5	84

Ilustración 43: Modulo Dinámico Mezcla	88
Ilustración 44: Proporción de análisis de deformaciones.....	91
Ilustración 45: Puntos de Análisis en sistema cartesiano	92
Ilustración 46: Profundidades de Análisis.....	94
Ilustración 47: Ingreso datos PitraPave estructura 1 ejes modulares delanteros	97
Ilustración 48: Resultados deformaciones T7R3S1 ejes modulares delanteros.....	98
Ilustración 49: Ingreso datos PitraPave estructura 1 ejes modulares traseros.....	99
Ilustración 50: Resultados deformaciones T7R3S1 Ejes Modulares Traseros.....	100
Ilustración 51: Datos y Resultados PitraPave eje estándar rueda doble de 8.2 Ton.....	102
Ilustración 52: Datos y Resultados PitraPave eje estándar rueda doble de 8.2 Ton estructura T7-R3-S2	103
Ilustración 53: Resultados deformaciones T7R3S2 ejes modulares delanteros.....	104
Ilustración 54: Resultados deformaciones T7R3S2 ejes modulares traseros	105
Ilustración 55: Comparación de FDV por Fatiga tonelada Útil T7R3S1	115
Ilustración 56 : Comparación de FDV por Ahuellamiento por tonelada Útil T7R2S1	116
Ilustración 57 : Comparación de FDV por Fatiga por tonelada Útil T7R2S2.....	116
Ilustración 58 : Comparación de FDV por Ahuellamiento tonelada Útil T7R2S2.....	117

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Pesos máximos por eje	18
Tabla 2: Peso Bruto Vehicular máximo por designación	18
Tabla 3: Características de los ejes del remolque y cabezote	66
Tabla 4: Identificación del Clima del trayecto	72
Tabla 5: Identificación del clima La Apartada	73
Tabla 6: Identificación del clima Caucasia	73
Tabla 7: Porcentaje de vehículos TRANSITO	78
Tabla 8: Transito Promedio Diario	79
Tabla 9: Factores de Equivalencia de Carga	80
Tabla 10: Transito y Volumen con Confiabilidad	80
Tabla 11: Modelo de regresión y confiabilidad	81
Tabla 12: Resultado del transito	81
Tabla 13: Transito Identificado	82
Tabla 14: Estructuras seleccionadas para el análisis del Factor Daño	83
Tabla 15: Propiedades de la Subrasante	86
Tabla 16: Retrocálculo de Módulos para la MDC	89
Tabla 17: Módulos y Relación de Poisson para las estructuras de análisis	89
Tabla 18: Datos para modelación Estructura 1 eje modular delantero y trasero	97
Tabla 19: Pesos y área en ejes y llantas estructura 1 ejes modulares delanteros	97
Tabla 20: Pesos y área en ejes y llantas estructura 1 ejes modulares traseros	99
Tabla 21: Datos para modelación Estructura 2 ejes modular delanteros y traseros	103
Tabla 22: Fórmulas simplificadas para cálculo del EALF	110
Tabla 23: Factores daño (EALF) por tipo de camión	110
Tabla 24: Factor Daño T7-R3-S1	113
Tabla 25: Factor Daño T7-R3-S2	113
Tabla 26: Comparación de FDV de Equipo especial con vehículos comerciales	114
Tabla 27: Proporción Daño T7-R3-S1	117
Tabla 28: Proporción Daño T7-R3-S2	118
Tabla 29: Proporción Daño T7-R3-S2	118
Tabla 30: Proporción Daño T7-R3-S2	118

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial es uno de los aspectos más incidentes en el crecimiento económico y desarrollo sostenible de un país, por tal motivo es de vital importancia que las redes viales nacionales se encuentren en un estado óptimo para su uso. Por lo anteriormente descrito es primordial que las estructuras de pavimento en Colombia se construyan con una alta capacidad estructural que permita soportar las cargas impuestas por los elevados volúmenes de tránsito y las condiciones ambientales propias de los climas tropicales, de manera que puedan garantizar un paso seguro, confiable, y confortable para el parque automotor.

El crecimiento de un país y su infraestructura están tomados de la mano con el transporte especial y el desarrollo de grandes proyectos de interés nacional, lo cual implica movilizaciones de cargas indivisibles, extradimensionadas y extrapesadas por las carreteras, que no pueden transportar los vehículos convencionales normalmente usados para el cálculo del diseño de los pavimentos de la infraestructura nacional en Colombia. Por tal razón en los últimos años se ha optado por implementar vehículos especiales que carguen piezas extrapesadas y extradimensionadas sin tener que dividir las para disminuir su peso, sino mejorando mecánicamente la distribución de una carga puntual en varios ejes y líneas de rotación, para provocar menos impacto sobre estructuras como pavimentos y puentes. Pero aún no existe suficiente confianza para dejar movilizar piezas extrapesadas por falta de comprobaciones que demuestren que estos equipos distribuyen las cargas causando menos o similar impacto en una estructura que los tractocamiones más pesados que usualmente transitan las carreteras nacionales. Y aunque en Europa y Norteamérica la circulación

de estos equipos ya cuenta con regulaciones claras, en Colombia aún falta un poco más de confianza y demostraciones de ingeniería que soporten la viabilidad y el uso de dichos equipos.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, este proyecto tiene como objetivo realizar comparaciones teóricas entre los esfuerzos y deformaciones que producen un vehículo especial y los camiones de diseño. Estos resultados permitirán cuantificar mediante un modelo, el deterioro sobre las estructuras del pavimento y aportarán a la confiabilidad del paso de piezas extrapesadas y extradimensionadas por nuestra infraestructura nacional. Así entonces, se harán análisis con cargas extrapesadas de transportes reales con equipos especiales que actualmente se utilizan Colombia, que permitan demostrar viabilidad para hacer movilizaciones de este tipo y así progresar en estudios referentes a este tema para acelerar el crecimiento y desarrollo de los proyectos de interés nacional que están aumentando en los últimos años en Colombia.

Para poder realizar un transporte extrapesado y extradimensionado en Colombia es necesario solicitar un permiso especial al Ministerio de Transporte, el cuál como máxima autoridad en el tema ha delegado en el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) la potestad de recibir y evaluar los estudios técnicos pertinentes para su correcta otorgación. Dichos estudios se componen de un estudio de pavimentos, un estudio de capacidad de carga de puentes y un plan de seguridad vial y manejo de tránsito. Es aquí donde últimamente las empresas de transporte especial en Colombia, al presentar estudios de pavimentos que demuestran el impacto a la infraestructura que causan estos transportes en equipos modulares, no han tenido lineamientos claros acerca de los procedimientos y el alcance requerido. Por este motivo, surge la idea de establecer unos lineamientos mediante este proyecto y realizar una comprobación con cálculos de ingeniería para un proyecto real, de tal manera que sirva como base para las empresas de transportes especiales,

las compañías logísticas extranjeras y el sector de la ingeniería de pavimentos, definiendo un alcance más claro y consolidando un procedimiento paso a paso efectivo.

TÍTULO DEL PROYECTO

ANÁLISIS DEL FACTOR DE DAÑO DE EQUIPOS MODULARES ESPECIALES CON CARGAS EXTRAPESADAS Y EXTRADIMENSIONADAS EN UNA ESTRUCTURA TÍPICA DE PAVIMENTO FLEXIBLE EN COLOMBIA.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El problema consta de:

Descripción: Es inusual percibir en Colombia el desarrollo de un transporte extrapesado y extradimensionado haciendo uso de la infraestructura vial nacional, debido a que en su mayoría estos transportes se realizan para dar cumplimiento al desarrollo de proyectos de interés nacional en el país, tales como hidroeléctricas, otros proyectos de generación de energía, petroleras, mega construcciones, el sector del transporte y la aviación entre otros. Esto aplica únicamente con el fin de transportar piezas indivisibles. Por tales motivos el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), para poder aprobar la realización de dichos transportes especiales, solicita estudios de pavimentos como requisito para otorgar permisos por la infraestructura vial nacional, y es aquí donde se evidencia la carencia de comprobaciones de ingeniería o cálculos que demuestren el impacto que hace un vehículo modular especial sobre un pavimento, que puede cargar más de 7 veces lo que carga una tractomula normal. Por razones como: lo inusual que es realizar transportes especiales y

extrapesados, las pocas empresas dedicadas a esto, y la carencia de información y de documentos públicos para soportar estos estudios, es que surge la idea de realizar una demostración de ingeniería que indique los impactos que causa un transporte extrapesado en un pavimento, para esto se tomó un caso real y se pretende que este documento sirva para el uso de la sociedad y las empresas que se dedican a estas actividades, previendo que el país contempla grandes desarrollos en los próximos años que requerirán el uso de equipos modulares para ejecutar transportes especiales, extrapesados y extradimensionados.

Es importante resaltar que cuando se realizan transportes extrapesados en Colombia, las empresas de transporte suelen presentar al INVIAS, interpretaciones personales con comprobaciones mecanicistas de los daños que puede ocasionar un equipo modular y su carga extrapesada al pavimento, pero no hay una guía o metodología que el Ministerio de Transporte otorgue a las empresas con un paso a paso detallado de cómo realizar dichos cálculos, por lo cual basado en anteriores estudios presentados y en un análisis de cómo puede crearse una especie de guía, surge la idea de hacer este documento.

OBJETIVOS

Objetivo general

Hacer una comparación teórica mediante un análisis mecanicista del daño que pueden ocasionar sobre una estructura típica de pavimento flexible en Colombia, los equipos modulares especiales con cargas extrapesadas y extradimensionadas versus los daños que ocasionan los tractocamiones comerciales estandarizados por el Ministerio de Transporte.

Objetivos específicos

- Compilar la información necesaria referente a equipos modulares especiales de transporte, normatividad de transporte extrapesado, estructuras de pavimentos flexibles comunes en Colombia, transportes especiales en América latina y demás antecedentes referentes para realizar un transporte extrapesado y extradimensionado analizando sus características técnicas, dimensiones, tipos de uso y especificaciones generales.
- Realizar la modelación del peso de una carga extrapesada más el peso del equipo modular especial, con un software apropiado que demuestre la manera como se repartirá la carga indivisible extrapesada sobre los diferentes ejes (líneas de rotación) y sobre cada una de las llantas de los ejes, escogiendo una configuración de modular crítica y un diagrama de distribución de cargas sobre el pavimento.

- Identificar las estructuras típicas de pavimento flexible para el presente análisis, teniendo en cuenta el tránsito, las carreteras y climas por los que se tiene previsto que circule el vehículo modular, acorde con un ejemplo real de transporte, e identificar las variables de diseño y propiedades para modelar las cargas extrapesadas en un software de multicapa elástica.
- Realizar cálculos de ingeniería bajo un método mecanicista que permita identificar las deformaciones por fatiga y Ahuellamiento, y el factor daño que genera una carga extrapesada y extradimensionada en un equipo modular sobre una estructura de pavimento identificada, para posteriormente compararla con los daños que causa un equipo Tractocamión estandarizado en Colombia.

JUSTIFICACIÓN

Los transportes especiales extrapesados y extradimensionados que se realizan en el territorio nacional colombiano aportan al desarrollo y ejecución de proyectos de interés nacional en los sectores mineros y energéticos, la construcción, la industria petrolera, las comunicaciones y el transporte integral entre otros, esto hace que se vuelvan de vital importancia para el desarrollo de la economía del país y generen aporte en la implementación de la inversión extranjera en Colombia y el progreso de la calidad de vida de cada hogar colombiano.

El transporte especial necesita movilizarse por un corredor de la infraestructura vial existente para cumplir con el objetivo de entregar la carga extrapesada y extradimensionada a su destino final.

Los corredores viales en Colombia, en su mayoría y por normativa nacional, son diseñados para un tránsito de buses y camiones cuyas dimensiones y pesos total y por eje están reglamentados en la resolución 4100 de 2004, que ha sido modificada en algunos de sus artículos por posteriores sin cambiar sustancialmente.

Así en Colombia la máxima carga que se puede transportar por un corredor vial, sin ser extrapesada, corresponde a una tractomula convencional C3S3, la cual está compuesta por un cabezote con un eje simple y un eje tandem más un semiremolque con un eje tridem que no pueden exceder cargar piezas divisibles o una indivisible de máximo 35 toneladas, para que con el peso de los equipos no se exceda un PBV (Peso Bruto Vehicular) máximo de 52 toneladas.

Es decir que un transporte con más de 52 toneladas de PBV comienza a denominarse un transporte extrapesado, y aunque en Colombia se han llegado a realizar transportes con rangos desde las 110 hasta 320 toneladas de PBV, lo cual no es muy común, existe la especulación de que un transporte con un peso de hasta 6 veces mayor al permitido dañará y deteriorará la infraestructura.

Por tal razón este proyecto tiene como objetivo demostrar en el caso de los pavimentos, que a pesar de que una carga extrapesada exceda por mucho el peso permitido para un tractocamión “común” reglamentado en la resolución 4100 de 2004, con el uso de transportes modulares especiales el impacto destructivo que genera la carga extrapesada puede controlarse mediante un equipo capaz de realizar una mejor distribución de la carga en una mayor cantidad de líneas de rotación y ejes con alta tecnología y resistencia de carga (los cuales en la industria del transporte extrapesado son llamados “Equipos Modulares”).

Estos transportes son muy comunes en Norteamérica, Europa y Asia, pero en nuestro país por no tener mucho tiempo de estar en progreso y alto desarrollo no es habitual su uso. Adicionalmente, muchas de las piezas que llegan para transportarse son piezas indivisibles, que requieren ser transportadas completas debido a que la casa matriz o de fabricación está fuera del país y por tal razón traer máquinas y personal que ensamblen las piezas en el proyecto se sale de los costos y recursos asignados, que hacen que dichos proyectos sean viables.

Acorde a lo anteriormente descrito para realizar un transporte especial y obtener permisos para su ejecución usando la infraestructura vial, en el caso de los pavimentos se debe demostrar al Instituto Nacional de Vías (INVIAS), que el impacto que van a sufrir los pavimentos por los cuales se proyecta transportar la carga no van a producir un deterioro inmediato ni acelerado del pavimento, y no son significativamente mayores a los que ejerce un camión de diseño o reglamentario.

Con el presente proyecto se pretende cuantificar el impacto o deterioro que puede producir un transporte extrapesado a los pavimentos, ya que no hay documentos públicos que lo demuestren con casos reales, porque estas movilizaciones no han sido frecuentes en Colombia, son contadas con una mano las empresas que lo hacen y no hay existencia de lineamientos y metodologías definidos por el INVIAS o el Ministerio de Transporte para realizar un estudio de impacto destructivo, como si lo hay para realizar el Diseño de Pavimentos (Para tal caso manuales INVIAS o IDU).

Esta tesis pretende hacer este aporte pensando en que la industria del transporte extrapesado y extradimensionado en Colombia tenga un mayor auge y en que el país siga evolucionando rápidamente y las futuras empresas de transporte especial puedan valerse de documentos como este para realizar sus respectivos estudios y hacer aportes al país que signifiquen que las vías deben estar abiertas a estos transportes y que la infraestructura debe modernizarse como en otros países con mayor desarrollo, los cuales están más abiertos a logísticas de este tipo.

ESTADO DEL ARTE

Definiciones:

Carga indivisible: Carga que por sus características no puede ser dividida o fraccionada para su transporte.

Carga extradimensionada: Aquella carga indivisible que excede las dimensiones de carrocería de los vehículos convencionales homologados por el Ministerio de Transporte según la resolución 4100 de 2004, para la movilización de carga en tránsito normal por las vías públicas.

Carga extrapesada: Carga indivisible que una vez montada en vehículos convencionales homologados por el Ministerio de Transporte, supera los límites de peso bruto vehicular o de peso por eje autorizados según la resolución 4100 de 2004, según las normas vigentes para el tránsito normal en las vías públicas.

Eje simple: Ensamble de dos o cuatro llantas unidas entre sí por una línea de rotación.

Modular: Equipo con plataforma especial para carga extrapesada, compuesto por módulos que se pueden unir para soportar mayor capacidad de carga.

Peso Bruto Vehicular (PBV): Peso de un vehículo provisto de combustible, equipo auxiliar habitual y al máximo de carga. (Peso del equipo + peso de la carga).

Peso por eje: Peso total que transmiten a la carretera las llantas de un eje de un vehículo.

Semi remolque: Vehículo no motorizado con capacidad superior a cinco toneladas, destinado a ser halado por un tracto-camión o cabezote sobre el cual se apoya y le transmite parte de su peso.

Remolque: Vehículo no motorizado con capacidad superior a dos toneladas destinado a ser halado por un camión, sin transmitir carga a los ejes de este último.

El transporte en Colombia

La revolución en el transporte expresado en ferrocarriles y barcos de vapor, se inicia en el país con el ferrocarril de Panamá, el primero en Colombia y cuya construcción se remonta a 1828, y con la navegación a vapor por el Magdalena, autorizada en 1823, y que tarda hasta la década de los años 30 para lograr algunos méritos, aunque su regularización sólo se presentará en la década de 1880, cuando los ferrocarriles empalmaron las zonas de montaña con un medio fluvial en el Magdalena, que emplea naves de tamaño más adecuado y dotadas de mejores desarrollos tecnológicos. Así se generará un flujo de carga hacia y desde los mares, las zonas manufactureras, centros poblados de relevancia y zonas agrícolas exportadoras. (UNIVERSIA, 2009)

Luego, se da el advenimiento de los ferrocarriles de la segunda mitad del siglo XIX, como el Ferrocarril de Antioquia de 1875 obra del cubano Francisco Javier Cisneros. El Ferrocarril del

Pacífico, que también emprende Cisneros en 1884, llega a Cali en 1915; este ferrocarril sólo se empalma con el Ferrocarril de Antioquia en 1941. El Ferrocarril (FFCC) de la Sabana que permitirá unir a Bogotá con el río Magdalena en Puerto Salgar y Girardot, se inicia en 1882 y llega a Facatativá en 1889. Esta es obra de los colombianos Indalecio Liévano y Juan Nepomuceno González Vásquez. (UNIVERSIA, 2009).

Mientras en 1907 el FFCC de Cundinamarca llega al Magdalena con los FFCC de La Dorada y Girardot, es en la década de 1920 que sobresalen los FFCC Cafeteros, cuyo impacto por el poblamiento e industrialización del occidente colombiano resulta comparable al del Canal de Panamá, construido en 1914. (UNIVERSIA, 2009).

La de los 20, es también la década de los cables aéreos y de la explosión de la navegación en vapores por el Magdalena. El cable aéreo Manizales-Mariquita construido en 1922 y de 72,6 km de longitud, desaloja el transporte de arriería; pero luego de 40 años de funcionamiento cerrará por los efectos de la competencia de la carretera por Fresno, construida en 1938 y mejorada en la década de 1950. (UNIVERSIA, 2009).

A partir de la crisis económica causada por la recesión del año 1929, se decide fomentar la explosión del transporte carretero, entre cabeceras urbanas. Este nuevo medio en Colombia facilita trasladar los beneficios del café, a la economía del campo: además del puesto de salud, el acueducto, la electricidad y la escuela, se abren las vías rurales para el Willys y la “Chiva. (UNIVERSIA, 2009).

Como consecuencia de factores asociados a la primera guerra mundial, en 1920 inicia operaciones la¹ aviación comercial en Colombia con la Sociedad Colombo Alemana de Transporte Aéreo “SCADTA”. Se reduce de 2 semanas a 10 horas el tiempo de viaje entre Barranquilla y Bogotá. Como consecuencia de la segunda guerra y atendiendo la seguridad del Canal de Panamá, se cierra Scadta y nace Aerovías Nacionales de Colombia “Avianca”, en 1940. (UNIVERSIA, 2009).

Durante la primera mitad del siglo XX, la movilización por carretera entre los diferentes centros urbanos era una actividad muy compleja, no sólo por el lento desarrollo de las obras sino además por la gran dispersión a lo largo de todo el territorio. Sólo hasta finales de los años cuarenta y principios de los cincuenta, se inicia una nueva etapa en la historia del desarrollo vial del país con la construcción de nuevas redes de transporte y el mejoramiento de las existentes. (UNIVERSIA, 2009).

Pachón y Ramírez (2005) mencionan que la escogencia inicial de rutas de transporte se hizo con base en la ubicación de los centros de demanda, olvidando los corredores naturales, tales como las rutas de los ríos Magdalena y Cauca. Esto obligaba a la construcción de vías en poblaciones ubicadas a alturas considerables sobre el nivel del mar, haciendo difícil su acceso. (UNIVERSIA, 2009).

El último cuarto de siglo fue fundamental en el desarrollo de la infraestructura vial del país. Se dio continuidad a los proyectos de integración regional y, adicionalmente, se adelantaron otros encaminados al fortalecimiento carretero del comercio internacional. Fue tal la importancia de las

obras realizadas que entre 1975 y 1994, que el total de la red vial nacional y pavimentada se duplicó, aumentando en cerca de 5.600 km. (UNIVERSIA, 2009).

En el caso de los vehículos de carga, estos aumentaron su capacidad de tres a siete toneladas entre 1950 y finales de los setenta. Otro aspecto que es importante tener en cuenta es el cambio que tuvo la movilización de carga a través de la segunda mitad del siglo XX. Mientras que en los primeros años de ese período el transporte carretero era apenas un complemento del férreo y del fluvial, a medida que fueron pasando los años y que la red vial fue evolucionando, esta forma de transporte pasó a ser la más importante del país. Sólo hasta los años sesenta se produce la integración vial entre el interior del país y la Costa Caribe colombiana, lo cual permite una muy buena alternativa para el comercio exterior, ya que anteriormente la ruta obligada era a través del puerto de Buenaventura en la Costa Pacífica. (UNIVERSIA, 2009).

Con la apertura económica de la década de 1990, pierde vigencia el Modelo de la industrialización endógena, por lo tanto, Colombia vuelve la mirada a los corredores viales interregionales, a los puertos y a los aeropuertos. (UNIVERSIA, 2009).

El transporte extrapesado y extradimensionado en Colombia

De acuerdo con el libro Transportes Montejo, 55 años manejando logística y carga extrapesada, la más colosal operación de logística en transporte extrapesado hecha en Colombia data de los años (1997 – 1998) y fue realizado por Transportes Montejo al trasladar desde Barranquilla hasta Barrancabermeja seis tanques para almacenamiento de gas líquido propano de Ecopetrol, con dimensiones de 65 metros de largo, 7 metros de ancho, 9.20 metros de alto y un peso de 580 toneladas por tanque. Esta es la más colosal operación de transporte multimodal hecha hasta los años de 1998 en Colombia y marca el inicio de uso de equipos modulares especiales para movimiento de carga extrapesada y extradimensionada.

Ilustración 1: Transporte fluvial tanques de Ecopetrol



Fuente: Transportes Montejo

El transporte de la carga que partía desde Barranquilla hasta el puerto de Barrancabermeja, no solo se realizaría por vía terrestre, sino tendría un gran trayecto fluvial por el Río Magdalena, era en realidad un reto, pues este proyecto incluyo un roll off en el puerto de Barrancabermeja y de allí entraría terrestre hasta la locación de Ecopetrol para montar y posicionar dichos tanques en su sitio

definitivo sin utilizar grúas. La colocación de los tanques se realizó por corredores perfectamente cavados para que avanzaran de manera paralela. (Montejo, 2011).

Para poder ejecutar la maniobra de transporte fue necesario que la empresa Transportes Montejo incluyera en su flota de equipos, la compra de equipos modulares Cometto de última generación en sus tiempos y la adquisición de tornamesas de 300 toneladas por unidad. Lo cual abrió por primera vez la puerta para que el transporte Colombiano ingresara en la novedosa técnica de los tráiler modulares de última tecnología, no es naturalmente una maquinaria de fácil manipulación, por ende los empresarios e ingenieros de Transportes Montejo tuvieron que entrenarse en Italia para operar estos equipos de manejo hidráulico y cuyas piezas se deben ir armando como si se tratara de un rompecabezas.

Ilustración 2: Transporte terrestre tanques Ecopetrol



Fuente: Transportes Montejo

Para la operación también se tuvo que adquirir equipos de arrastre pesado y la fabricación de plataformas de apoyo, se utilizó un planchón marítimo de gran capacidad y poco calado, el cual se habilitó para uso fluvial y se adaptó a un remolcador de río. Para recibir el transporte fluvial se

tuvo que construir un muelle y adaptarlo para recibir el plancho y permitir el descargue de los tanques. (Montejo, 2011).

Ilustración 3: Transporte terrestre e instalación de tanques



Fuente: Transportes Montejo

Normatividad para transporte extrapesado

En cuanto a normativa existente para la ejecución de un transporte especial en Colombia, encontramos 2 resoluciones como apoyo que enfatizan en los camiones de diseño avalados y normalizados con PBV hasta 52 toneladas e indican la documentación a soportar y lineamientos cuando un transporte es extrapesado y extradimensionado.

Resolución 4100 del 28 de diciembre 2004

Esta resolución en el Artículo 9, establece el máximo peso por eje para los vehículos de transporte de carga a nivel nacional, mediante la siguiente tabla. (TRANSPORTE, 2004).

Tabla 1: Pesos máximos por eje

Tipo de eje	Peso máximo por eje, kg
<i>Eje sencillo</i>	
Dos llantas	6.000
Cuatro llantas	11.000
<i>Eje tandem</i>	
Cuatro llantas	11.000
Seis llantas	17.000
Ocho llantas	22.000
<i>Eje trídem</i>	
6 llantas	16.500
8 llantas	19.000
10 llantas	21.500
12 llantas	24.000

Fuente: Resolución 4100 de 2004

También en el Artículo 8, establece el PBV máximo para los vehículos de transporte de carga a nivel nacional mediante la siguiente tabla:

Tabla 2: Peso Bruto Vehicular máximo por designación

Vehículos	Designación	Máximo PBV, kg	Tolerancia positiva de medición kg.
Camiones	2	16 000	+ -- 400
	3	28 000	+ -- 700
	4	31 000 (1)	+ -- 775
	4	36 000 (2)	+ -- 900
	4	32 000 (3)	+ -- 800
Tracto-camión con semirremolque	2S1	27.000	+ -- 675
	2S2	32.000	+ -- 800
	2S3	40.500	+ -- 1013
	3 S1	29.000	+ -- 725
	3 S2	48.000	+ -- 1200
	3S3	52.000	+ -- 1300

Fuente: Resolución 4100 de 2004

Resolución 4959 de 2006 del Ministerio de Transporte

En cuanto a la normatividad requerida para soportar la metodología a realizar, líneas abajo se citan los artículos con mayor incidencia para permitir realizar un transporte extrapesado y extradimensionado en Colombia.

Expedición de permisos para transporte de carga extradimensionada

Artículo 5°. Competencia. La facultad de conceder o negar los permisos para el transporte de carga que exceda las dimensiones de los vehículos de carga autorizados para la circulación por las vías públicas del país corresponde, en las vías a cargo de la Nación, al Instituto Nacional de Vías ya sean estas concesionadas o no concesionadas, en el primer caso, en coordinación con el Instituto Nacional de Concesiones. Cuando se trate de vías departamentales, metropolitanas, municipales o distritales, les corresponde a las autoridades de los entes territoriales, distritales o áreas metropolitanas ajustándose a lo contemplado en el artículo 6° de la presente resolución. (TRANSPORTE, RESOLUCION 4959, 2006).

Artículo 6°. Parámetros para la expedición de permisos. Las autoridades competentes para la expedición de los permisos para el transporte de carga extradimensionada aplicarán los siguientes parámetros. (TRANSPORTE, RESOLUCION 4959, 2006).

A. Longitud

1. No se requerirá de registro ni de permiso para el transporte de carga extradimensionada que sobresalga por la parte posterior del vehículo en una longitud inferior a un (1) metro; pero el vehículo que realice el transporte deberá contar con un aviso o señal colocado en la parte posterior del vehículo, visible y en buen estado, cuyo texto advierta: "Peligro Carga Larga", de las características fijadas en el artículo 7° de la presente resolución. (TRANSPORTE, RESOLUCION 4959, 2006).

2. Para carga extradimensionada que sobresalga por la parte posterior del vehículo, en una longitud que comprenda entre uno (1) y dos (2) metros, se requerirá que el operador esté previamente inscrito en un registro de operadores de este tipo de transporte que llevará el Grupo de Seguridad Vial de la Subdirección de Tránsito del Ministerio de Transporte. El vehículo que realice el transporte deberá contar con un aviso o señal colocado en la parte posterior del vehículo, visible y en buen estado, cuyo texto advierta: "Peligro Carga Larga", cumpliendo las características fijadas en el artículo 7° de la presente resolución. (TRANSPORTE, RESOLUCION 4959, 2006).

3. Para carga extradimensionada que sobresalga por la parte posterior del vehículo en longitudes entre dos (2) y tres (3) metros la autorización se tramitará siguiendo los procedimientos y requisitos fijados en el artículo 8° del Capítulo II de la presente resolución.

4. Para carga extradimensionada, que sobresalga cualquier longitud por la parte delantera del vehículo, no se autorizará permiso bajo ninguna circunstancia. (TRANSPORTE, RESOLUCION 4959, 2006).

B. Anchura

1. Para el transporte de carga extradimensionada con un ancho superior a dos comas seis (2,6) metros e inferior o igual a tres (3,0) metros, se requerirá que el operador esté previamente inscrito en un registro de operadores de este tipo de transporte que llevará el Grupo de Seguridad Vial de la Subdirección de Tránsito del Ministerio de Transporte. En carreteras se exigirá que la circulación del vehículo de carga se desarrolle a una velocidad máxima de cuarenta (40) kilómetros por hora y no requerirá la presencia de vehículo acompañante. En vías urbanas la velocidad máxima será de veinte (20) kilómetros por hora y requerirá de la presencia de un (1) vehículo acompañante que circule adelante del vehículo de carga cuando la vía es de un (1) sentido de circulación y de dos (2) vehículos acompañantes, uno que circule adelante del vehículo de carga y el otro atrás cuando la vía es de dos (2) sentidos de circulación. Tanto para carreteras o vías urbanas el vehículo que realice el transporte deberá contar con ²avisos o señales colocados uno en la parte delantera y otro en la posterior del vehículo, visibles y en buen estado, cuyo texto advierta: "Peligro Carga Ancha", de las características fijadas en el artículo 7° de la presente resolución. (TRANSPORTE, RESOLUCION 4959, 2006).

2. Para el transporte de cargas extradimensionada con un ancho superior a tres (3,0) metros e inferior o igual a tres coma tres (3,3) metros, se requerirá que el operador esté previamente inscrito en un registro de operadores de este tipo de transporte que llevará el Grupo de Seguridad Vial de la Subdirección de, Tránsito del Ministerio de Transporte y se hará siguiendo los procedimientos

y requisitos fijados en el artículo 8° del Capítulo 11 de la presente resolución. (TRANSPORTE, RESOLUCION 4959, 2006).

3. Para el transporte de cargas extradimensionada con un ancho superior a tres coma tres (3,3) metros e inferior o igual a tres como seis (3,6) metros, se requerirá que el operador esté previamente inscrito en un registro de operadores de este tipo de transporte que llevará el Grupo de Seguridad Vial de la Subdirección de Tránsito del Ministerio de Transporte y se hará siguiendo los procedimientos y requisitos fijados en el artículo 8° del Capítulo II de la presente resolución.”³

4. La autorización para transportar carga extradimensionada con un ancho superior a los 3,6 metros se hará siguiendo los procedimientos y requisitos fijados en los artículos 9° y 10 de la presente resolución. (TRANSPORTE, RESOLUCION 4959, 2006).

C. Altura

“Los permisos que autoricen el transporte de carga extradimensionada cuya altura supere los 4.40 metros, se expedirán siguiendo los procedimientos y requisitos fijados en los artículos 9° y 10 de la presente resolución.

Parágrafo. Los permisos que se expidan por las autoridades competentes, de acuerdo con lo estipulado en el presente artículo, no autorizarán el tránsito por las vías rurales en horario nocturno (entre las 18:00 horas y las 6:00 horas del día siguiente). En el caso de vías urbanas, se podrá autorizar el tránsito nocturno, siempre y cuando la vía se cierre para el tránsito de otros vehículos, lo cual se hará por tramos de tal forma que cause el menor traumatismo y en este caso, será

necesaria la aprobación previa por parte de la autoridad de tránsito correspondiente de un Plan de Manejo de Tránsito. (TRANSPORTE, RESOLUCION 4959, 2006).

Artículo 13. Requisitos generales. Para el otorgamiento de los permisos de carga de que trata el artículo 11 de la presente resolución, deberá presentarse una solicitud escrita ante la autoridad competente según este sea para transitar por las vías a cargo de la nación, los departamentos, las áreas metropolitanas, distritos o municipios, que contenga los siguientes documentos:

c) Estudio técnico (antigüedad no mayor de tres (3) meses), elaborado por una persona natural con título de ingeniero en transporte y vías o de ingeniero civil, con matrícula profesional vigente o por una persona jurídica cuya actividad corresponda a estudios de ingeniería de transporte y vías o ingeniería civil, en cuyo caso deberá estar avalado por un ingeniero en transporte y vías o un ingeniero civil, con matrícula profesional vigente, con experiencia en estructuras y pavimentos, que contenga como mínimo: Relación de los puentes localizados en la ruta que utilizará el equipo de transporte y las previsiones y precauciones especiales que deban tomarse por parte del beneficiario del permiso para la protección de dichas estructuras, determinación que las cargas a transportar junto con el equipo de transporte o modular propuesto no causa daños estructurales anormales en las estructuras de los puentes y en el pavimento y que el peso máximo por eje de los vehículos o modulares propuestos no superan el peso o carga máximo por eje autorizado por las autoridades competentes para la circulación por las vías.

Para el otorgamiento de permisos de carga indivisible extrapesada o indivisible extrapesada y extradimensionada a la vez, la persona natural o la persona jurídica (a través de un ingeniero en

transporte y vías o un ingeniero civil) en representación de la empresa solicitante, deberá demostrar en el estudio técnico que las sobrecargas a aplicar sobre el pavimento no causan daño a estas estructuras y no producen reducción anormal de su vida útil.

Los ingenieros que elaboren los estudios o los avalen deberán demostrar experiencia certificada en estructuras de puentes y pavimentos. (TRANSPORTE, RESOLUCION 4959, 2006).

Equipos especiales modulares

Para la realización de un transporte extrapesado y extradimensionado por un corredor vial nacional con el fin de disminuir los efectos destructivos a los pavimentos y puentes es importante elegir un equipo apropiado con una distribución de ejes y alta tecnología que reparta en una manera proporcional todo el peso de la carga sobre los pavimentos y que cuenten con una gran cantidad de llantas que permita que la concentración de la carga por punto de contacto sobre una estructura sea la menor posible.

Descripción del equipo

El equipo modular es un equipo especial que está configurado por módulos organizados en sistemas de ejes que cuentan con un total de 8 ruedas por línea de rotación, estos equipos desarrollan soluciones rentables para los clientes que necesitan transportar cargas indivisibles que pesen entre las 50 y 10.000 toneladas según el fabricante Goldhofer, lo cual no es muy usual en Colombia pero si en las carreteras europeas, también son equipos que se pueden utilizar para todo

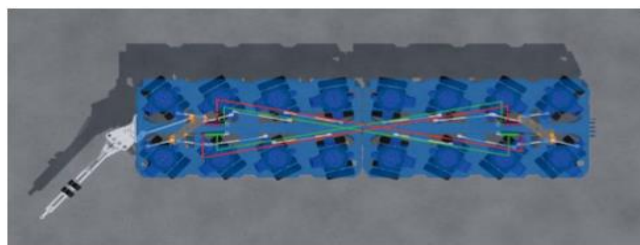
tipo de operaciones en las condiciones climáticas más extremas y exigentes con climas desde los 50°C hasta los -40°C.

Estos equipos cuentan dirección hidromecánica y suspensión hidráulica en sus ejes, movimiento de oscilación lateral y vigas centrales con aire comprimido integrado más un tanque de aceite hidráulico. Estos equipos pueden tener diferentes configuraciones debido a que son módulos que se pueden unir en la cantidad que se requieran, estas configuraciones se arman de acuerdo con el peso y centroide de la carga o de acuerdo con las restricciones de altura, ancho y largo en las vías por las cuales se realizará el transporte.

Ilustración 4: Características de los modulares



Center beam in box-section design with integrated compressed air and hydraulic oil tanks



Hydromechanical steering



Hydraulic axle suspension – longitudinal



Hydraulic axle suspension – lateral + lateral swing movement

Fuente: Ficha técnica Goldhofer

Dimensiones:

Los ejes de los equipos modulares están separados entre sí cada 1,50 metros longitudinalmente, medida tomada entre centros de llantas. Cada una de las líneas de rotación con sus ejes tienen un total de 8 llantas, es decir 4 unidades en el semieje, con un ancho total por línea de 3 metros y una presión de inflado que se aplica a todas las llantas de los ejes aproximada de 130 psi (9,1 kg/cm² $\approx$ 896 kPa).

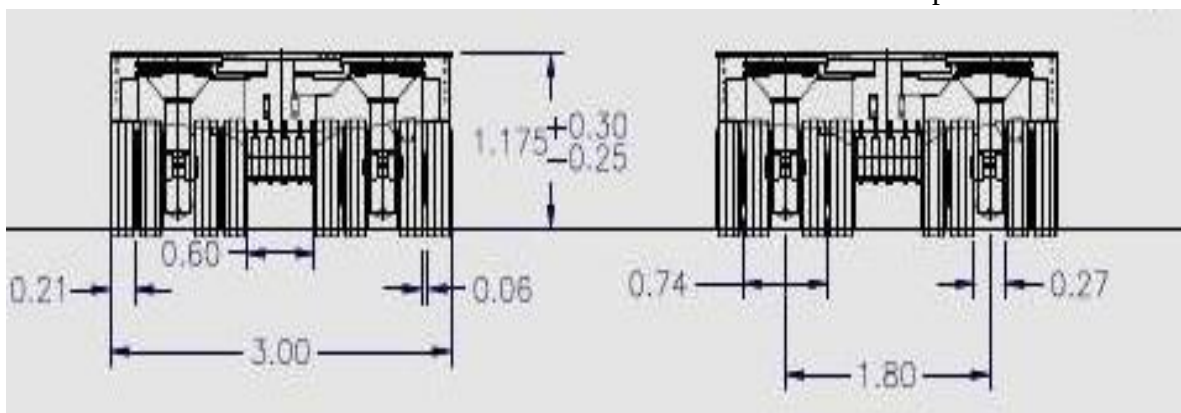
Ilustración 5: Dimensiones de modulares



Fuente: Ficha Técnica Goldhofer

Las presentes imágenes hacen referencia a los equipos modulares que se están usando en Colombia para la solicitud de permisos especiales y la movilización de las piezas extrapesadas y extradimensionadas.

Ilustración 6: Dimensiones de modulares - Vista perfil



Fuente: Transportes Montejo

Ilustración 7: Equipo modular con carga de aproximadamente 800 toneladas



Fuente: Transportes Montejo

Ilustración 8: Transporte extrapesado y extradimensionado



Fuente: Transportes Montejo

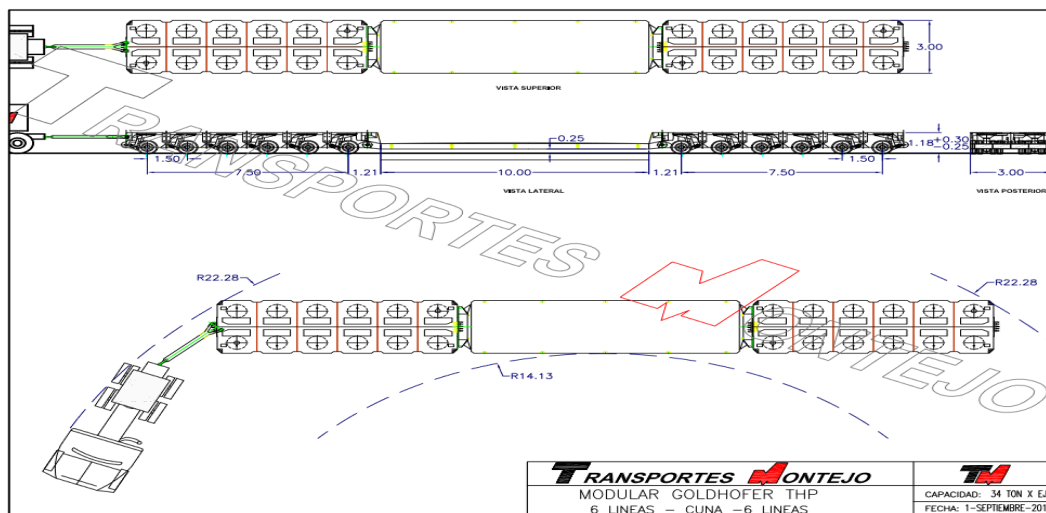
Velocidades de circulación del equipo

Las velocidades de circulación de una carga especial extrapesada y extradimensionada por la infraestructura vial nacional están establecidas en la resolución 4959 del 2006.

La velocidad promedio de recorrido según las condiciones de la vía, la cual no debe sobrepasar en ningún momento los treinta (30) kilómetros por hora en vías rurales y veinte (20) kilómetros en vías urbanas. Para cruzar los puentes existentes, no podrán circular a la vez otros vehículos, la velocidad no deberá ser superior a cinco (5) kilómetros por hora y el vehículo de carga deberá transitar por el centro del puente haciendo coincidir los ejes longitudinales del puente y del vehículo. (TRANSPORTE, RESOLUCION 4959, 2006).

Plano de un equipo especial

Ilustración 9: Transporte extrapesado y extradimensionado



Fuente: Transportes Montejo

Ejemplos de transporte especial en América Latina

Acorde al acelerado desarrollo que han presentado los países latinos de tercer mundo en los últimos 10 años, en pro de fortalecer sus economías, expandir sus mercados internacionalmente y mejorar su infraestructura y canales de comunicación, estos han requerido especializarse en la mejora de la infraestructura existente y la creación de nuevas vías de comunicación que les permita potencializar el mercado en cada una de sus regiones y a la vez la atracción de proyectos de interés nacional en cuestión de energía, infraestructura, sistemas de transporte, agricultura y petróleo, por tal razón se ha evidenciado el fortalecimiento de países latinos para realizar transporte extrapesado y extradimensionado de maquinaria pesada, agrícola, industrial y petrolera, puentes, estructuras metálicas, tanques, grúas telescópicas, transformadores, casetas prefabricadas y tubos entre otros, de los cuales citamos a continuación algunos ejemplos:

Transporte de secciones de torre y aspas, para construcción de parque eólico Villonaco (Loja, Ecuador). Se realizó en tráileres especiales extensibles.

Ilustración 10: Transporte extrapesado y extradimensionado Parque Villonaco



Fuente: Transportes Montejo

Ilustración 11: Transporte extrapesado y extradimensionado Parque Villonaco



Fuente: Transportes Montejo

Transporte multimodal de 4 tambores de coque de 490 toneladas, para refinería de petróleo Reficar (Cartagena - Colombia). Se realizó en 2 modulares autopropulsados con 18 ejes cada uno y 288 ruedas en total.

Ilustración 12: Transporte extrapesado y extradimensionado tambores



Fuente: Transportes Montejo

Transporte de estructura metálica para puentes, desde Planta Vhicoa hasta Muelle Alianza en Puerto Ordaz (Venezuela). El transporte se realizó en equipos modulares.

Ilustración 13: Transporte extrapesado y extradimensionado Vhicoa



Fuente: Transportes Montejo

Transporte de 1.100 toneladas de tramos del Segundo Puente sobre el Río Orinoco, desde Planta Vhicoa hasta Puerto en Puerto Ordaz (Venezuela). El transporte se realizó en equipos modulares.

Ilustración 14: Transporte extrapesado y extradimensionado Puente Río Orinoco



Fuente: Transportes Montejo

Transporte Multimodal Motores Diésel 400 de toneladas para la Planta Generadora La Chorrera (Panamá). Se realizó en equipos modulares.

Ilustración 15: Transporte extrapesado y extradimensionado Planta La Chorrera



Fuente: Transportes Montejo

Estructuras de pavimento en Colombia

Una estructura de pavimento está conformada por diferentes capas de materiales que garantizan la funcionalidad de la misma ante el paso de cargas de tránsito y efectos ambientales. Esto es, que debe resistir las sollicitaciones mecánicas generadas por el paso de las cargas impuestas por el tránsito y garantizar un nivel de servicio durante un periodo de diseño, de tal manera que no se ponga en riesgo la seguridad y comodidad de los usuarios. (IDU, 2013)

El pavimento se degrada por factores ambientales y por la sollicitación de las cargas debidas al tránsito. Entonces, deberá disipar los esfuerzos inducidos por el tránsito garantizando niveles de esfuerzo y/o deformación en el suelo de soporte que no superen los admisibles del mismo. (IDU, 2013).

El dimensionamiento de una estructura de pavimento consiste en determinar los espesores de cada una de las capas asociados a los tipos de materiales (rigidez) que la componen, garantizando el cumplimiento de los siguientes requisitos: (IDU, 2013)

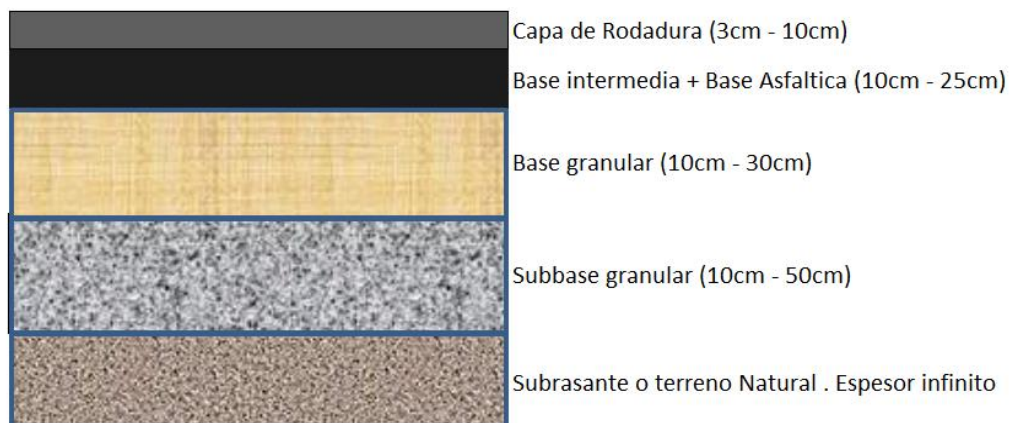
- Brindar comodidad y seguridad a los usuarios.
- Ser resistentes ante los efectos ambientales.
- Ser durables.

Pavimento flexible:

Estructuras viales conformadas por una capa asfáltica apoyada sobre capas de menor rigidez. Los esfuerzos que generan las cargas vehiculares se disipan a través de cada una de las capas de la estructura de tal forma que, al llegar a la subrasante la resistencia mecánica del suelo debe ser capaz de resistir dicho esfuerzo sin generar deformaciones que permitan el deterioro funcional o estructural de la vía. (RONDON, 2015)

Ilustración 16: Estructura de pavimento flexible

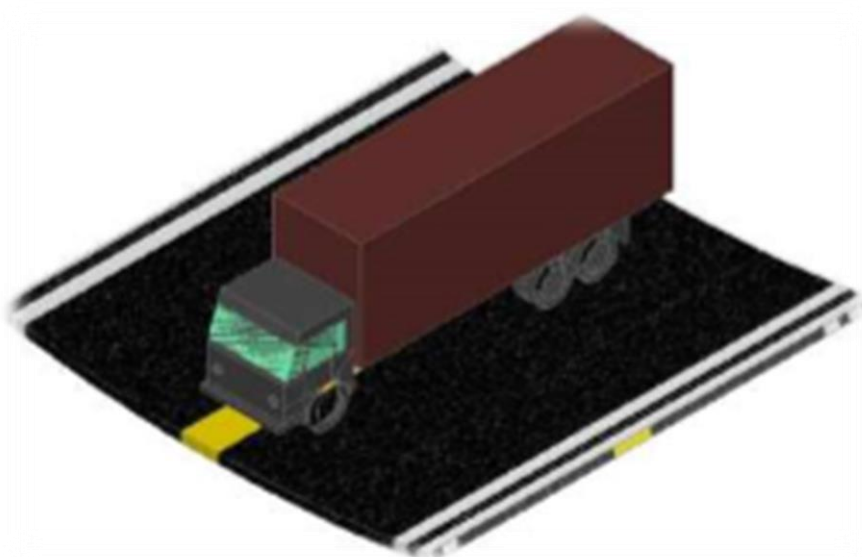
Pavimento Flexible (Perfil Típico)



Fuente: Elaboración Propia

El pavimento flexible tiene como principal característica la mayor tolerancia a la deformación. Está compuesto por capas de cuerpo (base y subbase, estabilizadas o no) dispuestas sobre la subrasante. La capa superficial está constituida por materiales viscoelásticos (concretos asfálticos) cuyo objetivo es evitar la filtración de agua en la estructura. Las ventajas son su facilidad de adaptación a los cambios climáticos y su capacidad de deformabilidad asociada a su naturaleza dúctil. (IDU, 2013).

Ilustración 17: Estructura de pavimento flexible

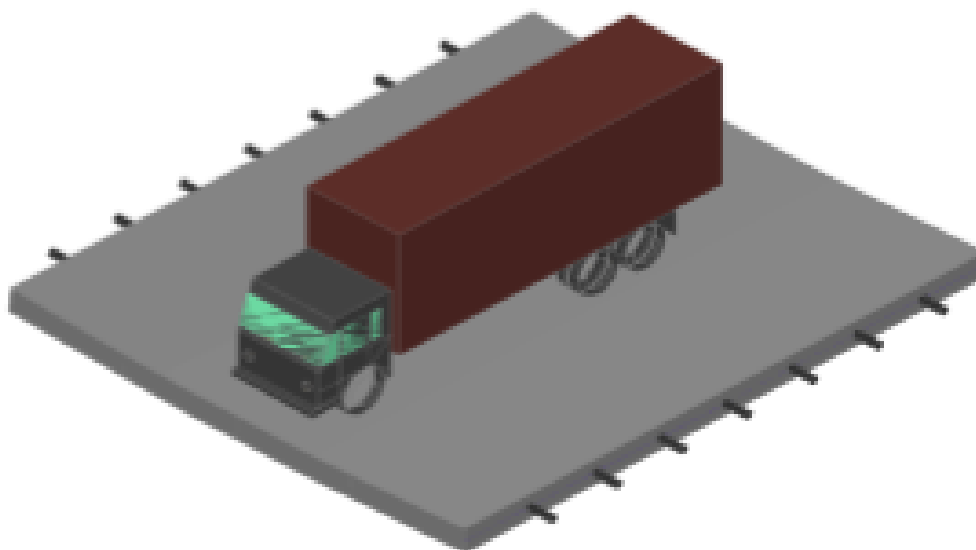


Fuente: Guía “Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.” IDU, 2013.

Pavimento rígido:

El pavimento rígido está compuesto igualmente por capas de cuerpo (base y subbase, estabilizadas o no) dispuestas sobre la subrasante. A diferencia del anterior, la capa superficial está constituida por materiales hidráulicos, generalmente losas de concreto. Sin embargo, uno de los mayores problemas es la fuerte susceptibilidad a cambios climáticos que pueden llegar a producir rupturas debido a su fragilidad, especialmente por el fenómeno del alabeo. Debido a la rigidez del concreto hidráulico se requieren estructuras de menor espesor, lo que permite reducir el tiempo de construcción y puede mitigar los problemas asociados a las redes de servicios públicos presentes principalmente en vías urbanas. Además, por las propiedades reflectantes del concreto hidráulico, se solicita una menor cantidad de iluminación para garantizar condiciones de seguridad a los usuarios. (IDU, 2013).

Ilustración 18: Estructura de pavimento rígido



Fuente: Guía “Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.” IDU, 2013.

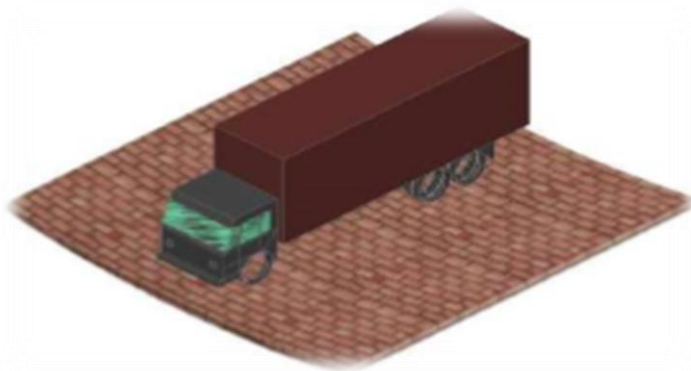
Pavimento articulado:

Los pavimentos articulados son aquellos en los que la capa superior o acabado del pavimento está constituida por elementos prefabricados llamados adoquines que, siguiendo algún patrón modular, empalman entre sí sin emplear materiales cementantes para fijarlos. Su origen se encuentra en los antiguos empedrados. Una estructura de pavimento articulada estará compuesta por las mismas capas de cuerpo (base y subbase, estabilizadas o no) y, adicionalmente, por la capa de rodadura que incluye los adoquines y la capa de arena utilizada para el sellado.

Los adoquines son elementos prefabricados macizos de concreto, arcilla cocida o piedras cortadas, de espesor homogéneo y uniforme, de tal forma que encajen unos con otros para formar una superficie continua que sirva de rodadura a un pavimento. Los adoquines prefabricados de concreto se fabrican en concreto simple y /o arcilla, en piezas cuyas dimensiones en planta no superan los

20 cm en los sentidos principales y con espesores variables entre 6 y 10 cm. Su forma y dimensiones están condicionadas con la posibilidad de ser manejados en obra. (IDU, 2013).

Ilustración 19: Estructura de pavimento articulado



Fuente: Guía “Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.” IDU, 2013.

Pavimento para zonas industriales y pertinencias para la vía:

Para las zonas industriales y punto de llegada final de un transporte especial extrapesado y extradimensionado, no existe regulación alguna o un tipo de pavimento determinado con el cual deba cumplir para recibir las cargas, pues estas no hacen parte de la red vial nacional, y son autónomas y privadas del dueño del proyecto, por lo general estas zonas cuentan con una estructura en afirmado sin ninguna capa de rodadura y el transportador de acuerdo a la carga que movilice le solicita al Project manager del proyecto una capacidad portante del suelo para el momento en que lleguen los equipos transportados a la obra o zona de instalación de la carga.

Ilustración 20: Estructura de zona industrial recibiendo transporte especial



Fuente: Transportes Montejo

Mecánica de materiales para pavimentos

Deformaciones en pavimentos

Cuando un material es sometido a una fuerza (carga, esfuerzo o tensión) se produce en él una deformación. Si al cesar la fuerza el material vuelve a sus dimensiones primitivas (iniciales), diremos que ha experimentado una deformación elástica. El material solo ha sufrido un cambio de dimensiones temporales. La deformación es reversible y no permanente.

La deformación elástica se produce cuando los átomos del material son desplazados de sus posiciones originales mientras dura la deformación (cuando se somete a la fuerza), pero no hasta el extremo de tomar nuevas posiciones de forma permanente, de tal manera, que cuando dejamos de aplicar la fuerza de deformación, vuelven a sus posiciones originales. Este tipo de deformación implica el estiramiento o flexión de los enlaces.

Si el material se deforma hasta el extremo de no poder recuperar sus dimensiones originales, diremos que ha sufrido una deformación plástica. Los cambios son irreversibles.

Desde un punto de vista molecular, la distancia entre las moléculas de un material no sometido a ninguna fuerza depende de un equilibrio entre las fuerzas moleculares de atracción y repulsión. Cuando se aplica una fuerza externa que crea una tensión en el interior del material, las distancias moleculares cambian y el material se deforma.

Un ejemplo, al sentarse en una silla, todos los átomos de la pata de la silla se acercan en proporción al peso de tu cuerpo. Al levantarse de la silla los átomos vuelven a donde estaban sus ubicaciones iniciales (equilibrio), esa deformación sufrida sería elástica. (TECNOLOGIA, S.F.).

Deflexiones en pavimentos

La medida de deflexiones en la superficie de un pavimento, es de primordial importancia al evaluar la capacidad de transferencia de carga que un pavimento rígido o flexible posee.

El estudio de la deflexión de un pavimento es importante puesto que la forma y magnitud en que un pavimento deforma, es una función de del tráfico (tipo y volumen), sección (paquete) estructural del pavimento, temperatura y humedad. Las medidas de deflexión de un pavimento pueden ser utilizadas para determinar la rigidez estructural de una capa de pavimento así como el módulo resiliente de la subrasante. Así mismo se pueden determinar otras características de la forma en que el pavimento se comporta ante otras cargas.

Las mediciones de deflexiones en pavimentos se las efectúa mediante ensayos no destructivos y la deflexión de la superficie es medida como el desplazamiento vertical de esta superficie, ocasionado por una carga (estática o dinámica) aplicada. (GALINDO, S.F.).

Mientras más avanzado es el método de medición, mayor es la posibilidad de medir los desplazamientos en varios puntos, obteniendo así una caracterización mejor documentada de la deflexión del pavimento. El área de pavimento afectada por el desplazamiento es denominada como la “cuenca de deformación” y para su medición existen tres categorías dentro de las técnicas de medición: deflexiones estáticas, transientes y de impacto. (GALINDO, S.F.).

Tensiones en pavimentos

El esfuerzo de tensión en pavimentos es la definición de la fuerza que un material puede soportar antes de sufrir una fractura, siempre se expresa en función de una unidad de área.

Además del esfuerzo tensor, otros factores mecánicos deben considerarse para realizar una conexión adecuada, incluyendo el esfuerzo de deformación y el correcto acomodo de todas las partes de la conexión.

En física e ingeniería, se denomina tensión mecánica a la magnitud física que representa la fuerza por unidad de área en el entorno de un punto material sobre una superficie real o imaginaria de un medio continuo. Es decir posee unidades físicas de presión. La definición anterior se aplica tanto a fuerzas localizadas como fuerzas distribuidas, uniformemente o no, que actúan sobre una superficie. Con el objeto de explicar cómo se transmiten a través de los sólidos las fuerzas externas aplicadas, es necesario introducir el concepto de tensión, siendo este el concepto físico más relevante de la mecánica de los medios continuos, " de la teoría de la elasticidad en particular. (CHUCTAYA, S.F.).

Influencia del tránsito en la aplicación de las cargas en pavimentos

La caracterización de las solicitaciones producidas por el tránsito sobre una infraestructura carretera es bastante compleja, debido no sólo a la variabilidad de los distintos vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito. (Arriaga y Garnica, 1998). (GARNICA, 2002).

Para dicha caracterización se pueden estudiar independientemente los siguientes aspectos:

Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (carga por eje, tipos de ejes que circulan y número de repeticiones de carga).

Forma geométrica de cada solicitud sobre el pavimento, área de contacto y reparto de presiones sobre la misma.

Velocidad de los vehículos y tiempo de solicitud en un punto

Estado de esfuerzos que producen las cargas, en función de su magnitud y tipología (verticales, tangenciales, fenómenos de impacto, etc.) y las características de las capas del pavimento. Los dos últimos aspectos tienen que ver con la caracterización de los materiales ante cargas cíclicas.

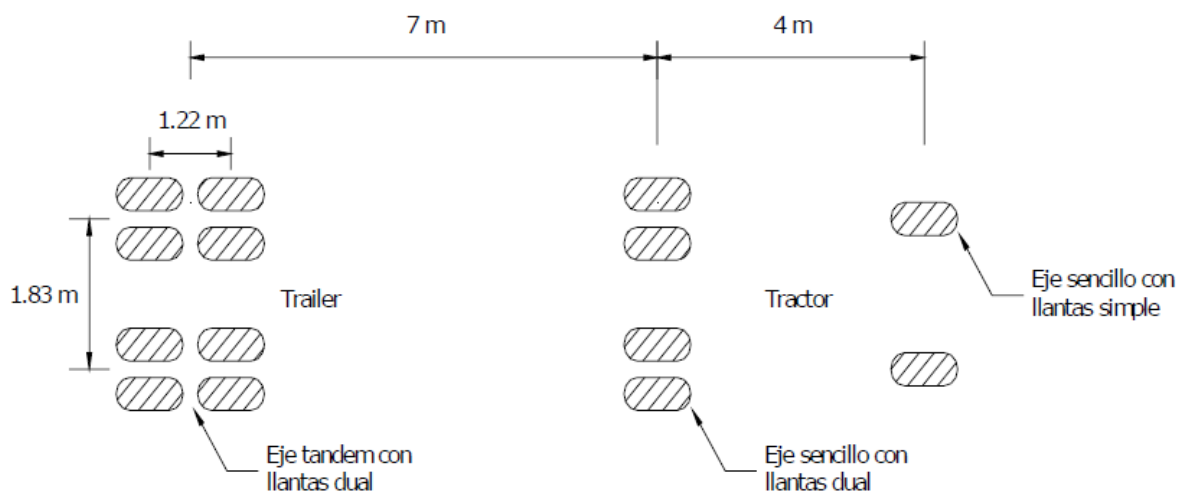
Composición vehicular y tipos de ejes representativos

En la Figura 21 se muestra la configuración de las ruedas para un semitrailer típico, conformado por un eje sencillo con ruedas simples, un eje sencillo con ruedas duales y un arreglo tandem con ruedas duales. (Huang, 1993).

Las separaciones de 7 y 4 metros mostradas en la Figura 21, no deben tener efecto en el diseño de pavimentos, ya que las ruedas están muy separadas y la influencia en los esfuerzos y deformaciones debe ser considerada independientemente. A menos que sea utilizado un eje sencillo de carga equivalente, la consideración de ejes múltiples no es materia fácil. El diseño puede facilitarse si los ejes tandem y tridem son tratados como un grupo y considerados como una repetición.

El diseño es demasiado conservador si cada eje es tratado de manera independiente y considerado como una repetición. (GARNICA, 2002).

Ilustración 21: Configuración de ruedas para semitrailer típico



Fuente: Mecánica de materiales para pavimentos

El aumento de cargas por eje que se da en la actualidad hace que las investigaciones en este aspecto sean de gran relevancia, puesto que tienen una participación directa en la vida útil del pavimento. En México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) inició en 1991 un estudio denominado formalmente “Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional”, el cual tiene como objetivo generar información sobre las características de los vehículos de carga que circulan por las carreteras, los tipos de carga transportados por ellos, así como sus orígenes y destinos y algunas particularidades de las condiciones en que se realiza el transporte. (GARNICA, 2002).

Entre los objetivos principales de dicho estudio se encuentra la determinación de la composición vehicular en las carreteras, con el fin de conocer las características de los vehículos que transitan con mayor frecuencia en la red nacional. En Colombia se ha implementado una normativa similar y las vías concesionadas que a su vez cuentan con estaciones de peajes nos permiten poder tener un conteo muy aproximado del tránsito y las configuraciones de equipos que transitan por un corredor vial.

Cabe resaltar que para el objeto estudio de la presente tesis, el transporte extrapesado y extradimensionado no tiene mayor influencia la frecuencia en las redes viales, debido a que es un transporte muy controlado y que depende de que se genere un proyecto de interés nacional, por lo cual es fácil evidenciar que durante los últimos años en equipos especiales sólo se mueven entre 2 y 5 piezas por año. Esta cifra cambia en proporción con el desarrollo de un país.

Número de repeticiones de carga

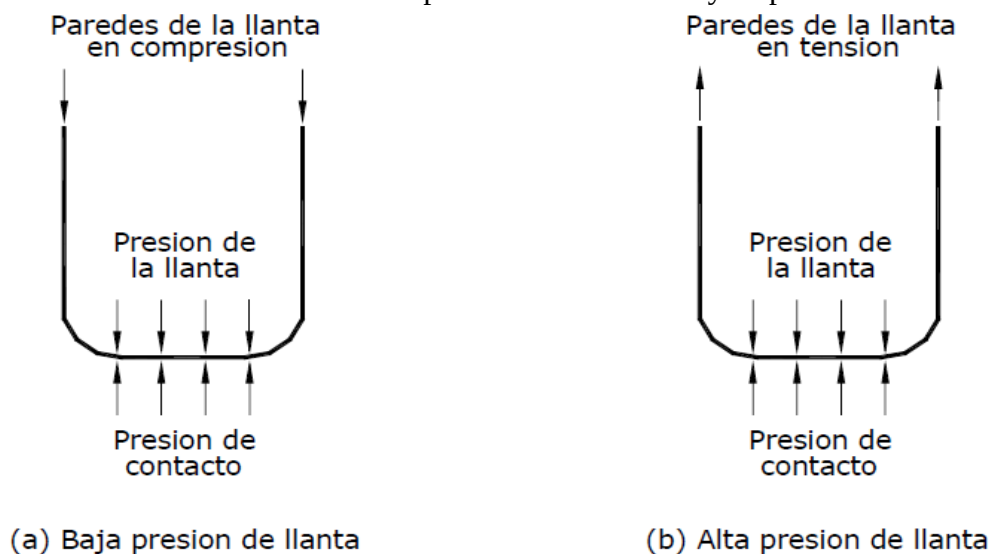
Con el uso de las computadoras, no es problema considerar el número de repeticiones de carga por cada eje y evaluar su deterioro. El método que consiste en dividir los ejes en grupos ha sido utilizado frecuentemente para el diseño de pavimentos rígidos, sin embargo, su aplicación no se ha extendido a pavimentos flexibles por la naturaleza empírica del diseño y la gran cantidad de tiempo de cálculo que se requiere. Sin embargo, en lugar de analizar los esfuerzos y deformaciones debido a cada grupo de ejes de carga, un procedimiento simplificado y ampliamente aceptado desarrolla factores equivalentes y convierte cada grupo de carga en un eje simple de carga equivalente. (Huang, 1993). (GARNICA, 2002).

Forma geométrica de cada solicitud sobre el pavimento, área de contacto y reparto de presiones sobre la misma

La carga del vehículo al pavimento se transmite a través de las ruedas. En los métodos de diseño mecanicistas, es necesario conocer el área de contacto de la llanta con el pavimento, asumiendo que la carga de contacto depende de la presión de contacto.

El tamaño del área de contacto depende de la presión de contacto. Como se indica en la Figura 22, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta para presiones bajas de la llanta, debido a que la pared de la misma está en compresión y la suma de las fuerzas verticales de la pared y presión de la llanta deben ser iguales a la fuerza debido a la presión de contacto. La presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta para presiones altas de las llantas, debido a que la pared de la llanta está en tensión.

Ilustración 22: Relación entre la presión de contacto y la presión de llanta



Fuente: Mecánica de materiales para pavimentos. Higuera, 2009

Sin embargo, en el diseño de pavimentos la presión de contacto generalmente se asume igual a la presión de la llanta. Debido a que los ejes de carga pesados tienen presiones altas y efectos más destructivos en el pavimento, utilizar la presión de llanta como presión de contacto es estar por el lado de la seguridad. (Huang, 1993). (GARNICA, 2002).

Cuando se utiliza la teoría multicapas en el diseño de pavimentos flexibles, se asume que cada llanta tiene un área de contacto de forma circular. Esta suposición no es correcta, pero el error en que se incurre no es significativo.

Naturaleza cíclica de las cargas que actúan en un pavimento

El diseño, análisis y evaluación estructural de las condiciones de los pavimentos comúnmente se basan en el análisis de la teoría elástica multicapas; este acercamiento ofrece la posibilidad de una solución racional al problema de diseño. El éxito de esta aproximación depende de la precisión y la manera en que las propiedades de los materiales son evaluadas y utilizadas. (GARNICA, 2002).

Se ha hecho mucho énfasis en los procedimientos de diseño de los pavimentos; éstos han cambiado desde los métodos empíricos hasta los métodos mecanicistas, basados en el acercamiento más racional en su diseño (Monismith, 1962). Las principales razones de este cambio son las condiciones cambiantes en la estructura del pavimento ante la sollicitación móvil de los vehículos cargados, ya que experimentan dos tipos de esfuerzos: los estáticos por sobrecarga y los dinámicos causados por el movimiento vehicular. Otras consideraciones importantes son el desarrollo de nuevos materiales utilizados en la construcción, nuevas configuraciones de pavimentos y la disponibilidad que nos da la utilización de las computadoras. Dentro de los métodos racionales se

encuentran los procedimientos de diseño mecanicistas; su funcionamiento es estimado y basado en las propiedades mecánicas fundamentales de las capas del pavimento. (Zaman et al., 1994). (GARNICA, 2002).

El acercamiento mecanicista en el diseño involucra el análisis teórico y el cálculo de esfuerzos y deformaciones en lugares críticos, como resultado de las aplicaciones de carga originadas por las ruedas cargadas.

Los materiales que constituyen los pavimentos, incluyendo las terracerías y el terreno de cimentación, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tránsito vehicular.

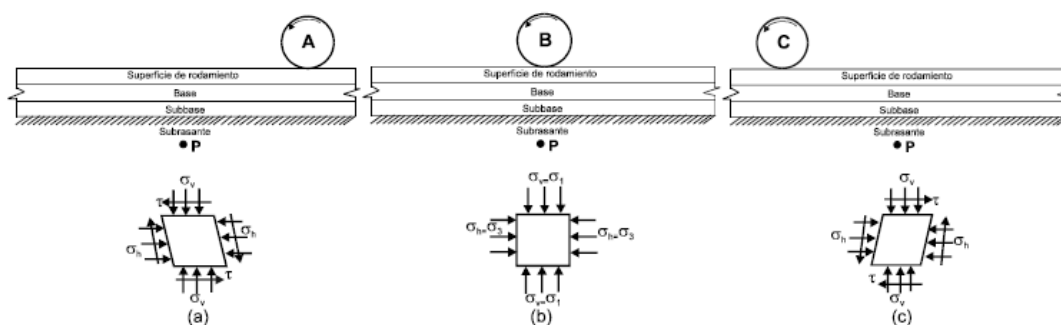
El patrón de esfuerzos inducidos a una estructura de pavimento como resultado del tránsito de vehículos es muy complejo. Un elemento de pavimento está sujeto a pulsos de carga que involucran componentes de esfuerzos normales y cortantes. Los esfuerzos son transitorios y cambian con el tiempo conforme la carga avanza. El esfuerzo cortante cambia de sentido conforme la carga pasa, provocando así una rotación de los ejes de esfuerzos principales. (Lekarp et al., 1997). (GARNICA, 2002).

La Figura 23 muestra el esquema de una sección longitudinal de las capas de un pavimento, sobre el cual una carga se mueve a velocidad constante. El estado de esfuerzos experimentado por el punto P (debido a la carga en el punto A) puede observarse en la Figura 23, en este punto actúan tanto esfuerzos normales como cortantes. Cuando la carga se mueve al punto B, los esfuerzos

cortantes son nulos y únicamente actúan los esfuerzos normales, como se presenta en la Figura 23 en este punto se tiene un estado triaxial de esfuerzos, debido a que se presentan sólo esfuerzos normales. (GARNICA, 2002).

En laboratorio se realizan pruebas triaxiales simulando la condición B tratando de reproducir las condiciones más desfavorables. Durante las pruebas debe aplicarse una presión de confinamiento que varíe con el esfuerzo desviador; sin embargo, es difícil simular en laboratorio este cambio, por lo que la presión de confinamiento se mantiene constante y el esfuerzo desviador es el que se aplica en forma repetida. (Pandey et al.,1987). (GARNICA, 2002).

Ilustración 23: Estado de esfuerzos en la subrasante



Fuente: Mecánica de materiales para pavimentos. Higuera, 2009

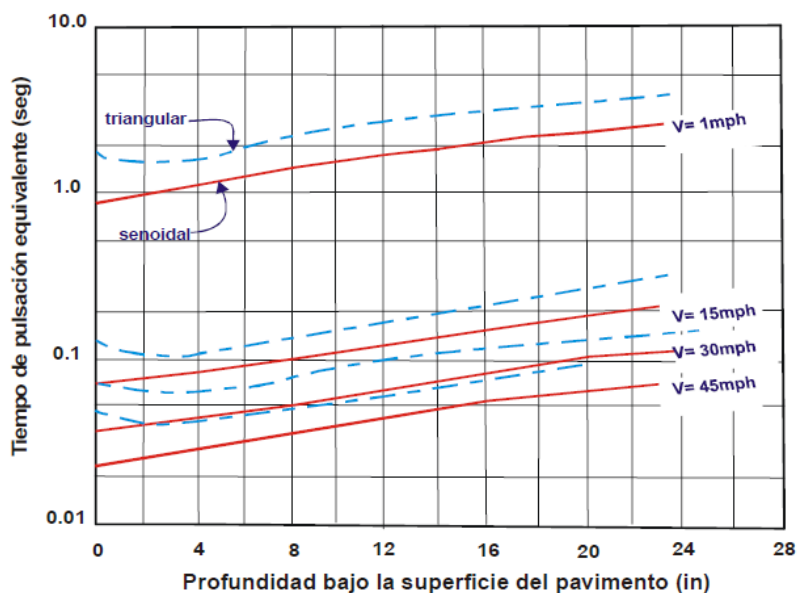
Velocidad del vehículo y tiempo de sollicitación en un punto

Otro aspecto del vehículo que hay que considerar es la velocidad. Si se utiliza la teoría viscoelástica, la velocidad está directamente relacionada con la duración de la carga. Si se utiliza la teoría elástica, debe seleccionarse adecuadamente el módulo de resiliencia de los materiales para el pavimento, en proporción con la velocidad del vehículo. (Huang, 1993). Con base en los puntos

señalados anteriormente se ha supuesto que los esfuerzos aplicados por una llanta en movimiento se aproximen a una forma senoidal, cuya duración depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad del punto al que se está haciendo referencia.

Barksdale (1971) investigó sobre los tiempos de pulsación a diferentes profundidades bajo la superficie del pavimento, así como también a diferentes velocidades. Estos resultados se muestran en la Figura 24. Se observa como a mayor velocidad del vehículo, el tiempo de aplicación de la carga disminuye; también es evidente que simulando el esfuerzo vertical con una onda triangular, los tiempos de aplicación aumentan. Así mismo, se puede apreciar que el tiempo de duración de la carga aumenta con la profundidad. (GARNICA, 2002).

Ilustración 24: Tiempo de pulsación vs profundidad bajo superficie



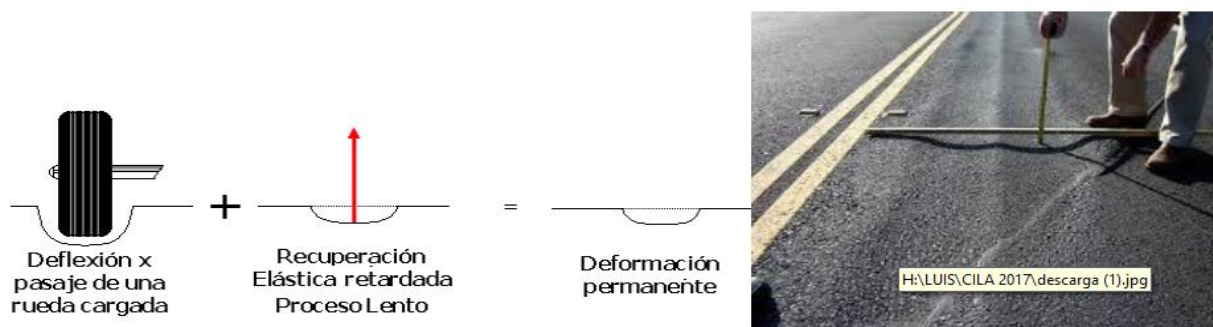
Fuente: Mecánica de materiales para pavimentos. Higuera, 2009

Ahuellamiento

El ahuellamiento es una falla que se manifiesta superficialmente en los pavimentos asfálticos, como consecuencia de la aplicación reiterada de las cargas del tránsito. Consiste en la acumulación de la deformación vertical permanente que se produce en todas las capas que forman la estructura del camino evidenciada en correspondencia con la huella de circulación del tránsito, reduciendo la vida en servicio del pavimento y originando importantes riesgos en la circulación de los usuarios. (DELBONO, S.F.).

Es también una deformación permanente y un tipo de deterioro que se produce en correspondencia con la huella de circulación de los vehículos con cada aplicación de carga y está representada por la acumulación de pequeñas deformaciones verticales que son irrecuperables, ver Figura 25. Este tipo de falla es favorecido por los efectos combinados de elevadas cargas de tránsito y elevada temperatura.

Ilustración 25: Ahuellamiento



Fuente: Ahuellamiento en pavimentos asfálticos usando geosintéticos

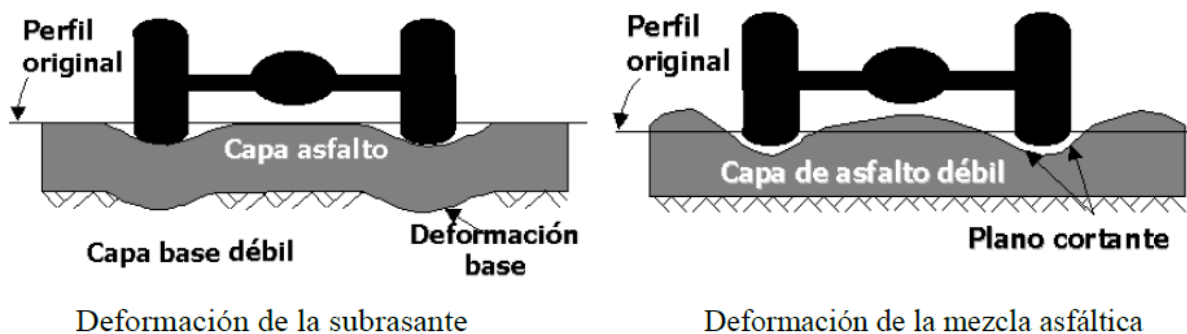
El ahuellamiento se puede originar por varias razones: propiedades deficientes de los materiales que componen el paquete estructural, propiedades volumétricas erróneas y por las solicitaciones

sobre la estructura debidas al tránsito y las condiciones climáticas (altas temperaturas, cargas pesadas, bajas velocidades de circulación, etc.). (REBOLLO, 2009).

El diseño de la mezcla debe contemplar lo expuesto anteriormente para lo cual la mezcla debe ser resistente, flexible y durable de modo de enfrentar no solo el fenómeno del ahuellamiento sino los diferentes modos de falla que pueden manifestarse en un pavimento asfáltico como son: fisuración por fatiga y fisuración térmica que tienen condiciones totalmente diferentes en cuanto a su comportamiento. (MOREA, 2009).

Las deformaciones verticales (ahuellamiento) en un pavimento generalmente se producen por la deformación de las bases, la subrasante y/o la deformación de la propia carpeta asfáltica, ver Figura 26. (MOREA, 2009)

Ilustración 26: Ahuellamiento



Fuente: Ahuellamiento en pavimentos asfálticos usando geosintéticos.

Las mezclas tradicionales se producen con base en granulometrías continuas densas. Estas mezclas, en condiciones extremas de servicio (carga y temperatura), suelen ahuellarse

indefectiblemente. Para que una mezcla sea resistente al ahuellamiento, debe existir un contacto íntimo entre las partículas gruesas, ser más resistentes y tener mayor fricción interna.

Un alto contenido de asfalto genera un efecto lubricante que reduce el contacto entre las partículas de los agregados disminuyendo así la fricción interna de la mezcla. Por lo tanto, con contenidos excesivos de asfalto se tendrá una mezcla más deformable y con mayor probabilidad de ahuellarse. (DELBONO, S.F.).

Fatiga

Agrietamiento por fatiga

La falla estructural en un pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura, al ser sometida a repeticiones de carga por acción del tránsito, sufren un agrietamiento estructural relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción en la base de cada capa; en este sentido la falla relaciona la deformación o la tensión producida con el número de repeticiones admisibles; esto se denomina falla por fatiga o sea por repeticiones de carga. (CARVAJAL, 2014)

Criterios de fatiga

La deformación por tensión en la base de la carpeta asfáltica, es usada para determinar el número teórico de repeticiones de carga que soportará el pavimento antes de alcanzar la falla por fatiga. El modelo más común para predecir el número de repeticiones de carga para iniciar las fisuras por fatiga está en función de la deformación por tracción y el módulo dinámico. (CARVAJAL, 2014).

$$N_f = Ck_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3}$$

Donde:

N_f : Número de repeticiones para iniciar las fisuras por fatiga.

ε_t : Esfuerzo de tensión en el punto crítico.

E : Rigidez del material (mezcla asfáltica).

k_1, k_2, k_3 : Coeficientes de regresión.

C : Factor de ajuste laboratorio - campo.

Modelos elásticos y sistemas multicapa

Los materiales que forman parte de la estructura se consideran homogéneos e isotrópicos y se supone que las capas tienen una extensión infinita en sentido horizontal. En esta metodología se considera la estructura de pavimento como un sistema linealmente elástico, en el cual los materiales se encuentran caracterizados por: (CARVAJAL, 2014).

- Su módulo elástico
- Su relación de Poisson
- El espesor de la capa

Los pavimentos flexibles son sistemas en capas con mejores materiales en la parte superior y no pueden ser representados por una masa homogénea, por lo que el uso de la teoría de capas de Burmister es más apropiado. Burmister (1943) desarrolló por primera vez soluciones para un sistema de dos capas y luego los extendió a un sistema de tres capas (Burmister, 1945). Con el

advenimiento de los computadores esta teoría se puede aplicar a un sistema multicapa con cualquier número de capas. (Huang, 1967, 1968a).

Los supuestos básicos considerados por los programas que manejan esta teoría, con la cual normalmente se diseñan los pavimentos, son (Huang, 2004):

1. Cada capa es homogénea, isotrópica y linealmente elástica con un módulo elástico E y una relación de Poisson ν .
2. El material es ingrávito (no tiene peso) e infinito en extensión de área.
3. Cada capa tiene un espesor finito h , excepto la capa más baja (subrasante) que se considera infinita en espesor.
4. Se aplica una presión uniforme q en la superficie sobre un área circular de radio a .
5. Las condiciones de continuidad se satisfacen en las interfaces de las capas, como la misma tensión vertical, tensión de corte, desplazamiento vertical y desplazamiento radial. Para una interfaz sin fricción, la continuidad del esfuerzo cortante y el desplazamiento radial es reemplazada por cero esfuerzo cortante en cada lado de la interfaz.

No se analizarán sistemas con capas visco elásticas debido a que esta teoría no es la empleada para el diseño y dimensionamiento de pavimentos flexibles en nuestro país.

Software de modelación

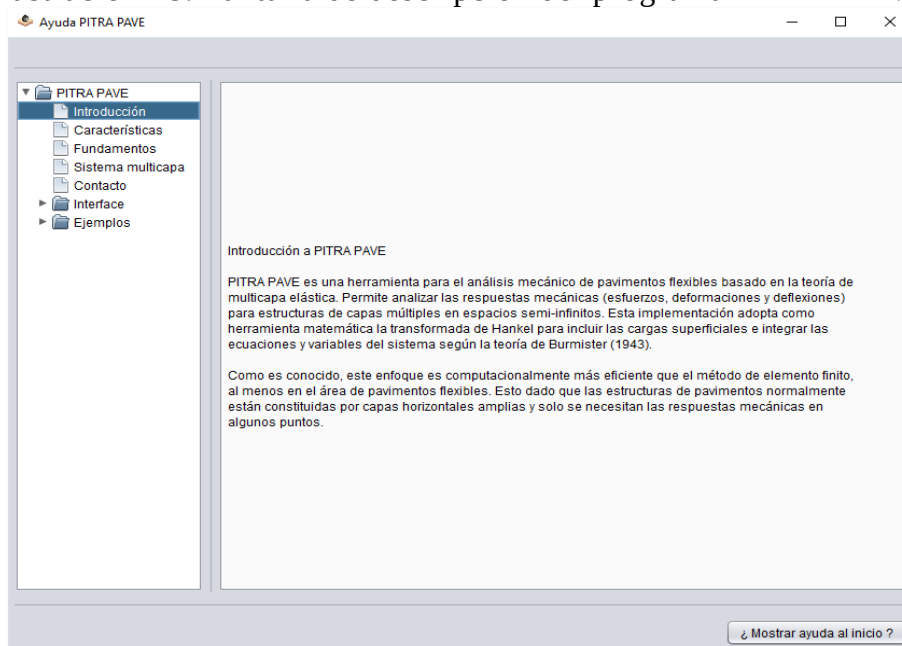
Para el análisis de repartición de cargas por líneas de rotación y conjunto de módulos, se solicitará permiso a la empresa de transporte extrapesado Transportes Montejo, para poder modelar piezas en equipos reales en el software EASYLOAD de Goldhofer, que permite demostrar cómo se distribuye la carga en un equipo modular especial.

Ilustración 27: Descripción Software easyLOAD

	easyLOAD³ Version 3.0.2 (Build 182)	Goldhofer
Datos de origen		
Nº. de índice :	14	
Tipo :	THP	
Combinación paralela :	-	
Denominación :	6 cuna 6	
Nº. del vehículo :		
Signo KFZ :		
Datos básicos del Remolque/Semirremolque		
Peso propio :	67.702 kg	
Centro de gravedad :	13.519 mm	
Reparto del peso propio	(basados en la posición inicial de la conmutación del circuito de apoyo)	
	Circuito de apoyo delantero	Circuito de apoyo trasero
	(6 Líneas de eje)	(6 Líneas de eje)
	6x 6.195 kg = 37.171 kg	6x 5.088 kg = 30.530 kg
Largo mínimo :	29.000 mm	
Extensión máxima a :	0 mm	
Largo máximo :	29.000 mm	
Posición inicial		
Posición de la extensión :	0 / 0	
Extendido por :	0 mm	
Largo total, Remolque/Semirremolque :	29.000 mm	
Dimensión del acoplamiento a :	0 mm	
Dimensión del acoplamiento b :	29.000 mm	
Dimensión del acoplamiento c (Voladizo trasero) :	0 mm	
Largo total del conjunto a + b + c :	29.000 mm	
Goldhofer Aktiengesellschaft --- Donaustraße 95 --- D-87700 Memmingen --- Phone +49 (0) 8331 / 15-0 --- Fax +49 (0) 8331 / 15-239 Sitz- und Registergericht: Memmingen, HRB 10871 Die TÜV SÜD Automotive GmbH bestätigt in ihrem Technischen Bericht GM76131T (V1.0, 14.04.2010), dass bei bestimmungsgemäßen Gebrauch der easyLOAD Software die Integrität der berechneten Werte gewährleistet ist.		23/06/2019 6:15:50 p. m. 1 PID:00018 - DongleID: 12-12254976

Fuente: easyLOAD Goldhofer

Ilustración 28: Pantalla de descripción del programa PITRA PAVE



Fuente: PITRA PAVE Versión 1.0.0

Ilustración 29: Pantalla de inicio del programa OPENPAVE

OpenPave.org
Open Source Pavement Engineering

☒ Exact ☒ Quick and Dirty
☒ Default ☒ Boussinesq MET
☒ Fast ☒ Numerical MET
☐ Vertical Deflection Only

v1.2
2013/11/01

Layer	Thickness (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction
1	100	150	0.35	1
2	0	150	0.35	1

Location	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)
1	0	0	20	710	94.691476

Point	1
X (mm)	0
Y (mm)	0
Z (mm)	0
Layer	1
δ_x (mm)	0
δ_y (mm)	0
δ_z (mm)	0.7866021
σ_{xx} (kPa)	-603.5
σ_{yy} (kPa)	-603.5
σ_{zz} (kPa)	-710
τ_{xy} (kPa)	0
τ_{xz} (kPa)	0

Fuente: Hoja de cálculo Openpave

Para el diseño se utilizarán programas de análisis elástico de sistemas multicapas para pavimentos que permitan aplicar múltiples cargas correspondientes a las ruedas del equipo modular para calcular los esfuerzos y deformaciones en las diferentes capas de las estructuras seleccionadas para modelación. Para este efecto se utilizará el programa PITRA PAVE del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, cabe resaltar que para este tipo de modelaciones también se puede hacer uso de la versión demo del software OPENPAVE, que fue desarrollada para la guía de diseño AASHTO 2002, estos entre una gran cantidad de software especializados que también se puede utilizar.

METODOLOGÍA

La presente comparación que detallará el impacto destructivo que ocasiona un equipo modular especial versus un Tractocamión comercial en una estructura de pavimento flexible común de la infraestructura vial nacional se realizará de acuerdo con la metodología que permite para presentar dichos estudios el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). La cual carece de un paso a paso que soporte un estudio detallado.

Con el fin de realizar un estudio y análisis de ingeniería mecanicista que demuestre el impacto destructivo de una carga extrapesada sobre un pavimento, la carga a transportar por un equipo especial debe ser indivisible y extrapesada, es decir que la pieza no pueda fraccionarse y que supere las 52 toneladas permitidas a transportar en Colombia por el camión de diseño.

La metodología se desarrollará siguiendo los pasos que se detallan a continuación:

Inicialmente se debe especificar la configuración del modular, el peso de este, las dimensiones, presiones de inflado de llantas y el peso y medidas de la carga a transportar. Se necesitará la realización de un plano de transporte que detalle el número de líneas de rotación del tráiler modular y su unidad o unidades tractoras, las distancias entre los ejes o líneas de rotación del tráiler, el número de llantas por cada línea de rotación, la separaciones longitudinales y transversales entre llantas y entre centro a centro de llantas, más la presión de inflado de las llantas que se prevé usar para el transporte. También debe especificarse el peso Bruto Vehicular (PBV) del conjunto

compuesto por el tráiler modular y la carga, también el peso del cabezote y la manera como este halara el tráiler con la carga.

Con esta información se realizará una modelación del peso de una carga extrapesada más el peso del equipo modular especial, con un software apropiado de distribuciones de cargas extrapesadas que demuestre la manera como se repartirá la carga indivisible extrapesada sobre los diferentes ejes (líneas de rotación) y sobre cada una de las llantas de los ejes, escogiendo una configuración de modular y un diagrama de distribución de cargas sobre el pavimento.

A continuación se ejecutará un análisis que permita apreciar que el Peso Bruto Vehicular del transporte o su peso máximo por eje del equipo modular especial no supere el peso o carga máximo por eje autorizado por las autoridades competentes para la movilización del transporte por la infraestructura vial de Colombia.

Posteriormente, acorde con las condiciones como las carreteras, el tránsito y climas por las que se prevé que circule el equipo modular especial, se identificara un número representativo de estructuras típicas de pavimento en dichas carreteras, las cuales se deberán escoger del manual para el diseño de pavimentos asfálticos de vías con medios y altos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías. Estas estructuras que se adoptarán serán de pavimentos asfálticos, debido a que la infraestructura vial nacional en su mayoría se constituye de pavimentos flexibles.

Tomando estructuras de pavimentos flexibles como modelo de acuerdo con una ruta de transporte típica y considerando las cargas reales transmitidas por la línea de rotación a las llantas de un

equipo modular especial, se calcula el efecto teórico de ellas sobre las estructuras de pavimento, utilizando programas de cálculo apropiados que demuestren como se comportaría una carga extrapesada y extradimensionada transitando por un pavimento flexible típico en Colombia.

Con la anterior información se realizará una comparación de los efectos destructivos calculados para las diferentes estructuras de pavimentos flexibles, que producen las cargas extrapesadas versus los efectos destructivos que produce en este mismo tipo de estructuras las unidades vehiculares autorizadas por el Ministerio de Transporte de Colombia, teniendo en cuenta que estos son los vehículos con mayor peso bruto vehicular que pueden transitar sin permiso especial en la infraestructura vial del país.

Finalmente con los resultados obtenidos, se hará un análisis mecanicista de ingeniería con el objetivo de demostrar que factor daño produce la sobrecarga aplicada por los vehículos modulares con cargas extrapesadas y extradimensionadas sobre una estructura de pavimento típica en Colombia, teniendo en cuenta cálculos de fatiga y ahuellamiento.

DESARROLLO METODOLOGICO

COMPOSICIÓN DEL EQUIPO ESPECIAL PARA EL PRESENTE ESTUDIO

Cabezote:

Para el presente análisis de pavimentos el equipo modular especial está compuesto por (1) una unidad tractor (Tractocamión) conformado por un eje simple de rueda simple direccional y un eje doble de rueda doble (Tándem).

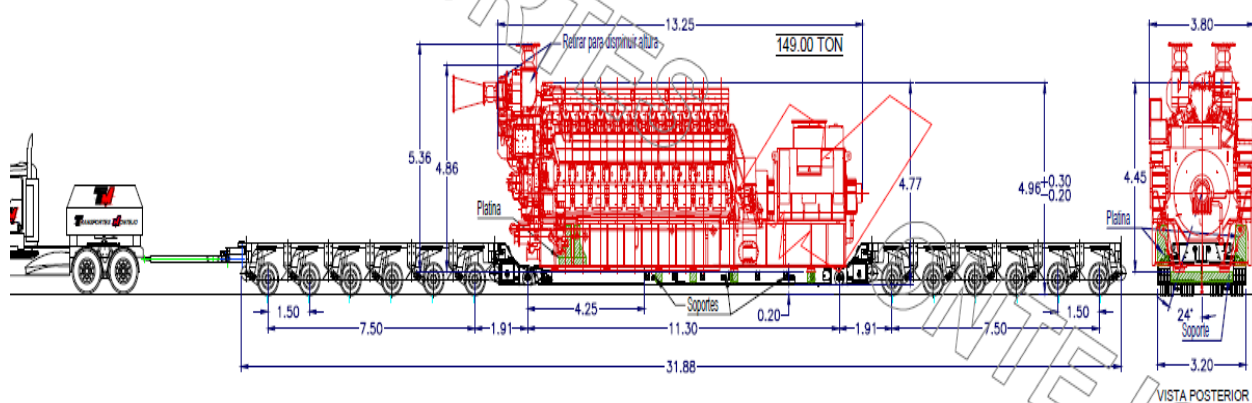
Remolque:

Para el presente análisis el Cabezote descrito anteriormente hala un remolque modular conformado por seis (6) líneas de modulares de 8 ruedas por línea, seguido de (1) un juego de vigas y luego de seis (6) líneas de modulares de 8 ruedas por línea, como se muestra en la siguiente figura:

Configuración del equipo de transporte:

Modular 6 Líneas – Vigas – Modular 6 Líneas

Ilustración 30: Modular 6 Líneas – Vigas – Modular 6 Líneas



Fuente: Transportes Montejo

En la siguiente ilustración se presenta fotografías de los equipos modulares con una carga similar a la que hace parte del presente análisis, en la misma configuración con las que usualmente se solicita permiso de uso de vía.

Ilustración 31: Transporte en Modular 6 Líneas – Vigas – Modular 6 Líneas



Fuente: Transportes Montejo

El vehículo especial modular no se encuentra clasificado dentro de la resolución 4100 del 28 de diciembre de 2004 del Ministerio de Transporte de la República de Colombia, por lo cual se debe realizar un análisis particular para conocer el impacto que este y su carga ejerce sobre las estructuras de pavimento inmersas en el trayecto a evaluar (Caucasia – La Apartada).

MEDIDAS DEL EQUIPO MODULAR:

Separación entre ejes del equipo Modular:

- **1.50 mts entre centros de llanta.**

Separación entre Semiejes del equipo Modular:

- **1.80 mts (180 cm).**

Cantidad de llantas por línea del equipo Modular:

- **8 Llantas por línea de rotacion, 4 Llantas por semieje.**

Separación longitudinal entre Llantas del equipo Modular:

- **0.06 mts (6 cm).**

Ancho de Llantas del equipo Modular:

- **0.21 mts (21 cm).**

Presión de inflado de las Llantas del equipo Modular:

- **110 psi (7,7 kg/cm², 758.4 kPa).**

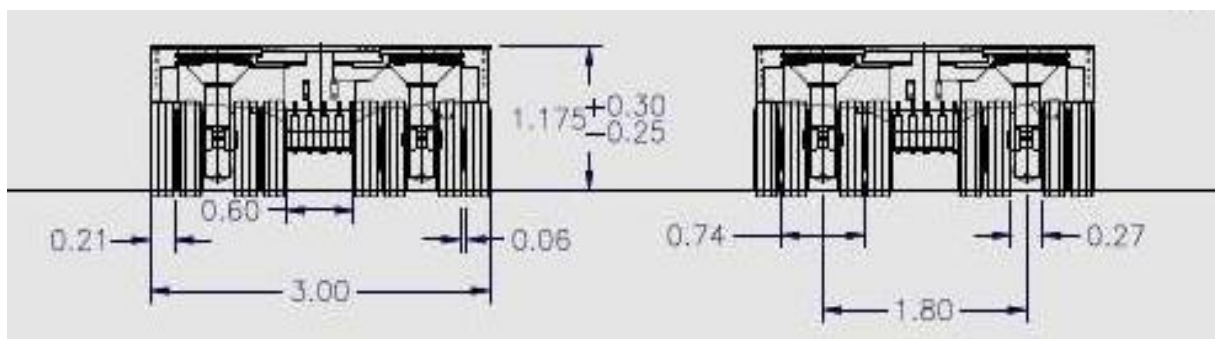
Longitud Total del equipo Modular:

- **31.88 metros.**

Peso Bruto Vehicular del equipo Modular:

- **216.7 Toneladas.**

Ilustración 32: Transporte en Modular 6 Líneas – Vigas – Modular 6 Líneas

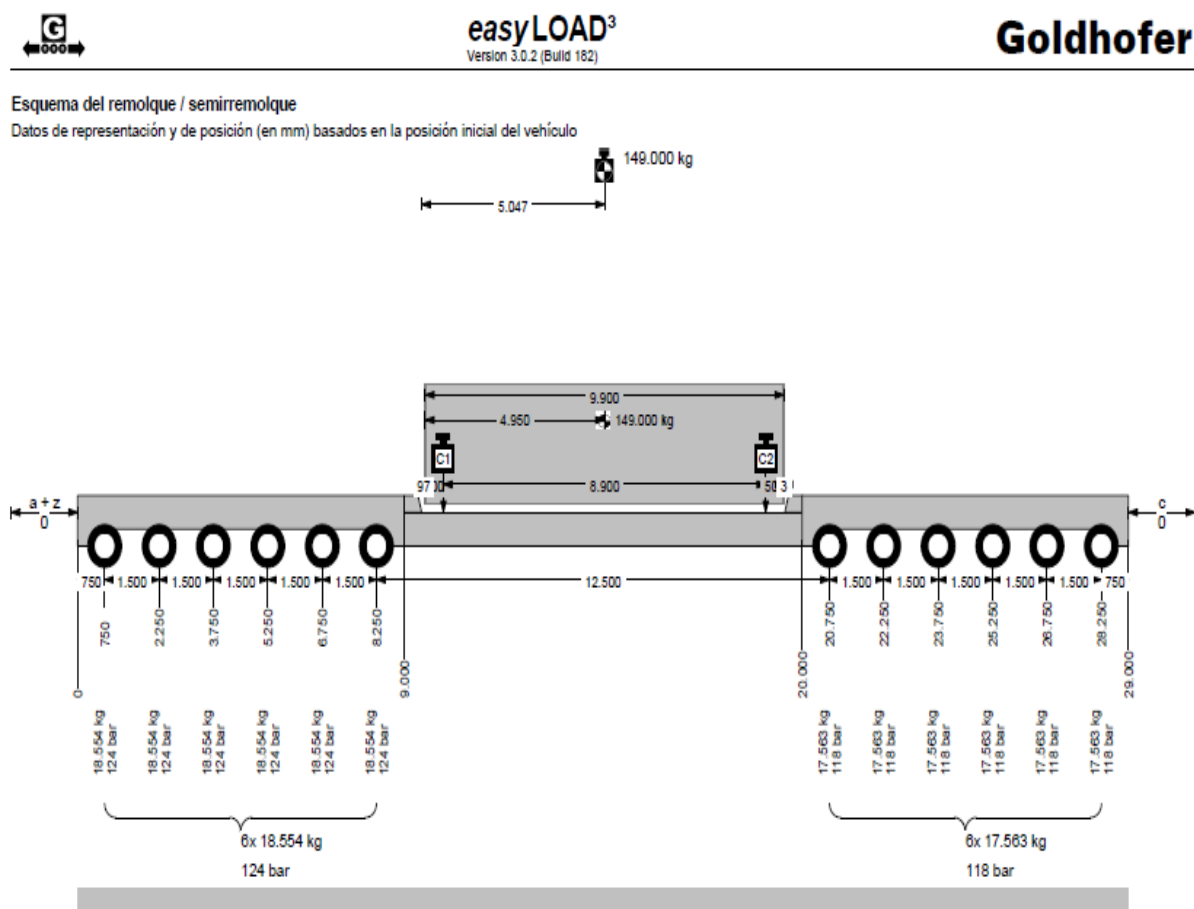


Fuente: Transportes Montejo

Para estimar las cargas por eje o el peso que ejerce una línea de rotación sobre la superficie de pavimento teniendo en consideración el peso de la carga y del equipo, se realiza una modelación con el Software easyLOAD del fabricante de los equipos modulares Goldhofer. Donde arroja datos del siguiente orden:

- Carga por línea Modular 6 líneas (Delantero): 18.554 Kg; Total por 6 líneas 111324 Kg
- Carga por línea Modular 6 líneas (Trasero): 17.563 Kg; Total por 6 líneas 105378 Kg

Ilustración 33: Distribución de Carga por Línea

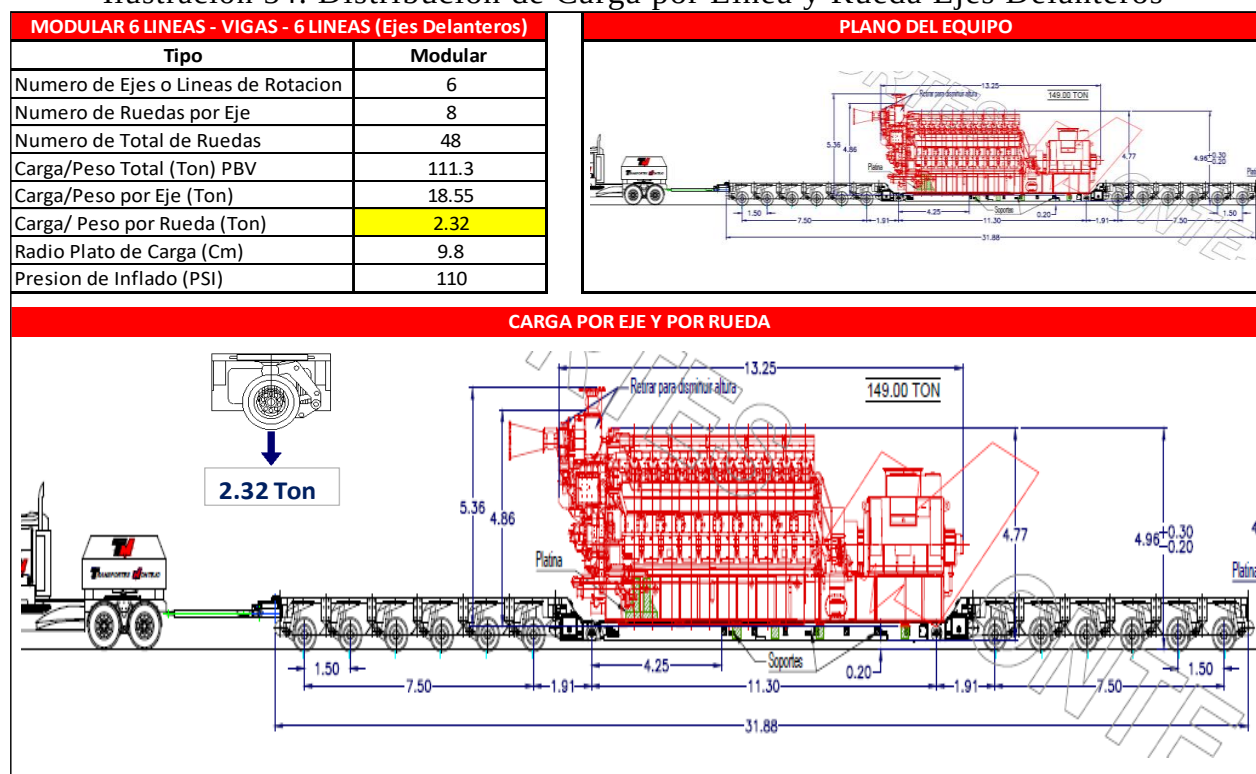


Fuente: Software EasyLOAD Goldhofer

Teniendo en cuenta la anterior ilustración, es importante describir el Peso Bruto Vehicular por los 6 ejes de rotación delanteros y por los 6 ejes de rotación traseros, los cuales a pesar de que el equipo distribuye sus cargas por un sistema de vasos comunicantes no son iguales, debido a que en los ejes delanteros se posiciona el control de mando de los modulares y algunas palancas de giro y mangueras de aceite hidráulico que sobrecargan el equipo, esto es variable e incide en la forma como se armen los módulos.

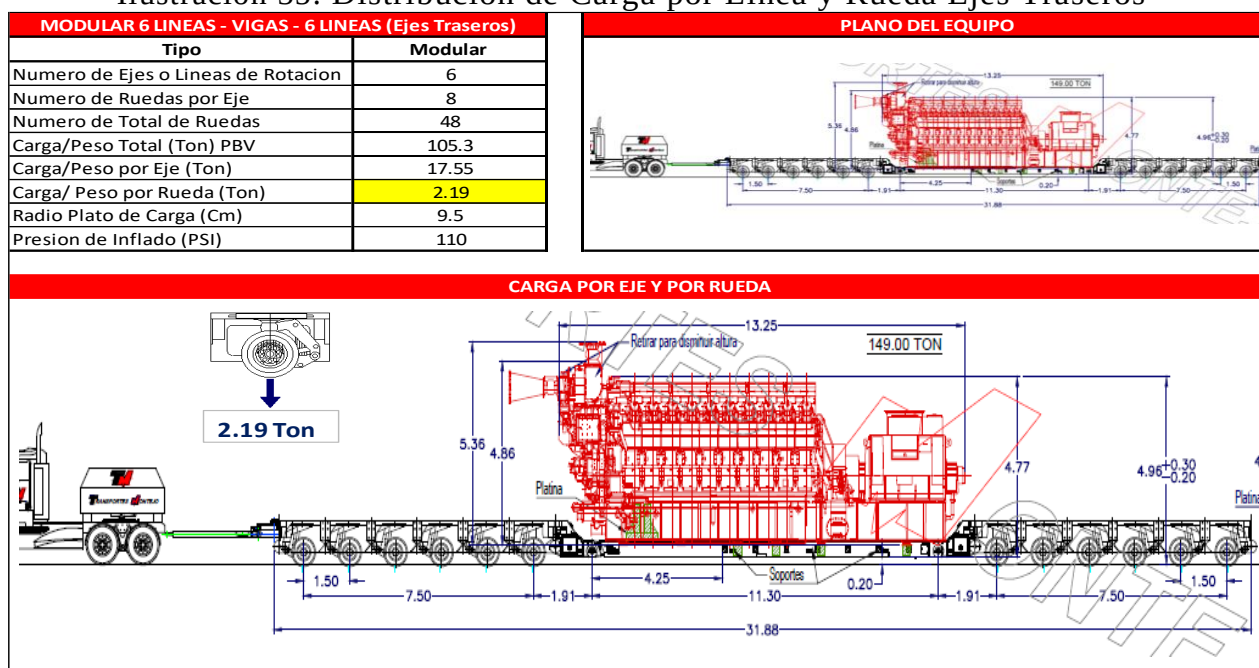
Para el presente documento se analizaran dos sistemas de ejes por la diferencia de su peso en un software especializado para obtener deformaciones en la carpeta asfáltica y en la subrasante por separado de los 2 sistemas de módulos, a continuación se presentan las siguientes características por sistemas de ejes delanteros y traseros:

Ilustración 34: Distribución de Carga por Línea y Rueda Ejes Delanteros



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 35: Distribución de Carga por Línea y Rueda Ejes Traseros



Fuente: Elaboración propia

CARACTERÍSTICAS DEL REMOLQUE Y EL CABEZOTE:

A continuación se describen las características de los ejes que conforman el remolque y el Tractocamión (Cabezote) del vehículo especial.

Tabla 3: Características de los ejes del remolque y cabezote

DESCRIPCION	CABEZOTE		REMOLQUE	
Tipos de Ejes	Rueda Simple	Tándem	Modular Delantero	Modular Trasero
Cantidad de Líneas en el sistema de ejes	1	2	6	6
Peso por Línea (ton)	6	11	18.5	17.5
Presión de inflado (PSI)	80	80	110	110
Presión de inflado (KPa)	552	552	758	758
Distancia Longitudinal entre ejes (cm)	NA	137	150	150
Ruedas	Simple	Doble	Cuádruple	Cuádruple

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que la velocidad representa un aspecto muy importante dentro de la Seguridad Vial en el Transporte Especial, para el caso que nos ocupa, no se debe circular con una velocidad mayor a:

- Zona Urbana: 20 km/h (Vel Max)
- Zona Rural Terreno Plano: 30 km/h (Vel Max)
- Zona Rural Terreno Montañoso: 30 km/h (Vel Max)

Para realizar el análisis de un transporte especial extrapesado y extradimensionado es muy importante partir desde el concepto que demuestre que la carga a transportar es indivisible, con base en esto se adoptan los parámetros señalados en la resolución 4959 del 2006 del Ministerio de Transporte de la Republica de Colombia y se desarrolla la metodología conforme a los lineamientos recomendados por el ministerio de transporte y el Instituto Nacional de Vías.

Con el fin de analizar los impactos destructivos que ocasiona un equipo modular especial sobre una estructura de pavimento flexible en Colombia, es importante conocer la ruta por la cual transitara el vehículo, realizar una determinación del clima de acuerdo a las estadísticas actuales y determinar un tránsito para el corredor de análisis.

Acorde al estudio a realizar se realiza análisis de clima y de transito por sectores, como se menciona a continuación:

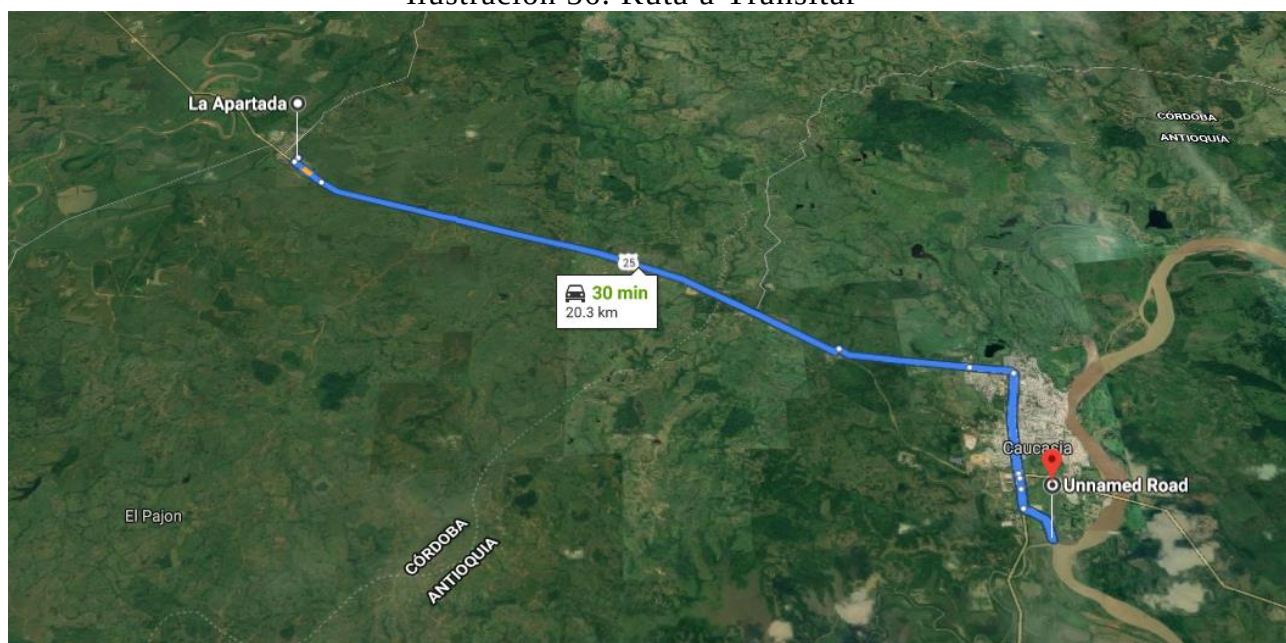
ruta: Caucasia – La Apartada

Subsector: Caucasia – La Apartada

Total Kilómetros de la ruta: 20 Kms.

Estaciones de conteo Vehicular: 743 (Caucasia – La Apartada).

Ilustración 36: Ruta a Transitar

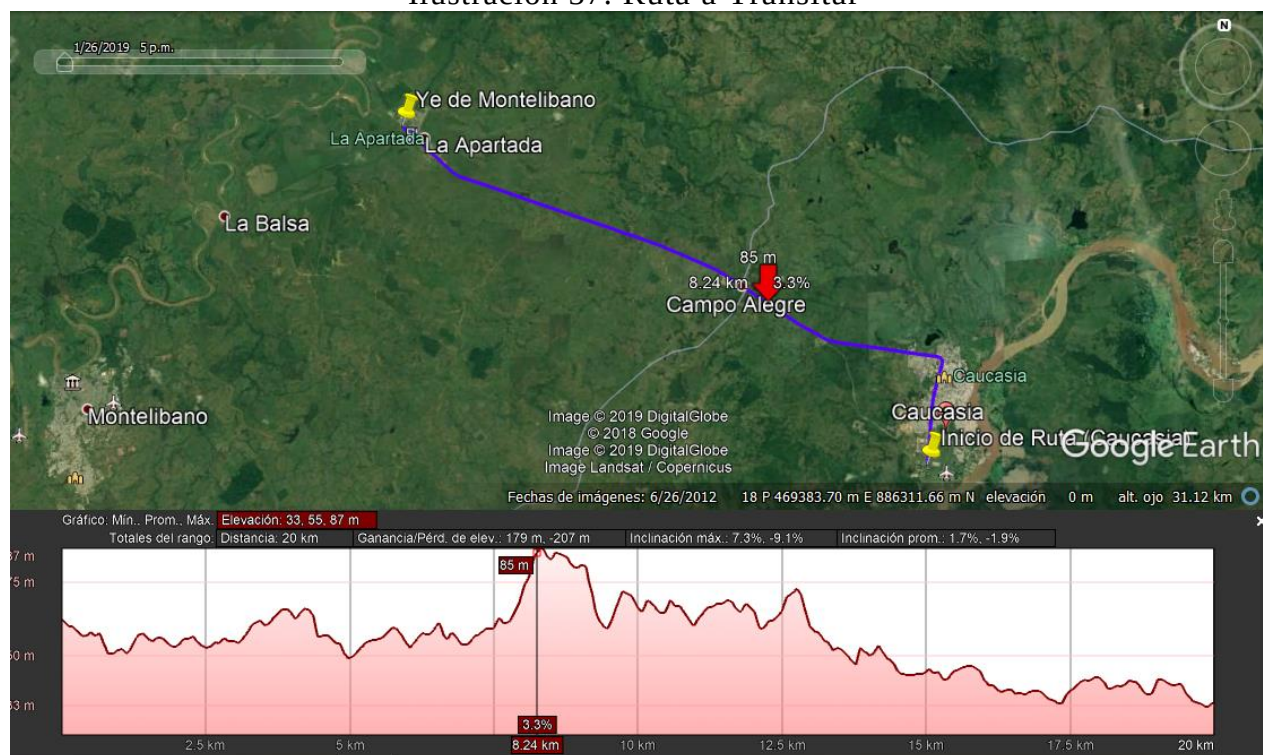


Fuente: Google Maps

Después de identificar la ruta para el tránsito de la carga extrapesada y extradimensionada, se identifica el subsector de la ruta que cuente con información histórica sobre los volúmenes de transito de la vía o la identificación de una estación de conteo vehicular, para proseguir con la alimentación de cálculos para el presente análisis.

Una vez se reconoce el sector por el cual transitará la carga, se obtienen los perfiles característicos del terreno aproximados, notando que el vehículo modular especial y su carga transitará en su gran mayoría por un terreno plano con pendientes promedio que en general no superan el 3.3% - pico que se presenta hacia la llegada del corregimiento de Campo Alegre (Córdoba), como se muestra en la siguiente Figura:

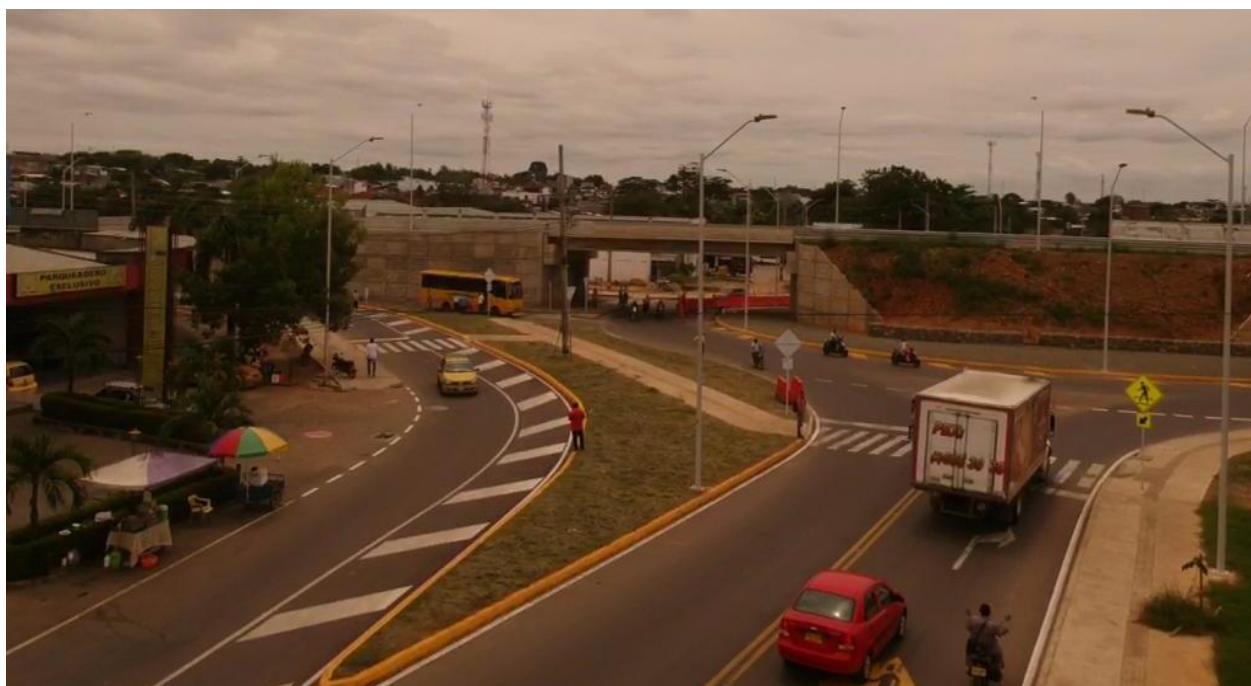
Ilustración 37: Ruta a Transitar

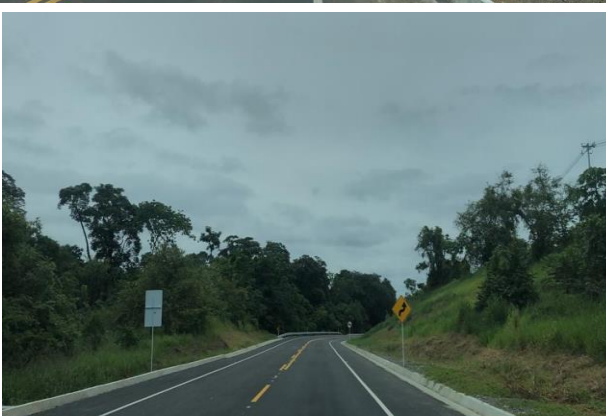
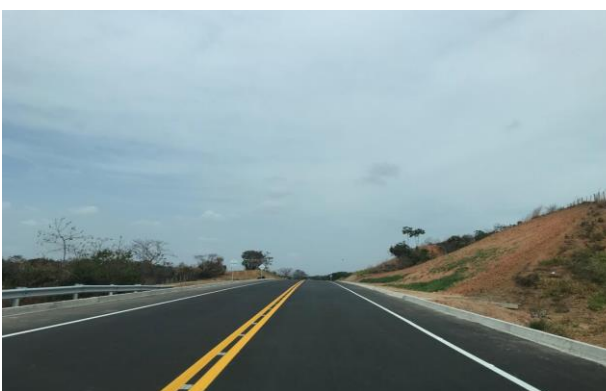


Fuente: Pendientes sector Caucasia – La Apartada Google Earth

Después de realizar un previo recorrido a la ruta por la cual transitara la carga especial, a continuación se evidencian algunas imágenes de Fuente propia del estado actual del pavimento:







DETERMINACIÓN DEL CLIMA:

El clima identificado para el trayecto en estudio, según el manual de diseños de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito del INVIAS hace referencia a un clima Cálido seco y Cálido Semihúmedo. Esto de acuerdo con los datos que registra el IDEAM en sus plataformas de búsqueda por región o municipio. Para este transporte el promedio de la temperatura en °C para el municipio de Cauca es de 27.8 °C y el promedio de precipitación en mm es de 181.8 mm. Y para el municipio de La Apartada es de 27.9 °C y el promedio de precipitación en mm es de 210.8 mm.

Tabla 4: Identificación del Clima del trayecto

No	REGIÓN	TEMPERATURA TMAP (°C)	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)
R1	Fría seca y fría semihúmeda	< 13	< 2000
R2	Templado seco y templado semihúmedo	13 -20	< 2000
R3	Cálido seco y Cálido Semihúmedo	20 – 30	< 2000
R4	Templado húmedo	13 – 20	2000 – 4000
R5	Cálido húmedo	20 – 30	2000 – 4000
R6	Cálido muy húmedo	20 – 30	> 4000

Fuente: Elaboración Propia basada en INVIAS

Debido a que el subsector de análisis y la estación de conteo vehicular hacen referencia al mismo tramo, se analizaron los climas de los dos municipios inmersos en el tránsito de la carga, Cauca y La Apartada. A continuación se citan las tablas con los registros según IDEAM:

Tabla 5: Identificación del clima La Apartada

CLIMA LA APARTADA												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	27.7	28.3	28.6	28.2	27.7	27.6	27.7	27.6	27.3	27.3	27.6	27.6
Temperatura min. (°C)	22.1	22.4	22.9	23	23	23	22.8	22.9	22.7	22.8	23	22.5
Temperatura máx. (°C)	33.4	34.2	34.4	33.4	32.5	32.2	32.6	32.3	31.9	31.8	32.3	32.7
Temperatura media (°F)	81.9	82.9	83.5	82.8	81.9	81.7	81.9	81.7	81.1	81.1	81.7	81.7
Temperatura min. (°F)	71.8	72.3	73.2	73.4	73.4	73.4	73	73.2	72.9	73	73.4	72.5
Temperatura máx. (°F)	92.1	93.6	93.9	92.1	90.5	90	90.7	90.1	89.4	89.2	90.1	90.9
Precipitación (mm)	14	29	56	159	243	272	330	312	312	262	123	69
												27.8
												REGION
												3
												PRECIPITACION
												181.8

Fuente: Elaboración Propia basada en IDEAM (Climate-data.org)

Tabla 6: Identificación del clima Caucasia

CLIMA CAUCASIA												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	27.9	28.5	28.8	28.5	27.9	27.7	27.8	27.7	27.4	27.4	27.7	27.6
Temperatura min. (°C)	22.4	22.7	23.2	23.3	23.2	23.1	22.9	22.9	22.8	22.9	23.1	22.6
Temperatura máx. (°C)	33.5	34.3	34.5	33.7	32.7	32.4	32.8	32.5	32.1	32	32.4	32.7
Temperatura media (°F)	82.2	83.3	83.8	83.3	82.2	81.9	82	81.9	81.3	81.3	81.9	81.7
Temperatura min. (°F)	72.3	72.9	73.8	73.9	73.8	73.6	73.2	73.2	73	73.2	73.6	72.7
Temperatura máx. (°F)	92.3	93.7	94.1	92.7	90.9	90.3	91	90.5	89.8	89.6	90.3	90.9
Precipitación (mm)	30	34	64	197	274	323	341	380	331	293	185	78
												27.9
												REGION
												3
												PRECIPITACION
												210.8

Fuente: Elaboración Propia basada en IDEAM (Climate-data.org)

En términos generales, la región climática con la que se deben realizar los análisis es la R3 (Región 3), que abarca los rangos de temperatura entre 20-30 °C y precipitación media anual inferior a 2000 mm. Esto de acuerdo a lo establecido en el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en vías con Medios y Altos volúmenes de tránsito del Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, de 1998

Para realizar los análisis de tránsito se tuvieron en cuenta los siguientes conceptos:**El tránsito en el diseño de pavimentos flexibles**

Dado que, el presente estudio pretende contrastar, a través de diferentes metodologías, el factor de equivalencia de carga de los vehículos comerciales, a continuación se hace una descripción de la variable tránsito, aspecto fundamental en el diseño de estructuras de pavimento flexible, sin excluir por supuesto a los rígidos.

Los pavimentos tienen como función principal la de resistir las cargas de los vehículos, las cuales son soportadas por los ejes que los conforman y se transmiten por el contacto entre las llantas y la superficie. De tal forma que, dada la relevancia de esta variable, su evaluación debe contemplar aspectos, tales como: el tipo de cargas, su magnitud y configuración, al igual que el número de repeticiones.

Procedimientos para considerar el efecto del tráfico:

Dependiendo de la relevancia del proyecto, existen tres procedimientos para considerar el efecto del tráfico en el diseño.

Tráfico de Diseño

El espesor de estructura está gobernado por la carga de una llanta simple y no se considera el número de repeticiones. La variedad de llantas esperadas se convierte a una sola carga equivalente. Este método ha sido empleado en el diseño de aeropistas.

Vehículo de Diseño

El espesor se ve gobernado por el número de repeticiones de un eje de referencia, comúnmente un eje simple de rueda doble de 80kN o 8.2Ton de peso. Si existe diversidad de ejes (tándem o trídem), estos deben convertirse a ejes equivalentes de 8.2Ton con un factor conocido como factor de equivalencia de carga EALF (Equivalent Axle Load Factor, en inglés).

Tránsito y Vehículo Variables

Las cargas y sus repeticiones esperadas se consideran individualmente, de tal forma que no existe la necesidad de determinar factores de equivalencia de carga para cada eje. Las cargas pueden ser analizadas como grupos independientes y, para fines de diseño, los esfuerzos, deformaciones y deflexiones producidas por cada una de ellas se determinan y emplean por separado.

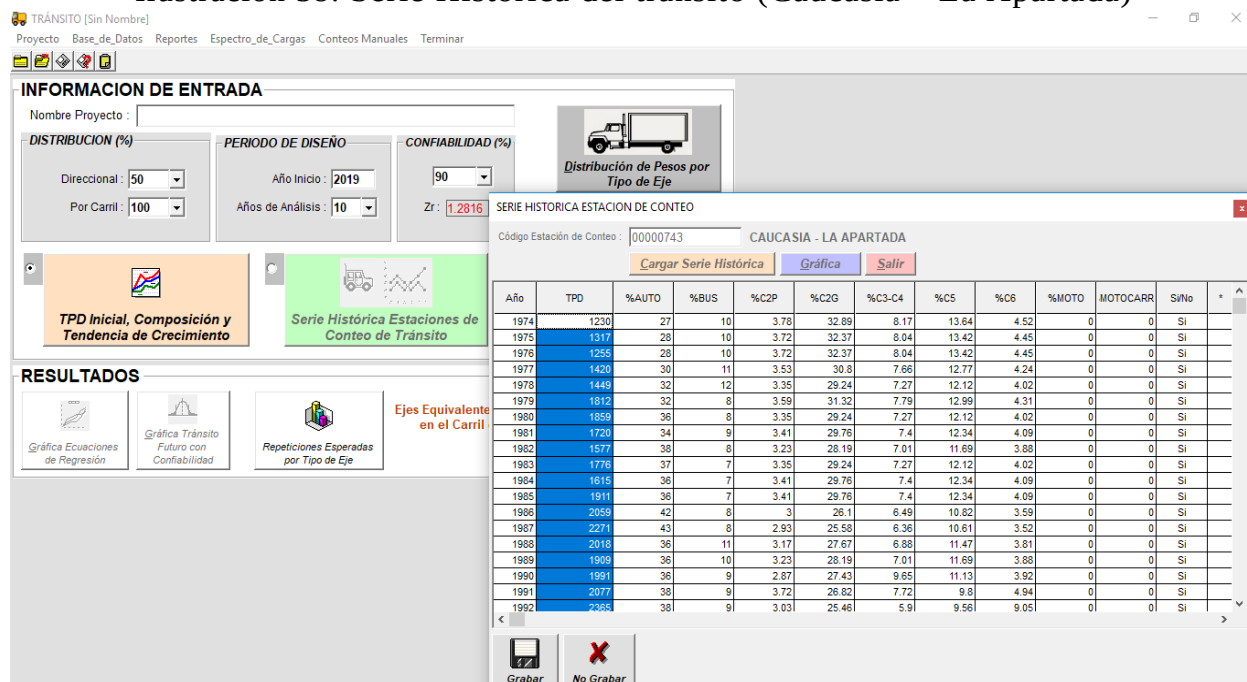
El segundo de los tres procedimientos es el empleado en Colombia, y los métodos tradicionales para la determinación de los factores de equivalencia de carga son comparados con el propuesto en el presente estudio.

DETERMINACIÓN DEL TRANSITO:

Para definir el tránsito del tramo en estudio se tomó como serie histórica la información del INVIAS en sus estaciones de conteo actualizado al último año de conteo existente, estos datos se encuentran en su versión más actualizada en el programa TRANSITO (Análisis de la serie histórica de estaciones de conteo de tránsito y espectros de carga) del ingeniero Efraín Solano.

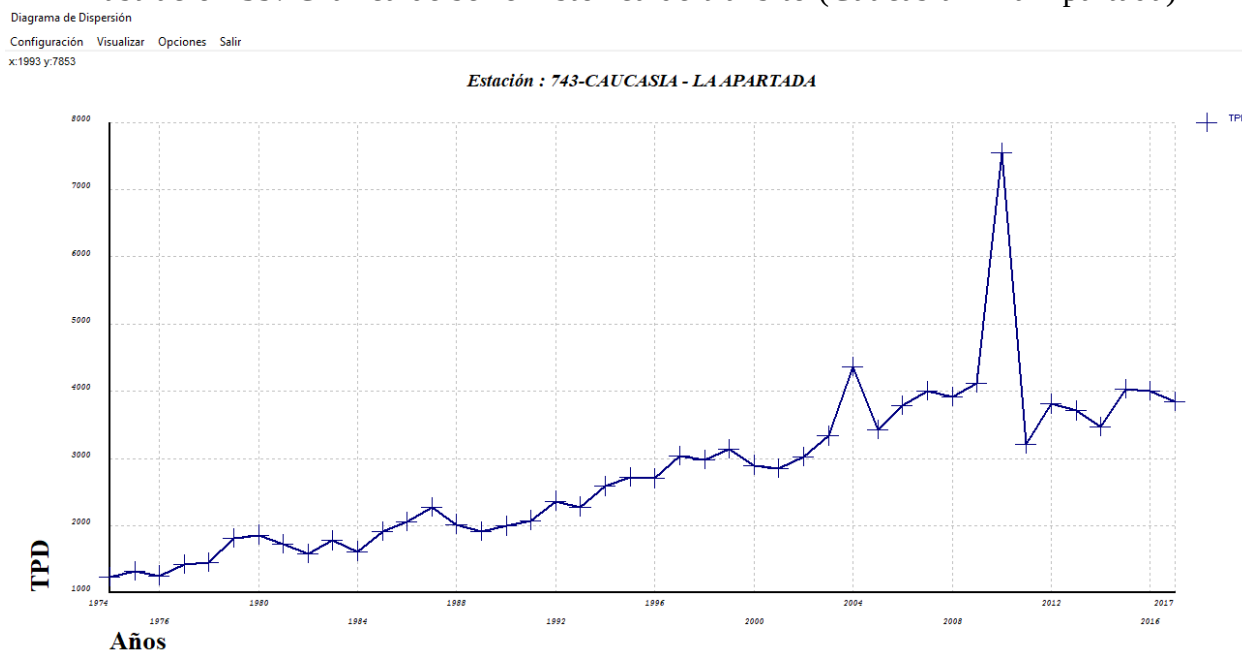
La serie histórica tomada del programa TRANSITO data conteos desde el año 1974 al 2017 con porcentajes de distribución repartidos en (%Autos, % Buses, % Camiones 2p, 2g, 3 a 4, 3S2 y 3S3), se realizó una regresión para calcular los años faltantes y luego se realizó la proyección del tránsito a partir del año 2019 por un período de 10 años y confiabilidad del 90%, como lo establece el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en vías con Medios y Altos volúmenes de tránsito del Ministerio de Transporte, INVIAS.

Ilustración 38: Serie Histórica del tránsito (Caucasia – La Apartada)



Fuente: Programa TRANSITO Efraín Solano

Ilustración 39: Grafica de serie histórica de tránsito (Caucasia – La Apartada)



Fuente: Programa TRANSITO Efrain Solano

Luego de obtener la serie histórica de tránsito desde el año 1974 al 2017, se realizaron cálculos para dividir el tránsito en cantidad de vehículos aforados según la nomenclatura exigida por INVIAS, luego cálculos para el análisis de factores daño o equivalencias de carga, en seguida una regresión, introducción de confiabilidad, proyección de 2017 a 2019, y posterior progresión a partir del año 2019 por un período de 10 años y confiabilidad del 90%. Todo esto con base en la normativa legal vigente del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

Dado que, el presente estudio pretende contrastar, a través de diferentes metodologías, el factor de equivalencia de carga de los vehículos comerciales, a continuación se hace una descripción mediante tablas del cálculo de la variable de tránsito:

Tabla con datos de porcentajes de vehículos, tomados del Software de TRANSITO, actualizado hasta 2017.

Tabla 7: Porcentaje de vehículos TRANSITO

Año	TPDS	%AUTO	%BUS	%C2P	%C2G	%C3-C4	%C5	%C6
1974	1230	27	10	3.78	32.89	8.17	13.64	4.52
1975	1317	28	10	3.72	32.37	8.04	13.42	4.45
1976	1255	28	10	3.72	32.37	8.04	13.42	4.45
1977	1420	30	11	3.53	30.8	7.66	12.77	4.24
1978	1449	32	12	3.35	29.24	7.27	12.12	4.02
1979	1812	32	8	3.59	31.32	7.79	12.99	4.31
1980	1859	36	8	3.35	29.24	7.27	12.12	4.02
1981	1720	34	9	3.41	29.76	7.4	12.34	4.09
1982	1577	38	8	3.23	28.19	7.01	11.69	3.88
1983	1776	37	7	3.35	29.24	7.27	12.12	4.02
1984	1615	36	7	3.41	29.76	7.4	12.34	4.09
1985	1911	36	7	3.41	29.76	7.4	12.34	4.09
1986	2059	42	8	3	26.1	6.49	10.82	3.59
1987	2271	43	8	2.93	25.58	6.36	10.61	3.52
1988	2018	36	11	3.17	27.67	6.88	11.47	3.81
1989	1909	36	10	3.23	28.19	7.01	11.69	3.88
1990	1991	36	9	2.87	27.43	9.65	11.13	3.92
1991	2077	38	9	3.72	26.82	7.72	9.8	4.94
1992	2365	38	9	3.03	25.46	5.9	9.56	9.05
1993	2278	38	11	2.91	24.5	5.68	9.2	8.71
1994	2584	38	10	5.64	22.83	5.12	8.07	10.34
1995	2719	45.5	10.9	5.3	20.5	4.22	6.21	7.37
1996	2699	43	9	5.37	21.71	4.58	7.19	9.15
1997	3039	50	7	4.49	19.22	4.31	6.14	8.84
1998	2980	53	6	5.52	16.92	4.02	6.12	8.42
1999	3139	59	6	4.82	14.8	2.84	4.93	7.61
2000	2898	51	6	6.7	17.84	4.01	6.63	7.82
2001	2850	53	6	5.21	17.26	4.3	6.42	7.81
2002	3023	57	6	5.16	15.83	3.68	5.66	6.67
2003	3332	55	6	6.87	15.18	3.22	5.59	8.14
2004	4367	56	7	5.74	15.63	3.52	4.24	7.87
2005	3429	51.2	7.26	2.01	21.06	3.7	5.11	9.66
2006	3785	49.22	6.44	5.15	19.28	3.78	5.49	10.64
2007	4005	50	7	2.08	21.8	3.84	5.29	9.99
2008	3913	47.56	6.47	5.44	15.95	4.42	5.72	14.44
2009	4117	52	7	1.99	20.78	3.66	5.04	9.53
2010	7544	48.29	7.93	5.32	14.86	5.25	6.47	11.88
2011	3206	46.34	5.9	8.27	16.69	4.99	4.12	13.69
2012	3809	47.89	5.37	14.33	10.51	4.75	3.69	13.46
2013	3708	49.88	6.63	11.99	11.06	5.1	3.62	11.72
2014	3465	44.1	6.72	12.2	12.87	5.56	4.22	14.33
2015	4035	46	5	12.2	12.8	5.5	4.2	14.3
2016	4000	47	5	11.9	12.6	5.4	4.1	14
2017	3843	47	5	11.9	12.6	5.4	4.1	14

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 8: Transito Promedio Diario

Año	TPDS	AUTO	BUS	C2P	C2G	C3-C4	C5	C6
1974	1230	332	123	46	405	100	168	56
1975	1317	369	132	49	426	106	177	59
1976	1255	351	126	47	406	101	168	56
1977	1420	426	156	50	437	109	181	60
1978	1449	464	174	49	424	105	176	58
1979	1812	580	145	65	568	141	235	78
1980	1859	669	149	62	544	135	225	75
1981	1720	585	155	59	512	127	212	70
1982	1577	599	126	51	445	111	184	61
1983	1776	657	124	59	519	129	215	71
1984	1615	581	113	55	481	120	199	66
1985	1911	688	134	65	569	141	236	78
1986	2059	865	165	62	537	134	223	74
1987	2271	977	182	67	581	144	241	80
1988	2018	726	222	64	558	139	231	77
1989	1909	687	191	62	538	134	223	74
1990	1991	717	179	57	546	192	222	78
1991	2077	789	187	77	557	160	204	103
1992	2365	899	213	72	602	140	226	214
1993	2278	866	251	66	558	129	210	198
1994	2584	982	258	146	590	132	209	267
1995	2719	1237	296	144	557	115	169	200
1996	2699	1161	243	145	586	124	194	247
1997	3039	1520	213	136	584	131	187	269
1998	2980	1579	179	164	504	120	182	251
1999	3139	1852	188	151	465	89	155	239
2000	2898	1478	174	194	517	116	192	227
2001	2850	1511	171	148	492	123	183	223
2002	3023	1723	181	156	479	111	171	202
2003	3332	1833	200	229	506	107	186	271
2004	4367	2446	306	251	683	154	185	344
2005	3429	1756	249	69	722	127	175	331
2006	3785	1863	244	195	730	143	208	403
2007	4005	2003	280	83	873	154	212	400
2008	3913	1861	253	213	624	173	224	565
2009	4117	2141	288	82	856	151	207	392
2010	7544	3643	598	401	1121	396	488	896
2011	3206	1486	189	265	535	160	132	439
2012	3809	1824	205	546	400	181	141	513
2013	3708	1850	246	445	410	189	134	435
2014	3465	1528	233	423	446	193	146	497
2015	4035	1856	202	492	516	222	169	577
2016	4000	1880	200	476	504	216	164	560
2017	3843	1806	192	457	484	208	158	538

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9: Factores de Equivalencia de Carga

Pi (t)	Pr (t)	FECi	B	C2P	C2G	C2-S2	C3-S2	C3-S3
5	6.6	0.33			1	1	1	
6	6.6	0.68		1				1
8.2	8.2	1.00	1	1				
10	8.2	2.21				1		
11	8.2	3.24			1			
14	15	0.76						
17	15	1.65				1		
21.5	15	4.22					2	
22	15	4.63						1
24	23	1.19						1
		ΣFECi	1.00	1.68	3.57	4.19	8.77	6.50

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10: Transito y Volumen con Confiabilidad

TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO CON CONFIABILIDAD

VOLUMEN ANUAL CON CONFIABILIDAD

A	B	C2P	C2G	C3-C4	C5	C6	TPD	AÑO	B	C2P	C2G	C3-C4	C5	C6
1,944	316	251	852	225	305	383	4,276	2019	57,670	45,808	155,490	41,063	55,663	69,898
1,971	320	255	864	228	309	389	4,336	2020	58,400	46,538	157,680	41,610	56,393	70,993
2,000	325	259	877	231	314	394	4,400	2021	59,313	47,268	160,053	42,158	57,305	71,905
2,027	329	262	889	234	318	400	4,459	2022	60,043	47,815	162,243	42,705	58,035	73,000
2,056	334	266	901	238	322	405	4,522	2023	60,955	48,545	164,433	43,435	58,765	73,913
2,084	338	269	914	241	327	411	4,584	2024	61,685	49,093	166,805	43,983	59,678	75,008
2,111	343	273	926	244	331	416	4,644	2025	62,598	49,823	168,995	44,530	60,408	75,920
2,140	347	277	938	247	336	422	4,707	2026	63,328	50,553	171,185	45,078	61,320	77,015
2,168	352	280	951	251	340	427	4,769	2027	64,240	51,100	173,558	45,808	62,050	77,928
2,196	357	284	963	254	344	433	4,831	2028	65,153	51,830	175,748	46,355	62,780	79,023

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11: Modelo de regresión y confiabilidad

MODELO DE REGRESIÓN				INTRODUCCIÓN CONFIABILIDAD					
Año	N observado		N estimado	Año	Nproyectado	(Y-Ymodelo) ²	(x-X) ²		
1	3,898	a	3607.483	2019	46	9,379	27354	462	
2	4,110	b	125.4745	2020	47	9,505	63158	420	
3	3,916	r2	0.530669	2021	48	9,630	4574	380	
4	4,238		4,109	2022	49	9,756	16631	342	
5	4,127		4,235	2023	50	9,881	11556	306	
6	5,443		4,360	2024	51	10,007	1171144	272	
7	5,221		4,486	2025	52	10,132	540285	240	
8	4,932		4,611	2026	53	10,258	102671	210	
9	4,276		4,737	2027	54	10,383	212653	182	
10	4,970		4,862	2028	55	10,509	11612	156	
11	4,598		4,988				151603	132	
12	5,441		5,113				107554	110	
13	5,180		5,239				3422	90	
14	5,604		5,364				57624	72	
15	5,433		5,490				3179	56	
16	5,214		5,615				160926	42	
17	5,480		5,741				68099	30	
18	5,428		5,866				191759	20	
19	6,440		5,991				200984	12	
20	6,023		6,117				8905	6	
21	6,727		6,242				235178	2	
22	5,791		6,368				332770	0	
23	6,402		6,493				8415	0	
24	6,457		6,619				26241	2	
25	5,986		6,744				574928	6	
26	5,383		6,870				2210414	12	
27	5,990		6,995				1011569	20	
28	5,740		7,121				1906048	30	
29	5,428		7,246				3306305	42	
30	6,235		7,372				1292484	56	
31	7,663		7,497				27657	72	
32	7,162		7,623				212579	90	
33	8,214		7,748				216596	110	
34	8,637		7,874				583097	132	
35	9,196		7,999				1433761	156	
36	8,478		8,125				125169	182	
37	17,036		8,250				77191257	210	
38	7,224		8,376				1325023	240	
39	7,873		8,501				394592	272	
40	7,250		8,626				1894564	306	
41	7,851		8,752				812344	342	
42	9,038		8,877				25633	380	
43	8,781		9,003				49417	420	
44	8,436		9,128				479433	462	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 12: Resultado del transito

Ndis	19,206,995
Ndis	19,206,995

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con los anteriores resultados de retrocálculo del tránsito, se puede identificar un tipo de tránsito acorde con el manual de altos y medios volúmenes de tránsito de INVIAS:

Tabla 13: **Transito Identificado**

Designación	Rangos de tránsito Acumulado por carril de diseño
T1	0.5 - 1 * 10 ⁶
T2	1 - 2 * 10 ⁶
T3	2 - 4 * 10 ⁶
T4	4 - 6 * 10 ⁶
T5	6 - 10 * 10 ⁶
T6	10 - 15 * 10 ⁶
T7	15 - 20 * 10 ⁶
T8	20 - 30 * 10 ⁶
T9	30 - 40 * 10 ⁶

Fuente: Elaboración Propia

SELECCIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS:

De acuerdo a los anteriores parámetros analizados referentes a las imágenes de la vía a transitar, el clima y tránsito, para el presente análisis comparativo se adoptan 2 tipos de estructuras de pavimentos usuales en las carreteras de la red vial nacional de las 5 posibles estructuras de pavimentos para un tránsito identificado (T7) y una región identificada (R3), dichas estructuras se seleccionan de las cartas de estructuras del manual para el diseño de pavimentos asfálticos de vías con medios y altos volúmenes de tránsito vigente del Instituto Nacional de Vías.

Tabla 14: Estructuras seleccionadas para el análisis del Factor Daño

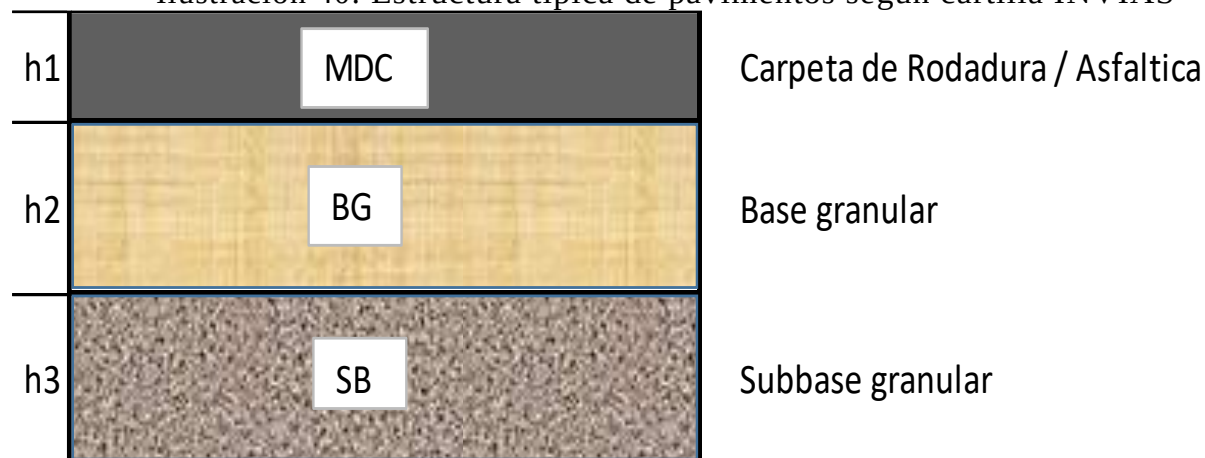
CARTA PARA TRANSITO T7						
	REGION 3 (R3)					
	Cálido Seco - Cálido Semihúmedo					
	S	S1 $300 \leq Mr < 500$	S2 $500 \leq Mr < 700$	S3 $700 \leq Mr < 1000$	S4 $1000 \leq Mr < 1500$	S5 $Mr > 1500$
Espesores en Centímetros (Cm)	Carpeta Asfáltica	15	12	10	10	10
	Base Granular	35	30	35	30	15
	Subbase Granular	50	45	40	30	35

Fuente: Elaboración Propia

Es importante conocer que el análisis del factor daño que produce un equipo modular con carga extrapesada y extradimensionada en una estructura típica de pavimento flexible en Colombia, también se puede determinar para las demás estructuras de la carta INVIAS con región R3 y transito T7, y el presente documento puede servir como guía para su análisis. Además es importante aclarar que el presente análisis se hace para una vía identificada con pavimentos flexibles y no rígidos debido a la inspección en campo de la misma y a que la mayoría de la red vial nacional colombiana está constituida por pavimentos asfálticos.

Estructuras Modelos de Pavimentos Para Análisis CBR=3- 5

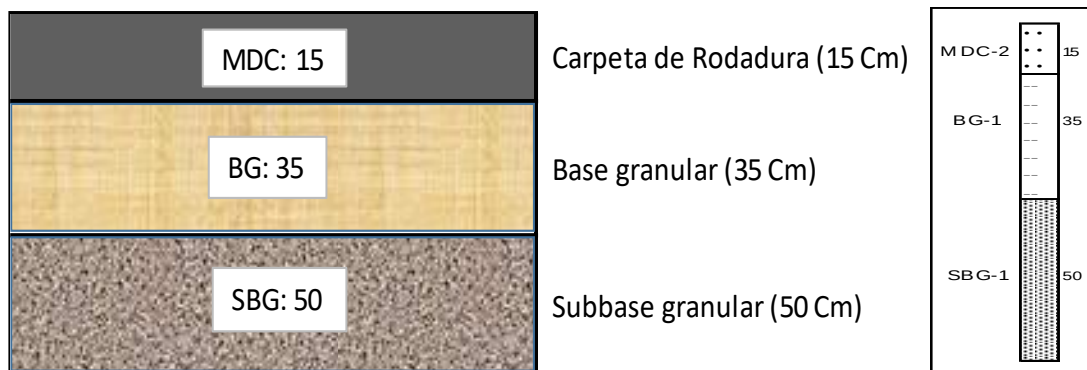
Ilustración 40: Estructura típica de pavimentos según cartilla INVIAS



Fuente: Elaboración propia basada en cartilla INVIAS

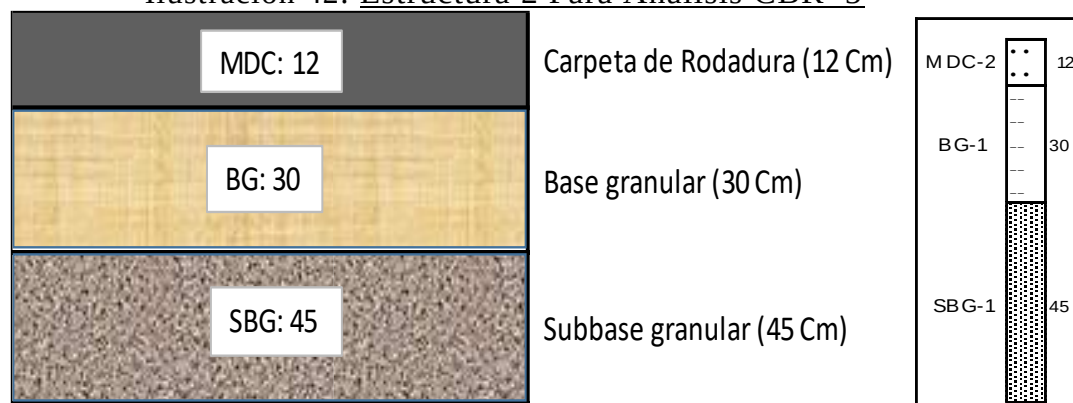
El catálogo de la metodología para diseño de pavimentos del INVIAS, incluye un total de 754 alternativas para las diferentes combinaciones de clima, tránsito y subrasante. De tal variedad de estructuras, se han seleccionado 2 alternativas de pavimento, teniendo en cuenta un tránsito T7, buscando incluir variedad de parámetros de diseño que permitiesen evaluar el efecto de las cargas sobre 2 diversos de materiales. A continuación se describen las 2 estructuras de pavimentos para análisis:

Ilustración 41: Estructura 1 Para Análisis CBR=3



Fuente: Elaboración propia basada en carta INVIAS

Ilustración 42: Estructura 2 Para Análisis CBR=5



Fuente: Elaboración propia basada en carta INVIAS

Para realizar modelaciones que puedan determinar el daño que pueda causar un vehículo especial a la estructura de pavimento, es importante conocer o estimar las propiedades mecánicas de la subrasante y los materiales de las capas que componen las estructuras de pavimento seleccionadas

Para el análisis del eventual daño causado por el vehículo especial al pavimento, además de los espesores de las capas que conforman la estructura, definidos en el numeral anterior, es necesario estimar las propiedades mecánicas (Módulos resilientes y relación de Poisson) de los materiales. En lo que sigue, se presentan las consideraciones y criterios aplicados para obtener los valores de estos parámetros.

Propiedades del suelo de la subrasante

Del Apéndice 1 del Shell Pavement Design Manual de 1978 se toma el módulo resiliente de los suelos de subrasante, adoptando 5 rangos de módulo resiliente para cada una de las estructuras de la cartilla INVIAS del Manual de Altos y Medios Volúmenes de tránsito, siendo los módulos los valores máximos de cada una de las estructuras.

Para obtener el Modulo Resiliente (M_r) de las diferentes Subrasantes, se empleó la expresión presentada en el Apéndice 1 del Shell Pavement Design Manual de 1978, como se indica a continuación:

$$M_r \text{ (MPa)} = 10 \text{ CBR}$$

Luego de aplicar la expresión en mención líneas arriba, se obtuvo una tabla de M_r del siguiente orden:

Tabla 15: Propiedades de la Subrasante

CATEGORIA SUBRASANTE	Módulo Resiliente (kg/cm2)	Intervalo CBR	Relacion de Poisson
S1	300	3 – 5	0.45
S2	500	5 - 7	0.45

Fuente: Elaboración propia

Propiedades de las capas que conforman el pavimento

Para referenciar la rigidez promedio que desarrollan los granulares de las capas de base y de subbase, y carpeta de rodadura se emplearon las expresiones propuestas por W. R. Barker. Esto con el fin de tener en cuenta la dependencia de los módulos del estado de esfuerzos a que están sometidos los granulares en cada una de las capas.

Granulares de la capa de base:

$$MrBG = MrSB(1 + 10.52 \log(hBG) - 2.10 \log(MrSBG) \log(hBG))$$

Donde:

- MrSR = Módulo resiliente de la subrasante
- MrSBG = Módulo resiliente de la subbase
- MrBG = Módulo resiliente de la base
- hSBG = Espesor de la capa de subbase granular
- hBG = Espesor de la capa de base granular

Este también se determina con base en el coeficiente estructural que emplea el INVIAS en su metodología, donde se debe emplear la siguiente ecuación en función del CBR:

$$a_2 = 0.032 \text{CBR}^{0.32}$$

Donde, $a_2 = 0.14$

Teniendo en cuenta la anterior expresión, y que el CBR refiere a la capacidad portante del material de base granular expresado en porcentaje, se obtiene que la base granular tiene una capacidad portante a 100%, para lo cual:

$$M_{bg} = 30527 \text{ Lb/Pulg}^2$$

$$M_{bg} = 2146 \text{ Kg/cm}^2$$

Granulares de la capa de sub-base:

$$Mr_{SBG} = Mr_S(1 + 7.18 \log(h_{SBG}) - 1.56 \log(Mr_{SR}) \log(h_{SBG}))$$

Donde:

- Mr_{SR} = Módulo resiliente de la subrasante
- Mr_{SBG} = Módulo resiliente de la subbase
- Mr_{BG} = Módulo resiliente de la base
- h_{SBG} = Espesor de la capa de subbase granular
- h_{BG} = Espesor de la capa de base granular

Este también se determina con base en el coeficiente estructural que emplea el INVIAS en su metodología, donde se debe emplear la siguiente ecuación en función del CBR:

$$a_2 = 0.058 \text{CBR}^{0.19}$$

Donde, $a_3 = 0.12$

Teniendo en cuenta la anterior expresión, y que el CBR refiere a la capacidad portante del material de base granular expresado en porcentaje, se obtiene que la base granular tiene una capacidad portante a 100%, para lo cual:

$$M_{bg} = 16783 \text{ Lb/Pulg}^2$$

$$M_{bg} = 1180 \text{ Kg/cm}^2$$

Propiedades de la carpeta asfáltica

El Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías (1), en su versión de 1998, indica en la tabla 8.1 que se puede usar un coeficiente estructural a_i de 0.30. Luego de obtener el coeficiente estructural se determina el Módulo Dinámico a $20^\circ\text{C} = 200000 \text{ psi}$ (1380 MPa), este se halla con la figura 2.5 del Manual de la AASHTO de 1993.

Ilustración 43: Modulo Dinámico Mezcla

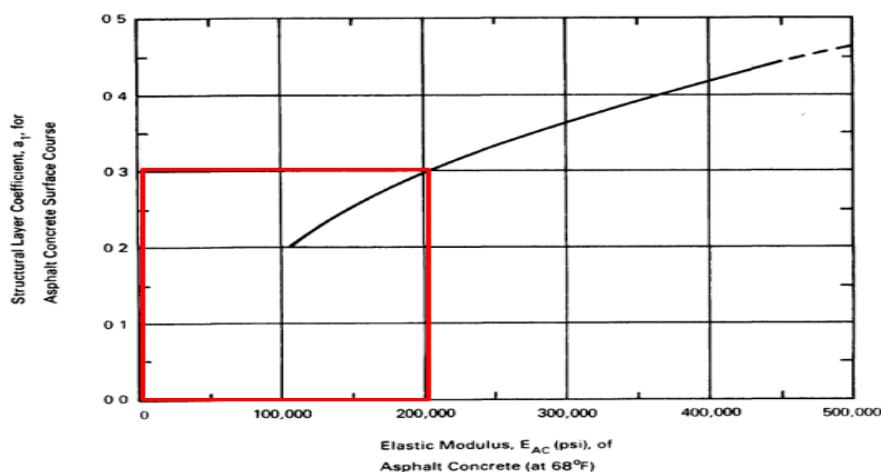


Figure 2.5. Chart for Estimating Structural Layer Coefficient of Dense-Graded Asphalt Concrete Based on the Elastic (Resilient) Modulus (3)

200,000 psi = 1380 Mpa

Fuente: figura 2.5 del Manual de la AASHTO de 1993.

Para el presente documento se puede al igual que para las anteriores estructuras, realizar un retrocálculo para determinar el modulo correspondiente a cada coeficiente, en función de la temperatura de las regiones de análisis. Esto se realiza con la siguiente expresión:

$$a1 = 0.0052E^{0.555}$$

Donde,

$$a1 = 0.3 - 0.37 - 0.44$$

E = Modulo Dinámico de la MDC en MPa

Tabla 16: Retrocálculo de Módulos para la MDC

REGIONES	MEZCLA ASFALTICA	TEMPERATURA (TMAP)	ai	MODULO (Mpa)	MODULO (Kg/Cm2)
Región 1 (R1)	MDC	< 13 °C	0.44	2971	30303
Región 2 (R2)	MDC	13 °C < 20 °C	0.37	2174	22177
Region 3 (R3)	MDC	20 °C - 30 °C	0.3	1490	15198
Región 4 (R4)	MDC	13 °C < 20 °C	0.37	2174	22177
Región 5 (R5)	MDC	20 °C - 30 °C	0.3	1490	15198
Región 6 (R6)	MDC	20 °C - 30 °C	0.3	1490	15198

Fuente: Elaboración propia basada en cartilla INVIAS

A continuación se presenta la siguiente tabla, con el resumen de los módulos y relaciones de Poisson para ingresar a los programas de modelación de esfuerzo, fatiga y Ahuellamiento:

Tabla 17: Módulos y Relación de Poisson para las estructuras de análisis

ESTRUCTURA	MODULOS R3 (Kg/Cm2)		RELACION DE POISSON
	S1	S2	
Carpeta Asfáltica	15198	15198	0.35
Mr Base granular	2146	2146	0.40
Mr Subbase granular	1180	1180	0.40
Subrasante	300	500	0.45

Fuente: Elaboración propia

MODELACIÓN CON SOFTWARES ESPECIALIZADOS

Para poder determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones de las estructuras de pavimento flexible del presente estudio, podemos hacer uso de los software Openpave, Winjulea o Pitrapave entre otros, los cuales arrojan resultados basados en la teoría elástica de capas múltiples en espacios semi – infinitos de Burmister, (1943). Este software permite realizar análisis de pavimentos a más de 30 cantidades de capas y un elevado número de posiciones de carga y resultados.

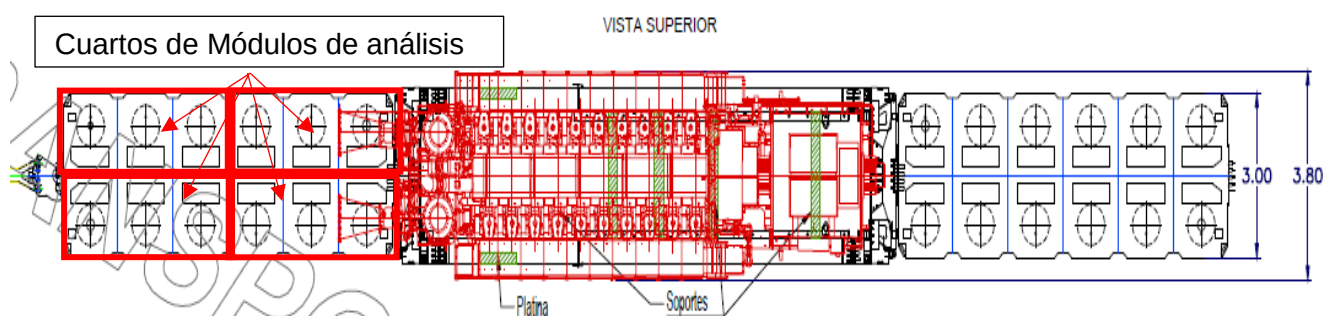
Para este estudio se realizarán análisis con las estructuras seleccionadas en las tablas 15 y 16, para el equipo modular de análisis con configuración Modular 6 Líneas – Vigas – 6 Líneas, vamos a analizar una cuarta parte del módulo, teniendo en cuenta que dichos equipos nos permiten entender que los modulares distribuyen la carga por un sistema de vasos comunicantes exactamente igual en cada eje y llanta, independientemente de la posición de la carga sobre el tráiler.

Puntos de análisis

Para el presente documento se analizarán por separado los 2 sistemas de 6 ejes (Delantero y Trasero), teniendo en cuenta la diferencia de sus cargas por rueda y línea de rotación. Para esto se adopta una presión de inflado de 110 Psi, y se ubican las cargas en un sistema cartesiano contemplando el área de contacto de las llantas ajustado a la magnitud de la carga y presión de inflado, esto con base en la separación existente entre llantas de la ilustración 3 del presente documento.

La lectura de deflexiones se realiza a 60 puntos de análisis en su configuración, suponiendo una proporción, es decir se analizarán deformaciones en las 3 primeras líneas de rotación del equipo y en la mitad de dichas líneas, también en cada uno de los puntos donde se posiciona la rueda. Como se muestra a continuación:

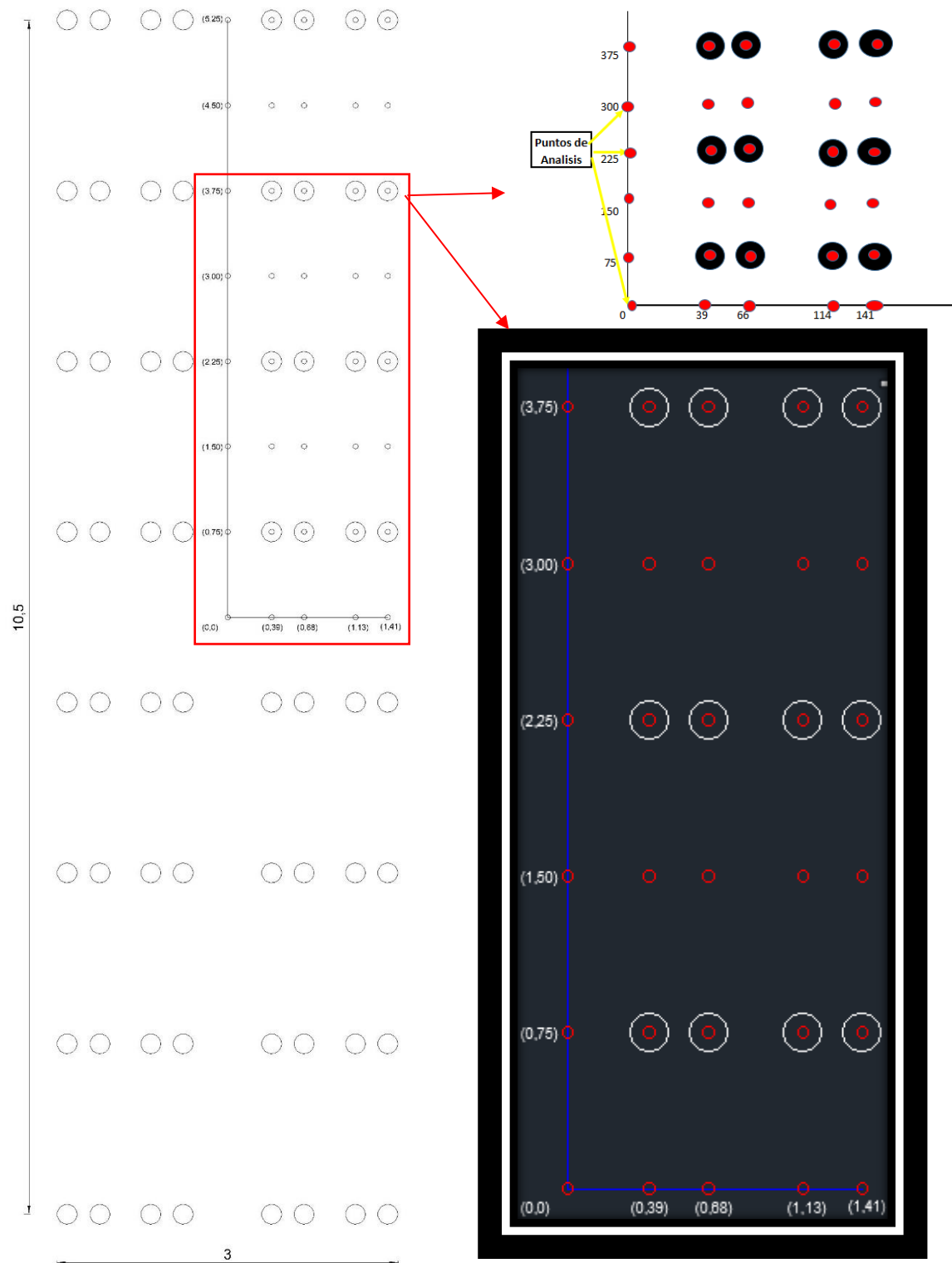
Ilustración 44: Proporción de análisis de deformaciones



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta la anterior configuración de módulos, y entendiendo que los modulares trabajan por un sistema de vasos comunicantes, se asume que analizando en un software $\frac{1}{4}$ del módulo total delantero y $\frac{1}{4}$ del módulo total trasero compuesto por 3 líneas de rotación y 12 llantas son suficientes para determinar las deformaciones que puede causar la configuración Modular 6 Líneas – Vigas – Modular 6 Líneas en la carpeta asfáltica y la subrasante. El análisis de este cuarto de modulo será proporcional al conjunto de 6 líneas de rotación. Debido a la variación de pesos de la carga se deberán realizar 2 análisis, uno para el eje delantero y sus características y otro para el eje trasero y sus características.

Ilustración 45: Puntos de Análisis en sistema cartesiano



Fuente: Elaboración propia

Profundidad de análisis

Se analizara la deformación radial o de tracción en la base de la carpeta asfáltica, es decir en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, en las profundidades z correspondientes para cada una de las estructuras del pavimentos.

$$Z_{er} = H1$$

Donde,

Z_{er} = Profundidad a la que se tomara lectura de la deformación radial o tracción.

$H1$ = Espesor de la Carpeta Asfaltica MDC

Se analizara la deformación vertical y el esfuerzo vertical a la profundidad de toda la estructura + 0.001, es decir en la fibra superior de la subrasante, en las profundidades z correspondientes para cada una de las estructuras del pavimentos.

$$Z_{ez} = H1 + H2 + H3 - 0.001$$

Donde,

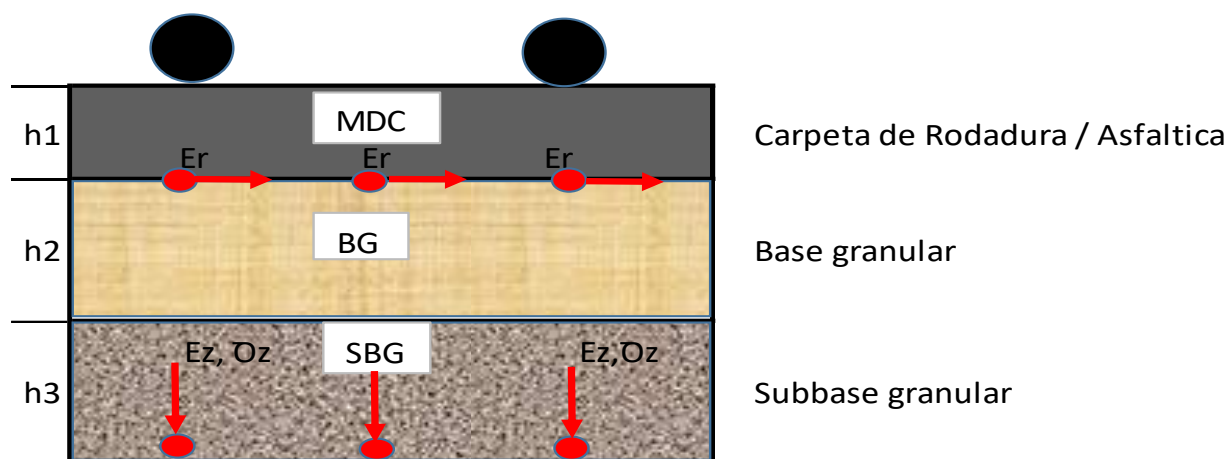
Z_{ez} = Profundidad en que se tomara lectura de la deformación y esfuerzo vertical.

$H1$ = Espesor de la Carpeta Asfaltica MDC

$H2$ = Espesor de la Base Granular

$H3$ = Espesor de la Subbase Granular

Ilustración 46: Profundidades de Análisis



Fuente: Elaboración propia

Leyes de Fatiga y Ahuellamiento

Después de obtener los resultados de las deformaciones E_t máximas y E_v máximas para cada eje, de cada uno de los sistemas de ejes del equipo especial de análisis, se aplican las ecuaciones de leyes de fatiga y de Ahuellamiento para determinar el número de repeticiones admisibles por cada eje para los 2 criterios de falla. Este número de repeticiones admisibles se debe comparar con el del eje equivalente de 80 KN bajo el mismo criterio de falla y así poder determinar los EALF de cada uno de los ejes.

Fatiga: Las leyes de fatiga nos ayudan a determinar el número de repeticiones admisibles de los ejes de análisis que puede soportar una estructura de pavimento antes de fallar por figuración en la carpeta asfáltica o por Ahuellamiento en la subrasante. Para trabajar el presente estudio, se trabajó con el modelo propuesto por el instituto del asfalto (1982) de los Estados Unidos, el cual tiene en consideración un criterio de falla por el 20% de la superficie del pavimento fisurada. Es importante entender que la fatiga se controla limitando la deformación por tracción (E_t) en la fibra inferior de las capas asfálticas o carpeta de rodadura.

Las leyes de fatiga para determinar el impacto que ocasiona la carga extrapesada en un pavimento son:

$$Nf = 0.0796 (\epsilon t)^{-3.291} (ECA)^{-0.854}$$

Donde:

Nf = Número admisible de repeticiones de carga para causar el agrietamiento por fatiga

Et = Deformación unitaria por tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica

ECA= Módulo dinámico de la mezcla asfáltica, en psi

Ahuellamiento: Para trabajar el presente estudio, se trabajó con el modelo propuesto por el instituto del asfalto (1982) de los Estados Unidos, el cual tiene en consideración un criterio de falla una deformación permanente de 13 mm., Expresándolo en la siguiente ecuación:

$$Na = 1.365 \cdot 10^{-9} (\epsilon z)^{-4.477}$$

Donde:

Na = Número admisible de repeticiones de carga para el control de Ahuellamiento

ϵz = Deformación unitaria de compresión

Resultados de Análisis PitraPave

En el presente se realizan análisis con el software PitraPave, ejecutando y alimentando el programa con datos referentes a:

- Capas
- Cargas
- Puntos de Análisis

Para estos análisis se contempla que el efecto sobre el pavimento del cabezote o unidad tractora no es crítico, debido a que es un vehículo de arrastre, sin una sobrecarga que ejerza presión sobre sus ejes.

Este software nos permite leer deformaciones, deflexiones y esfuerzos en los puntos de análisis, vamos a concentrarnos en la lectura de deformaciones E_{yy} y E_{zz} , que son los datos que necesitamos para realizar cálculos de EALF y de FDV, obteniendo el cálculo de deformaciones, se puede determinar el número de repeticiones admisibles de cada configuración.

La modelación que se realizara para el presente documento será para los parámetros anteriormente identificados de la vía como un tránsito T7 - Región 3 -S1 y para tránsito T7 - Región 3 -S2, que hacen referencia a la región y tránsito de Cauca a la Apartada.

Después se realizara un análisis comparativo para determinar la figuración u deformación radial en la última fibra de la carpeta asfáltica y Ahuellamiento en la subrasante o esfuerzo vertical sobre la subrasante para las regiones, categorías de subrasante, tránsitos y configuraciones de equipo y cargas mencionadas anteriormente.

Análisis para estructura 1 T7-R3-S1

Para realizar la modelación con PITRAPAVE en la estructura (T7-R3-S1) escogida se deben tener en cuenta los siguientes parámetros identificados anteriormente:

Tabla 18: Datos para modelación Estructura 1 eje modular delantero y trasero

TRANSITO 7 - REGION 3 - S1						
DESCRIPCION CAPA	RELACION DE POISSON	MODULO E (kg/cm ²)	MODULO E (Pa)	ESPESOR (Mts)	PROFUNDIDAD Z PARA (Et)	PROFUNDIDAD Z PARA (Ev)
Capa 1 (Carpeta Asfáltica)	0.35	15198	1.5.E+09	0.15	0.149	1.001
Capa 2 (Base Granular)	0.4	2146	2.1.E+08	0.35		
Capa 3 (Subbase Granular)	0.4	1180	1.2.E+08	0.50		
Capa 4 (Subrasante)	0.45	300	2.9.E+07			

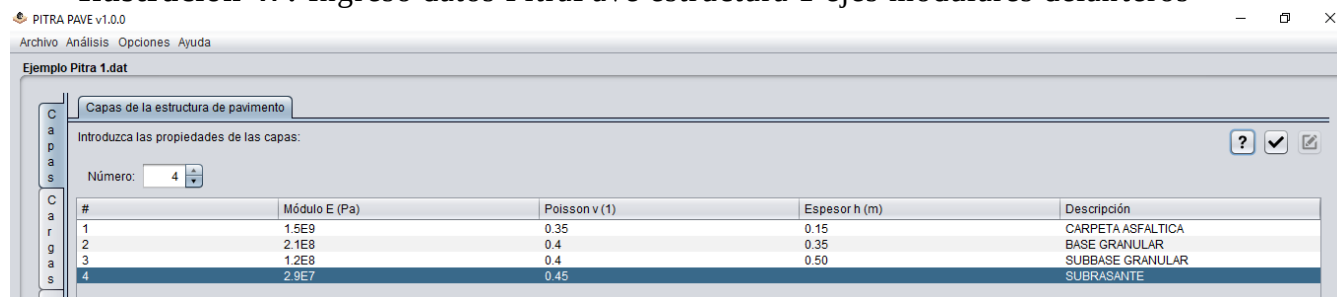
Fuente: Elaboración propia

Tabla 19: Pesos y área en ejes y llantas estructura 1 ejes modulares delanteros

Tipos de Ejes	Cantidad de Ruedas por Eje	Carga (Ton)	Carga por Rueda (Ton)	Carga por Rueda (Newton)	PRESION (PSI)	PRESION (PA)	PRESION (MPA)	Area en (mm ²)	Area en (mm)	3*Area en (mm)	3A/2 (mm)
Eje Simple Rueda Simple	2	6	3	29421	80	551581	0.55159	53339	130	391	195
Eje de 8,2 Toneladas	4	8.2	2.05	20104	80	551581	0.55159	36448	108	323	162
Eje simple Rueda Doble	4	11	2.75	26969	80	551581	0.55159	48894	125	374	187
Eje Tandem	8	22	2.75	26969	80	551581	0.55159	48894	125	374	187
Eje Tridem	12	24	2	19614	80	551581	0.55159	35559	106	319	160
Eje Modular	8	18.55	2.32	22740	110	758424	0.75843	29983	98	293	147

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 47: Ingreso datos PitraPave estructura 1 ejes modulares delanteros



PITRA PAVE v1.0.0 Archivo Análisis Opciones Ayuda

Ejemplo Pitra 1.dat

Cargas sobre el pavimento

Introduzca las propiedades de las cargas circulares:

Número: 24

#	Carga P (N)	Presión q (Pa)	X (m)	Y (m)
1	22740	758424	0.39	0.75
2	22740	758424	0.39	2.25
3	22740	758424	0.39	3.75
4	22740	758424	0.675	0.75
5	22740	758424	0.675	2.25
6	22740	758424	0.675	3.75
7	22740	758424	1.1125	0.75
8	22740	758424	1.1125	2.25
9	22740	758424	1.1125	3.75
10	22740	758424	1.41	0.75
11	22740	758424	1.41	2.25
12	22740	758424	1.41	3.75
13	22740	758424	0.39	-0.75
14	22740	758424	0.39	-2.25
15	22740	758424	0.39	-3.75
16	22740	758424	0.675	-0.75
17	22740	758424	0.675	-2.25
18	22740	758424	0.675	-3.75
19	22740	758424	1.1125	-0.75
20	22740	758424	1.1125	-2.25
21	22740	758424	1.1125	-3.75
22	22740	758424	1.41	-0.75
23	22740	758424	1.41	-2.25
24	22740	758424	1.41	-3.75

Fuente: Pantallazos Pitrapave

Ilustración 48: Resultados deformaciones T7R3S1 ejes modulares delanteros

PITRA PAVE v1.0.0 Archivo Análisis Opciones Ayuda

Ejemplo Pitra 1.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	2.6501e-05	2.8296e-05	-2.9118e-05	-1.7999e-21	-2.3398e-05	2.2863e-21
2	1.5234e-05	6.0265e-05	-3.9957e-05	6.2469e-21	-1.8422e-05	6.4586e-21
3	1.3837e-05	7.1221e-05	-4.5064e-05	3.5840e-20	-8.1523e-06	3.2492e-21
4	1.4028e-05	7.0577e-05	-4.4823e-05	5.9822e-21	8.8823e-06	7.3983e-21
5	1.5625e-05	5.9463e-05	-3.9743e-05	7.6542e-21	1.8547e-05	-2.8124e-21
6	8.7742e-05	-3.1794e-05	-2.5380e-05	1.1018e-06	-4.8980e-05	-7.6504e-08
7	-1.5808e-04	-3.0988e-04	3.2351e-04	6.5176e-07	-5.8667e-05	-6.8789e-08
8	-1.2324e-04	-3.3211e-04	3.1917e-04	2.8378e-07	1.2389e-05	-6.5490e-08
9	-1.2130e-04	-3.3101e-04	3.1715e-04	-3.0510e-07	8.5385e-06	-6.5613e-08
10	-1.5854e-04	-3.0460e-04	3.1999e-04	-6.5965e-07	5.6179e-05	-6.8896e-08
11	2.5684e-05	2.8725e-05	-2.8918e-05	2.3900e-06	-2.3347e-05	1.8090e-08
12	1.4285e-05	6.0773e-05	-3.9728e-05	1.4205e-06	-1.8388e-05	5.5875e-08
13	1.2833e-05	7.1761e-05	-4.4823e-05	6.1963e-07	-8.1370e-06	7.1908e-08
14	1.3026e-05	7.1117e-05	-4.4583e-05	-6.6618e-07	8.8659e-06	7.1312e-08
15	1.4678e-05	5.9970e-05	-3.9515e-05	-1.4376e-06	1.8513e-05	5.5357e-08
16	8.6007e-05	-3.1389e-05	-2.4686e-05	3.9972e-06	-4.8750e-05	5.9642e-07
17	-1.6013e-04	-3.0935e-04	3.2430e-04	2.3908e-06	-5.8516e-05	7.4440e-07
18	-1.2542e-04	-3.3152e-04	3.2000e-04	1.0454e-06	1.2457e-05	8.0786e-07
19	-1.2347e-04	-3.3042e-04	3.1798e-04	-1.1240e-06	8.4646e-06	8.0547e-07
20	-1.6059e-04	-3.0407e-04	3.2078e-04	-2.4196e-06	5.6026e-05	7.4233e-07
21	2.2871e-05	2.7806e-05	-2.6960e-05	5.7006e-06	-2.2487e-05	2.3303e-06
22	1.0916e-05	5.9831e-05	-3.7465e-05	3.3996e-06	-1.7807e-05	2.8648e-06
23	9.2336e-06	7.0801e-05	-4.2429e-05	1.4842e-06	-7.8705e-06	3.1007e-06
24	9.4347e-06	7.0157e-05	-4.2194e-05	-1.5955e-06	8.5791e-06	3.0916e-06
25	1.1316e-05	5.9028e-05	-3.7256e-05	-3.4408e-06	1.7924e-05	2.8569e-06
26	8.1975e-05	-3.6671e-05	-1.9770e-05	5.3367e-06	-4.5739e-05	6.4931e-06
27	-1.6466e-04	-3.1603e-04	3.3023e-04	2.7123e-06	-5.6363e-05	8.4077e-06
28	-1.3012e-04	-3.3889e-04	3.2639e-04	1.1096e-06	1.3463e-05	9.2941e-06
29	-1.2817e-04	-3.3775e-04	3.2434e-04	-1.1859e-06	7.3816e-06	9.2577e-06
30	-1.6512e-04	-3.1072e-04	3.2669e-04	-2.7536e-06	5.3851e-05	8.3760e-06
31	-1.5861e-04	-1.6939e-05	2.6138e-04	4.7434e-20	-5.0788e-04	-1.8635e-20
32	-2.7340e-04	-9.3001e-07	3.7235e-04	3.3034e-20	-3.6531e-04	1.4560e-20

PITRA PAVE v1.0.0 Archivo Análisis Opciones Ayuda

Ejemplo Pitra 1.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
29	-1.2317e-04	-3.3377e-04	-3.2334e-04	-1.1829e-06	-7.5318e-06	-3.2377e-06
30	-1.6512e-04	-3.1072e-04	3.2669e-04	-2.7536e-06	5.3851e-05	8.3760e-06
31	-1.5861e-04	-1.6939e-05	2.6138e-04	4.7434e-20	-5.0788e-04	-1.8635e-20
32	-2.7340e-04	-9.3001e-07	3.7235e-04	3.3034e-20	-3.6531e-04	1.4569e-19
33	-3.2835e-04	7.0009e-06	4.2482e-04	1.0588e-19	-1.6930e-04	4.0658e-20
34	-3.2580e-04	6.5958e-06	4.2245e-04	8.3009e-20	1.8276e-04	-1.3553e-20
35	-2.7111e-04	-1.3008e-06	3.7024e-04	7.0422e-20	3.6879e-04	-1.5416e-19
36	-1.5363e-04	-6.4802e-05	3.0525e-04	-7.6028e-06	-5.5530e-04	1.8849e-05
37	-2.7560e-04	-8.1819e-05	4.5980e-04	-4.5422e-06	-4.0925e-04	1.9969e-05
38	-3.3363e-04	-9.1515e-05	5.3373e-04	-1.9852e-06	-1.8706e-04	2.0420e-05
39	-3.3083e-04	-9.1042e-05	5.3018e-04	2.1344e-06	2.0236e-04	2.0404e-05
40	-2.7384e-04	-8.2221e-05	4.5843e-04	4.5969e-06	4.1261e-04	1.9955e-05
41	-1.5305e-04	-2.5503e-05	2.6187e-04	-1.7703e-05	-5.0201e-04	4.4083e-05
42	-2.6669e-04	-1.0608e-05	3.7265e-04	-1.0669e-05	-3.6172e-04	4.7076e-05
43	-3.2115e-04	-3.1414e-06	4.2503e-04	-4.6792e-06	-1.6772e-04	4.8293e-05
44	-3.1862e-04	-3.5294e-06	4.2267e-04	5.0311e-06	1.8106e-04	4.8249e-05
45	-2.6442e-04	-1.0964e-05	3.7054e-04	1.0797e-05	3.6516e-04	4.7037e-05
46	-1.4111e-04	-8.1028e-05	3.0320e-04	-3.3778e-05	-5.3963e-04	8.3664e-05
47	-2.5995e-04	-1.0075e-04	4.5694e-04	-2.0702e-05	-3.9954e-04	9.0670e-05
48	-3.1665e-04	-1.1160e-04	5.3052e-04	-9.1401e-06	-1.8275e-04	9.3567e-05
49	-3.1389e-04	-1.1109e-04	5.2699e-04	9.8284e-06	1.9773e-04	9.3461e-05
50	-2.5824e-04	-1.0112e-04	4.5558e-04	2.0948e-05	4.0279e-04	9.0578e-05
51	-1.3077e-04	-4.5382e-05	2.4897e-04	-6.1570e-05	-4.6545e-04	1.4826e-04
52	-2.3682e-04	-3.5963e-05	3.5676e-04	-3.8886e-05	-3.3838e-04	1.6488e-04
53	-2.8791e-04	-3.0938e-05	4.0785e-04	-1.7374e-05	-1.5725e-04	1.7196e-04
54	-2.8550e-04	-3.1231e-05	4.0553e-04	1.8688e-05	1.6980e-04	1.7170e-04
55	-2.3466e-04	-3.6236e-05	3.5469e-04	3.9338e-05	3.4155e-04	1.6465e-04
56	-1.0598e-04	-9.0014e-05	2.5941e-04	-1.0973e-04	-4.5334e-04	2.4979e-04
57	-2.0575e-04	-1.1949e-04	4.0185e-04	-7.3104e-05	-3.4134e-04	2.9213e-04
58	-2.5347e-04	-1.3506e-04	4.7032e-04	-3.3327e-05	-1.5611e-04	3.1115e-04
59	-2.5108e-04	-1.3434e-04	4.6700e-04	3.5876e-05	1.6905e-04	3.1039e-04
60	-2.0436e-04	-1.1968e-04	4.0067e-04	7.3907e-05	3.4396e-04	2.9147e-04

Fuente: Pantallazos Pitrapave

Tabla 20: Pesos y área en ejes y llantas estructura 1 ejes modulares traseros

Tipos de Ejes	Cantidad de Ruedas por Eje	Carga (Ton)	Carga por Rueda (Ton)	Carga por Rueda (Newton)	PRESION (PSI)	PRESION (PA)	PRESION (MPA)	Area en (mm2)	Area en (mm)	3*Area en (mm)	3A/2 (mm)
Eje Simple Rueda Simple	2	6	3	29421	80	551581	0.55159	53339	130	391	195
Eje de 8,2 Toneladas	4	8.2	2.05	20104	80	551581	0.55159	36448	108	323	162
Eje simple Rueda Doble	4	11	2.75	26969	80	551581	0.55159	48894	125	374	187
Eje Tandem	8	22	2.75	26969	80	551581	0.55159	48894	125	374	187
Eje Tridem	12	24	2	19614	80	551581	0.55159	35559	106	319	160
Eje Modular	8	17.55	2.19	21514	110	758424	0.75843	28366	95	285	143

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 49: Ingreso datos PitraPave estructura 1 ejes modulares traseros

PITRA PAVE v1.0.0 Archivo Análisis Opciones Ayuda

Ejemplo Pitra 1.dat

Capas de la estructura de pavimento

Introduzca las propiedades de las capas:

Número: 4

#	Módulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor h (m)	Descripción
1	1.5E9	0.35	0.15	CARPETA ASFALTICA
2	2.1E8	0.4	0.35	BASE GRANULAR
3	1.2E8	0.4	0.50	SUBBASE GRANULAR
4	2.9E7	0.45		SUBRASANTE

PITRA PAVE v1.0.0

Archivo Análisis Opciones Ayuda

Ejemplo Pitra 1.dat

Cargas sobre el pavimento

Introduzca las propiedades de las cargas circulares:

Número: 24

#	Carga P (N)	Presión q (Pa)	X (m)	Y (m)
1	22740	758424	0.39	0.75
2	22740	758424	0.39	2.25
3	22740	758424	0.39	3.75
4	22740	758424	0.675	0.75
5	22740	758424	0.675	2.25
6	22740	758424	0.675	3.75
7	22740	758424	1.1125	0.75
8	22740	758424	1.1125	2.25
9	22740	758424	1.1125	3.75
10	22740	758424	1.41	0.75
11	22740	758424	1.41	2.25
12	22740	758424	1.41	3.75
13	22740	758424	0.39	-0.75
14	22740	758424	0.39	-2.25
15	22740	758424	0.39	-3.75
16	22740	758424	0.675	-0.75
17	22740	758424	0.675	-2.25
18	22740	758424	0.675	-3.75
19	22740	758424	1.1125	-0.75
20	22740	758424	1.1125	-2.25
21	22740	758424	1.1125	-3.75
22	22740	758424	1.41	-0.75
23	22740	758424	1.41	-2.25
24	22740	758424	1.41	-3.75

Fuente: Pantallazos Pitrapave

Ilustración 50: Resultados deformaciones T7R3S1 Ejes Modulares Traseros

PITRA PAVE v1.0.0

Archivo Análisis Opciones Ayuda

Modulos Delanteros T7-R3-S1.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	2.5071e-05	2.6764e-05	-2.7545e-05	2.6470e-21	-2.2135e-05	4.9929e-21
2	1.4417e-05	5.7003e-05	-3.7801e-05	1.5882e-21	-1.7427e-05	-3.1234e-21
3	1.3096e-05	6.7365e-05	-4.2631e-05	2.6046e-20	-7.7120e-06	2.4286e-21
4	1.3276e-05	6.6756e-05	-4.2404e-05	5.2410e-21	8.4025e-06	2.0117e-21
5	1.4786e-05	5.6244e-05	-3.7598e-05	6.2980e-21	1.7545e-05	-4.7050e-21
6	8.3096e-05	-3.0102e-05	-2.4057e-05	1.0424e-06	-4.6326e-05	-7.2396e-08
7	-1.5374e-04	-2.9775e-04	3.1156e-04	6.1663e-07	-5.5502e-05	-5.5098e-08
8	-1.2055e-04	-3.1861e-04	3.0724e-04	2.6849e-07	1.1897e-05	-6.1978e-08
9	-1.1857e-04	-3.1764e-04	3.0526e-04	-2.885e-07	8.7015e-06	-5.2094e-08
10	-1.5421e-04	-2.9272e-04	3.0823e-04	-6.2409e-07	5.3145e-05	-6.5199e-08
11	2.4298e-05	2.7170e-05	-2.7355e-05	2.2612e-06	-2.2086e-05	1.7070e-08
12	1.3519e-05	5.7484e-05	-3.7585e-05	1.3439e-06	-1.7395e-05	5.2814e-08
13	1.2146e-05	6.7877e-05	-4.2404e-05	5.8624e-07	-7.6975e-06	6.7981e-08
14	1.2329e-05	6.7267e-05	-4.2177e-05	-6.3028e-07	8.3870e-06	6.7416e-08
15	1.3890e-05	5.6724e-05	-3.7382e-05	-1.3601e-06	1.7513e-05	5.2323e-08
16	8.1454e-05	-2.9719e-05	-2.3400e-05	3.7818e-06	-4.6109e-05	5.6416e-07
17	-1.5567e-04	-2.9724e-04	3.1231e-04	2.2620e-06	-5.5358e-05	7.0415e-07
18	-1.2261e-04	-3.1805e-04	3.0803e-04	9.8912e-07	1.1962e-05	7.6418e-07
19	-1.2063e-04	-3.1709e-04	3.0604e-04	-1.0634e-06	8.6317e-06	7.6193e-07
20	-1.5614e-04	-2.9222e-04	3.0898e-04	-2.2892e-06	5.3000e-05	7.0219e-07
21	2.1637e-05	2.6301e-05	-2.5504e-05	5.3936e-06	-2.1272e-05	2.2045e-06
22	1.0331e-05	5.6593e-05	-3.5444e-05	3.2166e-06	-1.6845e-05	2.7101e-06
23	8.7408e-06	6.6968e-05	-4.0140e-05	1.4042e-06	-7.4454e-06	2.9333e-06
24	8.9309e-06	6.6360e-05	-3.9917e-05	-1.5096e-06	8.1156e-06	2.9247e-06
25	1.0709e-05	5.5834e-05	-3.5245e-05	-3.2556e-06	1.6956e-05	2.7027e-06
26	7.7640e-05	-3.4715e-05	-1.8750e-05	5.0502e-06	-4.3260e-05	6.1426e-06
27	-1.5996e-04	-3.0356e-04	3.1792e-04	2.5670e-06	-5.3322e-05	7.9540e-06
28	-1.2706e-04	-3.2502e-04	3.1406e-04	1.0502e-06	1.2913e-05	8.7925e-06
29	-1.2507e-04	-3.2403e-04	3.1206e-04	-1.1224e-06	7.6071e-06	8.7581e-06
30	-1.6043e-04	-2.9851e-04	3.1458e-04	-2.6060e-06	5.0942e-05	7.9239e-06
31	-1.5005e-04	-1.6002e-05	2.4726e-04	6.0986e-20	-4.8053e-04	7.6233e-21
32	-2.5867e-04	-8.2880e-07	3.5224e-04	2.5835e-20	-3.4565e-04	3.2187e-20

PITRA PAVE v1.0.0

Archivo Análisis Opciones Ayuda

Modulos Delanteros T7-R3-S1.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
29	-1,2507e-04	-3,2403e-04	3,1206e-04	-1,1224e-06	7,6071e-06	8,7581e-06
30	-1,6043e-04	-2,9851e-04	3,1458e-04	-2,6060e-06	5,0942e-05	7,9239e-06
31	-1,5005e-04	-1,6002e-05	2,4726e-04	6,0986e-20	-4,8053e-04	7,6233e-21
32	-2,5867e-04	-8,2880e-07	3,5224e-04	2,5835e-20	-3,4565e-04	3,2187e-20
33	-3,1067e-04	6,6809e-06	4,0189e-04	1,1223e-19	-1,6018e-04	3,7269e-20
34	-3,0826e-04	6,2970e-06	3,9965e-04	7,7927e-20	1,7292e-04	1,5247e-20
35	-2,5651e-04	-1,1793e-06	3,5024e-04	5,6712e-20	3,4894e-04	-1,2367e-19
36	-1,4520e-04	-6,1202e-05	2,8865e-04	-7,1929e-06	-5,2530e-04	1,7833e-05
37	-2,6082e-04	-7,7513e-05	4,3536e-04	-4,2973e-06	-3,8726e-04	1,8892e-05
38	-3,1669e-04	-8,7632e-05	5,0739e-04	-1,8782e-06	-1,7714e-04	1,9318e-05
39	-3,1310e-04	-8,6268e-05	5,0201e-04	2,0193e-06	1,9151e-04	1,9303e-05
40	-2,5928e-04	-7,8015e-05	4,3428e-04	4,3490e-06	3,9048e-04	1,8878e-05
41	-1,4479e-04	-2,4105e-05	2,4772e-04	-1,6748e-05	-4,7498e-04	4,1705e-05
42	-2,5232e-04	-9,9854e-06	3,5252e-04	-1,0094e-05	-3,4226e-04	4,4537e-05
43	-3,0386e-04	-2,9149e-06	4,0209e-04	-4,4270e-06	-1,5869e-04	4,5689e-05
44	-3,0147e-04	-3,2826e-06	3,9985e-04	4,7599e-06	1,7131e-04	4,5646e-05
45	-2,5017e-04	-1,0322e-05	3,5052e-04	1,0215e-05	3,4550e-04	4,4500e-05
46	-1,3336e-04	-7,6554e-05	2,8671e-04	-3,1958e-05	-5,1048e-04	7,9151e-05
47	-2,4602e-04	-9,5428e-05	4,3265e-04	-1,9587e-05	-3,7807e-04	9,5780e-05
48	-3,0062e-04	-1,0664e-04	5,0436e-04	-8,6474e-06	-1,7307e-04	8,8521e-05
49	-2,9708e-04	-1,0523e-04	4,9899e-04	9,2987e-06	1,8713e-04	8,8420e-05
50	-2,4452e-04	-9,5894e-05	4,3159e-04	1,9819e-05	3,8119e-04	8,5892e-05
51	-1,2372e-04	-4,2914e-05	2,3552e-04	-5,8252e-05	-4,4039e-04	1,4026e-04
52	-2,2406e-04	-3,3975e-05	3,3749e-04	-3,6790e-05	-3,2018e-04	1,5599e-04
53	-2,7241e-04	-2,9215e-05	3,8583e-04	-1,6438e-05	-1,4878e-04	1,6269e-04
54	-2,7013e-04	-2,9493e-05	3,8364e-04	1,7681e-05	1,6066e-04	1,6244e-04
55	-2,2202e-04	-3,4233e-05	3,3553e-04	3,7218e-05	3,2317e-04	1,5577e-04
56	-1,0010e-04	-8,5060e-05	2,4528e-04	-1,0382e-04	-4,2884e-04	2,3632e-04
57	-1,9474e-04	-1,1316e-04	3,8055e-04	-6,9168e-05	-3,2301e-04	2,7638e-04
58	-2,4084e-04	-1,2884e-04	4,4741e-04	-3,1532e-05	-1,4786e-04	2,9437e-04
59	-2,3766e-04	-1,2724e-04	4,4223e-04	3,3944e-05	1,6000e-04	2,9365e-04
60	-1,9355e-04	-1,1346e-04	3,7965e-04	6,9928e-05	3,2553e-04	2,7576e-04

Fuente: Pantallazos Pitrapave

Para comparar las deformaciones por eje de las líneas de rotación de los equipos especiales modulares, se debe también modelar el eje estándar rueda doble de 80KN en las estructuras de pavimentos identificadas, para después de tener valores de ambos tipos de ejes, hallar los números de repeticiones admisibles por fatiga y Ahuellamiento.

Ilustración 51: Datos y Resultados Pitrapave eje estándar rueda doble de 8.2 Ton

PITRA PAVE v1.0.0

Archivo Análisis Opciones Ayuda

Ejemplo Pitra 1.dat

Capas de la estructura de pavimento

Introduzca las propiedades de las capas:

Número: 4

#	Módulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor h (m)	Descripción
1	1.5E9	0.35	0.15	CARPETA ASFALTICA
2	2.1E8	0.4	0.35	BASE GRANULAR
3	1.2E8	0.4	0.50	SUBBASE GRANULAR
4	2.9E7	0.45		SUBRASANTE

PITRA PAVE v1.0.0

Archivo Análisis Opciones Ayuda

1. Eje Estandar de 8.2 Ton T7-R3-S1.dat

Cargas sobre el pavimento

Introduzca las propiedades de las cargas circulares:

Número: 2

#	Carga P (N)	Presión q (Pa)	X (m)	Y (m)
1	20104.0	551581.0	0.0	0.0
2	20104.0	551581.0	0.323	0.0

PITRA PAVE v1.0.0

Archivo Análisis Opciones Ayuda

1. Eje Estandar de 8.2 Ton T7-R3-S1.dat

Puntos de medición en el pavimento

Introduzca las propiedades de los puntos:

Número: 6

#	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #
1	0.0	0.0	0.149	1
2	0.162	0.0	0.149	1
3	0.323	0.0	0.149	1
4	0.0	0.0	1.001	4
5	0.162	0.0	1.001	4
6	0.323	0.0	1.001	4

PITRA PAVE v1.0.0

Archivo Análisis Opciones Ayuda

1. Eje Estandar de 8.2 Ton T7-R3-S1.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1.6173e-04	-2.4966e-04	2.7940e-04	-2.1536e-20	-3.0040e-05	3.6789e-21
2	-1.2034e-05	-2.4283e-04	1.8419e-04	-2.8220e-20	-2.0285e-07	7.6778e-21
3	-1.6173e-04	-2.4966e-04	2.7940e-04	0.0000e+00	3.0040e-05	0.0000e+00
4	-9.4276e-05	-1.0375e-04	2.2248e-04	-2.3199e-21	-7.3795e-05	9.0373e-21
5	-9.8456e-05	-1.0386e-04	2.2881e-04	-6.5806e-22	2.3077e-07	5.0097e-21
6	-9.4276e-05	-1.0375e-04	2.2248e-04	0.0000e+00	7.3795e-05	0.0000e+00

Fuente: Pantallazos Pitrapave

Análisis para estructura 2 T7-R3-S2

Para realizar la modelación con PITRAPAVE en la estructura (T7-R3-S2) escogida se deben tener en cuenta los siguientes parámetros identificados anteriormente:

Tabla 21: Datos para modelación Estructura 2 ejes modular delanteros y traseros

TRANSITO 7 - REGION 3 - S2						
DESCRIPCION CAPA	RELACION DE POISSON	MODULO E (kg/cm2)	MODULO E (Pa)	ESPESOR (Mts)	PROFUNDIDAD Z PARA (Et)	PROFUNDIDAD Z PARA (Ev)
Capa 1 (Carpeta Asfáltica)	0.35	15198	1.5.E+09	0.12	0.119	0.871
Capa 2 (Base Granular)	0.4	2146	2.1.E+08	0.30		
Capa 3 (Subbase Granular)	0.4	1180	1.2.E+08	0.45		
Capa 4 (Subrasante)	0.45	500	4.9.E+07			

Fuente: Elaboración propia

Los pesos y áreas para ingresar al programa en la modelación de la estructura 2, son los mismos que se citaron en las tablas 17 y 18 (Ejes delanteros y traseros), debido a que para esta nueva modelación el equipo sigue siendo el mismo y solo cambian las propiedades de la estructura de pavimento, a continuación y debido a que para la estructura 1 se ilustro la forma de ingresar los datos al software, para la siguiente modelación solo se citan las ilustraciones con los resultados de las deformaciones para la estructura 2, en cada uno de los ejes analizados.

Ilustración 52: Datos y Resultados Pitrapave eje estándar rueda doble de 8.2 Ton estructura T7-R3-S2

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-2.0372e-04	-3.0341e-04	3.4886e-04	-2.4416e-20	-3.1776e-05	3.8914e-21
2	4.3528e-05	-2.8132e-04	1.8252e-04	-3.9750e-20	-4.0522e-07	9.8727e-21
3	-2.0372e-04	-3.0341e-04	3.4886e-04	0.0000e+00	3.1776e-05	0.0000e+00
4	-9.5516e-05	-1.0905e-04	2.2894e-04	-3.3141e-21	-8.9239e-05	1.0929e-20
5	-1.0234e-04	-1.1048e-04	2.3814e-04	-9.9146e-22	2.8733e-07	6.4657e-21
6	-9.5516e-05	-1.0905e-04	2.2894e-04	0.0000e+00	8.9239e-05	0.0000e+00

Fuente: Pantallazos Pitrapave

Ilustración 53: Resultados deformaciones T7R3S2 ejes modulares delanteros

PITRA PAVE v1.0.0
Archivo Análisis Opciones Ayuda

Modulos Delanteros T7-R3-S2.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	2.1688e-05	2.0727e-05	-2.2552e-05	-9.5291e-22	-1.5520e-05	3.2922e-21
2	1.7164e-05	4.6174e-05	-3.3728e-05	3.7587e-21	-1.2876e-05	3.7951e-21
3	1.8270e-05	5.4388e-05	-3.8734e-05	2.4882e-20	-5.6312e-06	2.5808e-22
4	1.8305e-05	5.3904e-05	-3.8492e-05	2.7529e-21	6.1605e-06	2.7198e-21
5	1.7377e-05	4.5532e-05	-3.3498e-05	6.9572e-21	1.2946e-05	-6.1211e-21
6	8.7479e-05	-2.9422e-05	2.7887e-05	8.0014e-07	-4.1552e-05	-1.0318e-07
7	-2.1888e-04	-3.8841e-04	4.2122e-04	4.7540e-07	-5.7335e-05	-1.0669e-07
8	-1.7731e-04	-4.0771e-04	4.1061e-04	2.0735e-07	2.1684e-05	-1.0803e-07
9	-1.7323e-04	-4.0665e-04	4.0733e-04	-2.2293e-07	9.1251e-06	-1.0799e-07
10	-2.2134e-04	-3.8250e-04	4.1830e-04	-4.8114e-07	5.4138e-05	-1.0665e-07
11	2.1097e-05	2.1317e-05	-2.2553e-05	1.8146e-06	-1.5533e-05	-1.7622e-07
12	1.6465e-05	4.6859e-05	-3.3721e-05	1.0866e-06	-1.2883e-05	-1.7719e-07
13	1.7524e-05	5.5112e-05	-3.8724e-05	4.7536e-07	-5.6341e-06	-1.7726e-07
14	1.7562e-05	5.4626e-05	-3.8482e-05	-5.1109e-07	6.1636e-06	-1.7727e-07
15	1.6679e-05	4.6215e-05	-3.3491e-05	-1.0996e-06	1.2953e-05	-1.7719e-07
16	8.6177e-05	-2.8421e-05	2.7730e-05	3.2970e-06	-4.1536e-05	-9.6536e-08
17	-2.2047e-04	-3.8721e-04	4.2141e-04	2.0005e-06	-5.7321e-05	-6.1860e-08
18	-1.7901e-04	-4.0642e-04	4.1083e-04	8.7975e-07	2.1691e-05	-4.6028e-08
19	-1.7493e-04	-4.0537e-04	4.0754e-04	-9.4594e-07	9.1173e-06	-4.6649e-08
20	-2.2292e-04	-3.8130e-04	4.1850e-04	-2.0244e-06	5.4124e-05	-6.2399e-08
21	1.8858e-05	2.1932e-05	-2.1701e-05	5.4166e-06	-1.5276e-05	5.6081e-07
22	1.3612e-05	4.7722e-05	-3.2677e-05	3.3360e-06	-1.2695e-05	7.9336e-07
23	1.4406e-05	5.6080e-05	-3.7595e-05	1.4756e-06	-5.5455e-06	8.9963e-07
24	1.4453e-05	5.5590e-05	-3.7356e-05	-1.5867e-06	6.0682e-06	8.9541e-07
25	1.3835e-05	4.7075e-05	-3.2450e-05	-3.3755e-06	1.2763e-05	7.8969e-07
26	8.2733e-05	-3.0920e-05	2.4598e-05	7.0279e-06	-4.0045e-05	2.9938e-06
27	-2.2496e-04	-3.9078e-04	4.2541e-04	4.1900e-06	-5.6194e-05	4.2036e-06
28	-1.8396e-04	-4.0979e-04	4.1522e-04	1.8381e-06	2.2227e-05	4.7781e-06
29	-1.7986e-04	-4.0872e-04	4.1192e-04	-1.9728e-06	8.5398e-06	4.7538e-06
30	-2.2739e-04	-3.8436e-04	4.2248e-04	-4.2435e-06	5.2986e-05	4.1823e-06
31	-8.7269e-05	1.3932e-05	1.3265e-04	3.0070e-20	-4.0030e-04	1.0037e-19
32	-1.9384e-04	3.9765e-05	2.2606e-04	2.4987e-20	-3.0256e-04	3.8540e-20

PITRA PAVE v1.0.0
Archivo Análisis Opciones Ayuda

Modulos Delanteros T7-R3-S2.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
29	-1.7986e-04	-4.0872e-04	4.1192e-04	-1.9728e-06	8.5398e-06	4.7538e-06
30	-2.2739e-04	-3.8436e-04	4.2248e-04	-4.2435e-06	5.2986e-05	4.1823e-06
31	-8.7269e-05	1.3932e-05	1.3265e-04	3.0070e-20	-4.0030e-04	1.0037e-19
32	-1.9384e-04	3.9765e-05	2.2606e-04	2.4987e-20	-3.0256e-04	3.8540e-20
33	-2.4477e-04	5.2096e-05	2.7046e-04	1.1160e-19	-1.4075e-04	9.4021e-20
34	-2.4226e-04	5.1455e-05	2.6835e-04	7.3268e-20	1.5228e-04	-1.1816e-19
35	-1.9154e-04	3.9166e-05	2.2414e-04	5.7414e-20	3.0513e-04	-7.7927e-20
36	-7.9274e-05	-5.0886e-05	1.9203e-04	-3.7206e-06	-4.7464e-04	6.4347e-06
37	-2.0218e-04	-7.8728e-05	3.5882e-04	-2.2383e-06	-3.7209e-04	6.8643e-06
38	-2.5662e-04	-9.2696e-05	4.3438e-04	-9.8088e-07	-1.6547e-04	7.0388e-06
39	-2.5375e-04	-9.1970e-05	4.3046e-04	1.0546e-06	1.8016e-04	7.0325e-06
40	-1.9921e-04	-7.7939e-05	3.5492e-04	2.2651e-06	3.7430e-04	6.8588e-06
41	-8.4566e-05	7.6636e-06	1.3512e-04	-9.2204e-06	-3.9795e-04	1.6332e-05
42	-1.9048e-04	3.2686e-05	2.2860e-04	-5.6124e-06	-3.0110e-04	1.7643e-05
43	-2.4113e-04	4.4678e-05	2.7304e-04	-2.4709e-06	-1.4011e-04	1.8182e-05
44	-2.3863e-04	4.4049e-05	2.7092e-04	2.6569e-06	1.5159e-04	1.8162e-05
45	-1.8819e-04	3.2098e-05	2.2668e-04	5.6793e-06	3.0365e-04	1.7625e-05
46	-7.2865e-05	-6.4268e-05	1.9625e-04	-1.9428e-05	-4.6744e-04	3.5304e-05
47	-1.9382e-04	-9.4293e-05	3.6304e-04	-1.2087e-05	-3.6754e-04	3.8989e-05
48	-2.4740e-04	-1.0920e-04	4.3859e-04	-5.3673e-06	-1.6343e-04	4.0536e-05
49	-2.4457e-04	-1.0844e-04	4.3467e-04	5.7720e-06	1.7798e-04	4.0479e-05
50	-1.9087e-04	-9.3474e-05	3.5914e-04	1.2229e-05	3.6970e-04	3.8939e-05
51	-7.2268e-05	-1.2945e-05	1.3765e-04	4.0279e-05	-3.7773e-04	7.3964e-05
52	-1.7279e-04	6.9856e-06	2.3020e-04	-2.6014e-05	-2.8785e-04	8.4722e-05
53	-2.2099e-04	1.6695e-05	2.7420e-04	-1.1723e-05	-1.3410e-04	8.9395e-05
54	-2.1859e-04	1.6156e-05	2.7210e-04	1.2611e-05	1.4513e-04	8.9217e-05
55	-1.7058e-04	6.4752e-06	2.2829e-04	2.6312e-05	2.9025e-04	8.4567e-05
56	-5.1978e-05	-8.4404e-05	1.8397e-04	-8.3249e-05	-4.0876e-04	1.5057e-04
57	-1.5724e-04	-1.2535e-04	3.4420e-04	-5.7302e-05	-3.2658e-04	1.8446e-04
58	-2.0326e-04	-1.4552e-04	4.1665e-04	-2.6419e-05	-1.4446e-04	2.0000e-04
59	-2.0075e-04	-1.4454e-04	4.1287e-04	2.8453e-05	1.5754e-04	1.9937e-04
60	-1.5458e-04	-1.2433e-04	3.4040e-04	5.7910e-05	3.2831e-04	1.8391e-04

Fuente: Pantallazos Pitrapave

Ilustración 54: Resultados deformaciones T7R3S2 ejes modulares traseros

PITRA PAVE v1.0.0
Archivo Análisis Opciones Ayuda

Modulos Traseros T7-R3-S2.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	2.0517e-05	1.9601e-05	-2.1331e-05	2.6999e-21	-1.4681e-05	5.1715e-21
2	1.6244e-05	4.3661e-05	-3.1900e-05	1.0588e-21	-1.2179e-05	6.0086e-21
3	1.7290e-05	5.1427e-05	-3.6634e-05	1.9641e-20	-5.3269e-06	-6.2866e-22
4	1.7323e-05	5.0968e-05	-3.6405e-05	3.6396e-21	5.8275e-06	-4.8737e-21
5	1.6445e-05	4.3054e-05	-3.1683e-05	3.5824e-21	1.2245e-05	-7.2362e-21
6	8.2814e-05	-2.7852e-05	-2.6417e-05	7.5700e-07	-3.9291e-05	-9.7621e-08
7	-2.1452e-04	-3.7531e-04	4.0814e-04	4.4977e-07	-5.4222e-05	-1.0094e-07
8	-1.7510e-04	-3.9352e-04	3.9803e-04	1.9617e-07	2.0856e-05	-1.0221e-07
9	-1.7071e-04	-3.9238e-04	3.9450e-04	-2.1091e-07	9.8198e-06	-1.0217e-07
10	-2.1688e-04	-3.6969e-04	4.0540e-04	-4.5520e-07	5.1195e-05	-1.0090e-07
11	1.9957e-05	2.0159e-05	-2.1331e-05	1.7167e-06	-1.4693e-05	-1.6673e-07
12	1.5582e-05	4.4308e-05	-3.1894e-05	1.0280e-06	-1.2186e-05	-1.6765e-07
13	1.6585e-05	5.2111e-05	-3.6625e-05	4.4974e-07	-5.3296e-06	-1.6772e-07
14	1.6620e-05	5.1651e-05	-3.6396e-05	-4.8354e-07	5.8305e-06	-1.6773e-07
15	1.5784e-05	4.3700e-05	-3.1677e-05	-1.0403e-06	1.2252e-05	-1.6766e-07
16	8.1582e-05	-2.6905e-05	-2.6270e-05	3.1193e-06	-3.9277e-05	-9.1385e-08
17	-2.1602e-04	-3.7417e-04	4.0833e-04	1.8927e-06	-5.4208e-05	-5.8588e-08
18	-1.7671e-04	-3.9230e-04	3.9823e-04	8.3234e-07	2.0863e-05	-4.3614e-08
19	-1.7232e-04	-3.9117e-04	3.9471e-04	-8.9496e-07	9.8124e-06	-4.4201e-08
20	-2.1838e-04	-3.6856e-04	4.0559e-04	-1.9153e-06	5.1181e-05	-5.9098e-08
21	1.7840e-05	2.0741e-05	-2.0526e-05	5.1248e-06	-1.4450e-05	-5.3041e-07
22	1.2883e-05	4.5125e-05	-3.0906e-05	3.1563e-06	-1.2008e-05	-7.5038e-07
23	1.3634e-05	5.3027e-05	-3.5556e-05	1.3961e-06	-5.2458e-06	-8.5090e-07
24	1.3679e-05	5.2564e-05	-3.5331e-05	-1.5013e-06	5.7403e-06	-8.4691e-07
25	1.3094e-05	4.4513e-05	-3.0691e-05	-3.1937e-06	1.2072e-05	-7.4691e-07
26	7.8325e-05	-2.9268e-05	-2.3306e-05	6.6501e-06	-3.7866e-05	-2.8320e-06
27	-2.2027e-04	-3.7708e-04	4.1211e-04	3.9650e-06	-5.3142e-05	-3.9764e-06
28	-1.8140e-04	-3.9549e-04	4.0238e-04	1.7394e-06	2.1369e-05	-4.5199e-06
29	-1.7699e-04	-3.9434e-04	3.9884e-04	-1.8669e-06	9.2661e-06	-4.4969e-06
30	-2.2262e-04	-3.7145e-04	4.0935e-04	-4.0157e-06	5.0105e-05	-3.9563e-06
31	-8.2557e-05	1.3207e-05	1.2546e-04	1.9058e-20	-3.7874e-04	4.1928e-20
32	-1.8341e-04	3.7682e-05	2.1382e-04	5.1245e-20	-2.8627e-04	8.2162e-20

Lunes, 24 de junio de 2019

PITRA PAVE v1.0.0
Archivo Análisis Opciones Ayuda

Modulos Traseros T7-R3-S2.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
29	-1.7699e-04	-3.9434e-04	3.9884e-04	-1.8669e-06	9.2661e-06	-4.4969e-06
30	-2.2262e-04	-3.7145e-04	4.0935e-04	-4.0157e-06	5.0105e-05	-3.9563e-06
31	-8.2557e-05	1.3207e-05	1.2546e-04	1.9058e-20	-3.7874e-04	4.1928e-20
32	-1.8341e-04	3.7682e-05	2.1382e-04	5.1245e-20	-2.8627e-04	8.2162e-20
33	-2.3159e-04	4.9362e-05	2.5583e-04	9.4656e-20	-1.3317e-04	3.0493e-20
34	-2.2922e-04	4.8755e-05	2.5383e-04	6.4375e-20	1.4408e-04	7.4115e-20
35	-1.8123e-04	3.7114e-05	2.1201e-04	5.5050e-20	2.8870e-04	-5.0822e-20
36	-7.4898e-05	-4.8102e-05	1.8154e-04	-3.5199e-06	-4.4917e-04	6.0875e-06
37	-1.9120e-04	-7.4448e-05	3.3945e-04	-2.1176e-06	-3.5218e-04	6.4939e-06
38	-2.4266e-04	-8.7629e-05	4.1100e-04	-9.2799e-07	-1.5681e-04	6.6590e-06
39	-2.3999e-04	-8.6996e-05	4.0725e-04	9.9775e-07	1.7044e-04	6.6531e-06
40	-1.8843e-04	-7.3739e-05	3.3584e-04	2.1430e-06	3.5425e-04	6.4887e-06
41	-8.0000e-05	7.2774e-06	1.2780e-04	-8.7232e-06	-3.7651e-04	1.5451e-05
42	-1.8023e-04	3.0985e-05	2.1623e-04	-5.3098e-06	-2.8489e-04	1.6891e-05
43	-2.2815e-04	4.2344e-05	2.5826e-04	-2.3377e-06	-1.3256e-04	1.7201e-05
44	-2.2579e-04	4.1749e-05	2.5627e-04	2.5136e-06	1.4342e-04	1.7182e-05
45	-1.7806e-04	3.0427e-05	2.1441e-04	5.3731e-06	2.8730e-04	1.6674e-05
46	-6.8834e-05	-6.0763e-05	1.8553e-04	-1.8380e-05	-4.4236e-04	3.3399e-05
47	-1.8329e-04	-8.9174e-05	3.4344e-04	-1.1435e-05	-3.4787e-04	3.6885e-05
48	-2.3394e-04	-1.0324e-04	4.1498e-04	-5.0779e-06	-1.5489e-04	3.8349e-05
49	-2.3131e-04	-1.0257e-04	4.1124e-04	5.4608e-06	1.6837e-04	3.8295e-05
50	-1.8054e-04	-8.8437e-05	3.3983e-04	1.1570e-05	3.4990e-04	3.6838e-05
51	-6.8364e-05	-1.2221e-05	1.3019e-04	-3.8108e-05	-3.5739e-04	6.9973e-05
52	-1.6349e-04	6.6687e-06	2.1774e-04	-2.4612e-05	-2.7235e-04	8.0151e-05
53	-2.0910e-04	1.5869e-05	2.5936e-04	-1.1091e-05	-1.2688e-04	8.4572e-05
54	-2.0683e-04	1.5358e-05	2.5738e-04	1.1931e-05	1.3731e-04	8.4404e-05
55	-1.6140e-04	6.1848e-06	2.1594e-04	2.4894e-05	2.7462e-04	8.0004e-05
56	-4.9073e-05	-7.9817e-05	1.7391e-04	-7.8765e-05	-3.8685e-04	1.4245e-04
57	-1.4868e-04	-1.1856e-04	3.2562e-04	-5.4216e-05	-3.0913e-04	1.7451e-04
58	-1.9218e-04	-1.3762e-04	3.9424e-04	-2.4997e-05	-1.3694e-04	1.8921e-04
59	-1.8985e-04	-1.3674e-04	3.9061e-04	2.6921e-05	1.4904e-04	1.8861e-04
60	-1.4621e-04	-1.1764e-04	3.2211e-04	5.4792e-05	3.1074e-04	1.7399e-04

Fuente: Pantallazos Pitrapave

Factor de equivalencia de carga

El factor de equivalencia de carga se define como la relación entre el daño producido por el paso de un eje sobre el pavimento, con respecto al daño producido por el eje de referencia. Los métodos de diseño se fundamentan en el número de veces que el eje de referencia pasa sobre el pavimento durante su periodo de diseño.

En forma general, el número de ejes equivalentes (ESAL) está dado por:

$$ESAL = \sum_{i=1}^m EALF_i \cdot n_i$$

Donde:

m : número de cargas por eje evaluadas

$EALF_i$: factor de equivalencia de carga de cada eje evaluado

n_i : número de repeticiones esperadas de cada eje evaluado

La base para la conversión de las cargas del tránsito en aplicaciones equivalentes del eje de referencia se desarrolló durante el ensayo AASHO Road Test, entre 1958 y 1960. En dicha prueba, pavimentos de similares condiciones, fueron sometidos ante variedad de cargas y configuraciones, de tal forma que pudiese determinarse el efecto producido por cada una de estas.

La guía metodológica para el diseño de rehabilitación de pavimentos flexibles del INVIAS, plantea un ejemplo simple para la definición del factor de equivalencia de carga, EALF:

Considérense dos pavimentos de similares condiciones sometidos a la acción de dos cargas de diferente magnitud. En el primero de ellos, la acción de 100,000 repeticiones de un eje simple de 80kN (8.2Ton) de peso produjo un descenso en el índice de serviciabilidad de 4.2 a 2.5; en el segundo, únicamente 10,000 repeticiones del mismo eje pero con una carga de 142kN, produjeron la misma pérdida de serviciabilidad. Esto indica que 10 repeticiones del eje de 80kN producen la misma pérdida de serviciabilidad que una del eje de 142kN.

Factores de Equivalencia AASHTO

Históricamente, con fundamento en el ensayo vial AASHO realizado por la agencia estadounidense AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), se ha empleado el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas como parámetro de diseño estructural.

En esta metodología, los factores de equivalencia empleados para la determinación del número de ejes equivalentes ESALS (Equivalent Single Axle Loads) han sido determinados en forma empírica, se fundamentan en el concepto de Índice de Serviciabilidad Presente (PSI en inglés) y dependen del tipo de superficie y el espesor de la misma.

La siguiente ecuación de regresión fue obtenida sobre los resultados del ensayo vial y se emplea para el cálculo del factor de equivalencia:

$$\log \frac{1}{EALF} = 4.79 \log(18+1) - 4.79 \log(L_x + L_2) + 4.33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

$$G_t = \log \left(\frac{4.2 - P_t}{4.2 - 1.5} \right)$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN+1)^{5.19}(L_2)^{3.23}}$$

Donde:

EALF : factor de equivalencia de carga de cada eje evaluado

Lx : Peso del eje (simple, doble o triple), kips

Pt : Índice de serviciabilidad final

SN : Número estructural del pavimento

Según Huang, el efecto sobre el factor de equivalencia (EALF) de la serviciabilidad final (Pt) y del número estructural (SN) es errático y no muy consistente con la teoría. De cualquier forma, bajo cargas pesadas con factor de equivalencia superior a la unidad, el EALF aumenta mientras Pt y SN disminuyen, lo que podría esperarse si se tiene en cuenta que las cargas de los ejes pesados son más destructivas en los pavimentos débiles que en los fuertes.

Dado que, el factor de equivalencia de carga depende del número estructural, y este último depende del primero, se hace necesario emplear un método de aproximaciones sucesivas para su determinación. Sin embargo, Huang⁴ recomienda emplear SN=5 dado que los espesores de pavimento no son muy sensitivos ante el factor de equivalencia de carga.

Factores de Equivalencia AASHTO, Método Simplificado

Una simplificación de la formula desarrollada por AASHTO fue propuesta por Deacon en 1969. Bajo el principio que la deformación producida sobre el pavimento por determinado eje es proporcional a la carga del mismo, se plantea:

$$EALF = \left(\frac{\epsilon_x}{\epsilon_{8.2}} \right)^4$$

Donde:

ϵ_x : deformación por tracción producida bajo las capas asfálticas por el eje evaluado

$\epsilon_{8.2}$: deformación por tracción producida bajo las capas asfálticas por el eje de referencia

Dado que resulta razonable considerar que las deformaciones por tensión son directamente proporcionales a la magnitud de las cargas, la ecuación puede expresarse de la siguiente manera:

$$EALF = \left(\frac{L_x}{8.2} \right)^4$$

En donde L_x es la carga en toneladas de un eje simple. Para ejes tandem o tridem puede emplearse una expresión más general:

$$EALF = \left(\frac{L_x}{L_s} \right)^4$$

Donde:

L_s : es la carga en ejes estándar que tienen el mismo número de ejes que L_x

Factores de Equivalencia INVIAS

Con base en la metodología simplificada, expuesta en el numeral anterior, el INVIAS ha recomendado para el caso colombiano:

Tabla 22: Fórmulas simplificadas para cálculo del EALF

Tipo de Eje	Configuración	Fórmula de Cálculo
Simple de rueda simple		$EALF = \left(\frac{L_x}{6.6}\right)^4$
Simple de rueda doble		$EALF = \left(\frac{L_x}{8.2}\right)^4$
Doble de rueda doble (tándem)		$EALF = \left(\frac{L_x}{15}\right)^4$
Triple de rueda doble (trídem)		$EALF = \left(\frac{L_x}{23}\right)^4$

Fuente: Instituto Nacional de Vías, Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. Bogotá: El instituto, 1998. p. 16.

De otro lado, la Universidad del Cauca, dentro de la investigación nacional de pavimentos (INPACO), obtuvo los siguientes factores de equivalencia de carga para los vehículos de carga en Colombia. Más recientemente, en 2004, el INVIAS incluyó en su Cartilla Volúmenes de Tránsito promedios ponderados nacionales para los vehículos comerciales. Los EALF obtenidos en las dos investigaciones nacionales, son los siguientes:

Tabla 23: Factores daño (EALF) por tipo de camión

Fuente	C2P	C2G	C3	C2-S1	C4	C3-S1	C2-S2	C3-S2	C3-S3
INPACO, 1996	1.14	3.44	3.76	3.37	6.73	2.22	3.42	4.40	4.72
INVIAS, 2004	-	2.54	3.09	3.09	5.05	1.44	2.09	4.01	4.61

Fuente: Tesis Didier Bellon

Configuración de los ejes vehiculares:

Para describir la configuración de un eje cuya carga será aplicada sobre el pavimento, es necesario definir una serie de elementos, dado que, la respuesta estructural depende de la localización y de la interacción entre las diferentes llantas de un eje dado. A continuación, se describe cada uno de estos elementos.

Presión de inflado y presión de contacto

Si se ignora el efecto de las paredes de las llantas, es posible asumir que la presión de contacto que estas ejercen sobre el pavimento es equivalente a la presión de inflado. A bajas presiones de inflado, las paredes se encuentran sometidas a compresión; mientras que, a altas presiones, estas paredes trabajarán a tensión. De tal forma que, la reacción que opone la estructura del pavimento ante la aplicación de una carga, será superior en el caso en el que las llantas se encuentren infladas con elevadas presiones; esta es la razón por la que, en ingeniería de pavimentos se adopta la presión de inflado como presión de contacto entre las llantas y el pavimento.

El área de contacto:

El esfuerzo producido sobre el pavimento, ante el efecto de una rueda cargada, está dado por:

$$p_i = \frac{P}{A} \Rightarrow A = \frac{P}{p_i}$$

Donde:

A : área de contacto

P : carga total de la rueda

p_i : presión de inflado de la rueda

En el diseño de pavimentos, es común asumir que el área de contacto de las llantas se asemeja a la de un círculo. De tal forma que, el radio del área de contacto (a) de cada una de las ruedas, será:

$$A=\pi.a^2 \Rightarrow a=\sqrt{A/\pi}=\sqrt{P/\pi.p_i}$$

Configuración transversal del eje vehicular:

La separación entre los centros de cada una de las llantas se adopta como el triple del radio del área de carga. La figura 1 ilustra la disposición transversal de las llantas y el punto de aplicación del peso de uno de los extremos del eje (P):

Longitud y separación de los ejes:

La más reciente versión de la guía de diseño de AASHTO5 recomienda los siguientes valores típicos para la configuración de los ejes vehiculares:

- ✓ **Ancho promedio del eje:** 2.6m (8.5ft), parámetro acorde con la resolución 4100 de 2004.
- ✓ **Espaciamiento entre ejes:** 1.31m (51.6in) para el eje tandem y 1.25m (49.2in) para el tridem.

Resultados de Factor Daño

En las presentes tablas se realiza un resumen de las deformaciones determinadas y ajustadas estimando el transito admisible, en el cual se emplearon los criterios de falla, fatiga y Ahuellamiento del Instituto del Asfalto de los Estados Unidos. Para esto se tomaron del software las deformaciones máximas por eje, en pro de realizar una comparación con los demás equipos de transporte regulados bajo la resolución 4100 de 2006, del ministerio de transporte de Colombia.

Tabla 24: Factor Daño T7-R3-S1

Estructura de Pavimentos	Eje de Analisis	Modulos (MPa)				Modulos (Pa)				Espesores de Capas (Cm)			Deformaciones		Nf		EALF Por Eje		Σ EALF Ejes Delanteros y Traseros		Σ EALF		
		CA	BG	SBG	SR	CA	BG	SBG	SR	CA	BG	SBG	ε _r	ε _z	ε _r	ε _z	ε _r	ε _z	ε _r	ε _z	ε _r	ε _z	
TRANSITO 7 (REGION 3, S1)	EERD												2.50E-04	2.22E-04	1.59E+06	3.08E+07	1	1	1	1	1	1	
	S12	EJE 1	1490	210	116	29	1.5E+09	2.1E+08	1.2E+08	2.9E+07	15	35	50	3.38E-04	4.70E-04	5.86E+05	1.08E+06	2.71	14.27	15.6	127.5	29.3	229.5
		EJE 2												3.32E-04	5.30E-04	6.25E+05	6.32E+05	2.54	24.36				
		EJE 3												3.32E-04	5.34E-04	6.21E+05	6.12E+05	2.56	25.14				
		EJE 4												3.32E-04	5.34E-04	6.21E+05	6.12E+05	2.56	25.14				
		EJE 5												3.32E-04	5.30E-04	6.25E+05	6.32E+05	2.54	24.36				
		EJE 6												3.38E-04	4.70E-04	5.86E+05	1.08E+06	2.71	14.27	13.7	101.9		
		Vb												3.25E-04	4.47E-04	6.67E+05	1.35E+06	2.38	11.41				
		11												3.18E-04	5.04E-04	7.16E+05	7.89E+05	2.22	19.51				
		Va												3.19E-04	5.07E-04	7.12E+05	7.68E+05	2.23	20.04				
		5												3.19E-04	5.07E-04	7.12E+05	7.68E+05	2.23	20.04				
		C												3.18E-04	5.04E-04	7.16E+05	7.89E+05	2.22	19.51				
1	3.25E-04	4.47E-04	6.67E+05	1.35E+06	2.38	11.41																	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25: Factor Daño T7-R3-S2

Estructura de Pavimentos	Eje de Analisis	Modulos (MPa)				Modulos (Pa)				Espesores de Capas (Cm)			Deformaciones		Nf		FEC Por Eje		Σ FEC Ejes Delanteros		Σ FDV	
		CA	BG	SBG	SR	CA	BG	SBG	SR	CA	BG	SBG	<i>ε_r</i>	<i>ε_z</i>	<i>ε_r</i>	<i>ε_z</i>	<i>ε_r</i>	<i>ε_z</i>	<i>ε_r</i>	<i>ε_z</i>	<i>ε_r</i>	<i>ε_z</i>
TRANSITO 7 (REGION 3, S2)	EERD												3.03E-04	2.29E-04	8.37E+05	2.71E+07	1	1	1	1	1	1
	EJE 1												4.10E-04	4.17E-04	3.11E+05	1.86E+06	5.11	7.30	30.2	56.4	57.1	101.3
	EJE 2												4.06E-04	4.39E-04	3.20E+05	1.48E+06	4.97	10.43				
	EJE 3												4.08E-04	4.34E-04	3.16E+05	1.54E+06	5.02	9.99				
	EJE 4												4.08E-04	4.34E-04	3.16E+05	1.54E+06	5.02	9.99				
	EJE 5												4.06E-04	4.39E-04	3.20E+05	1.48E+06	4.97	10.43				
	EJE 6	1490	210	116	49	1.5E+09	2.1E+08	1.2E+08	4.9E+07	12	30	45	4.10E-04	4.17E-04	3.11E+05	1.86E+06	5.11	8.30	26.9	44.9		
	Vb												3.95E-04	3.94E-04	3.50E+05	2.37E+06	4.54	6.49				
	11												3.92E-04	4.15E-04	3.59E+05	1.89E+06	4.43	8.15				
	Va												3.94E-04	4.11E-04	3.56E+05	1.97E+06	4.47	7.80				
	5												3.94E-04	4.11E-04	3.56E+05	1.97E+06	4.47	7.80				
	C												3.92E-04	4.15E-04	3.59E+05	1.89E+06	4.43	8.15				
1												3.95E-04	3.94E-04	3.50E+05	2.37E+06	4.54	6.49					

Fuente: Elaboración Propia

Teniendo en cuenta los resultados de las anteriores tablas, en las columnas finales se realizaron los cálculos en Excel para hallar el factor de daño del vehículo especial y de cada uno de sus ejes.

Después de obtener las sumatorias por todos de los FDV de la configuración total del equipo especial, se realiza una tabla de comparación de factores daños con los vehículos comerciales aprobados para transitar diariamente sobre las carreteras nacionales, cabe aclarar que esta comparación se hace de acuerdo a los Tránsitos, Regiones y estructuras determinadas según la ruta de tránsito.

Tabla 26: Comparación de FDV de Equipo especial con vehículos comerciales

VEHÍCULO	TRANSITO ➡	T7		PESO BRUTO VEHICULAR	PESO DE LA CARGA	T7R3S1	T7R3S2
	REGION ➡	R3				FDV / PESO CARGA	FDV / PESO CARGA
	SUBRASANTE ➡	S1	S2				
C2	Factor Daño	3.92	3.92	17	9.5	0.41	0.41
C3	Factor Daño	5.31	5.31	28	17.4	0.31	0.31
C3S2	Factor Daño	9.37	9.37	48	31.3	0.30	0.30
C3S3	Factor Daño	6.5	6.5	52	33.9	0.19	0.19
Equipo Modular 6 Lineas - Vigas - 6 Lineas	ξr	29.28	57.08	216.7	149	0.20	0.38
	ξz	229.5	101.3			1.54	0.68

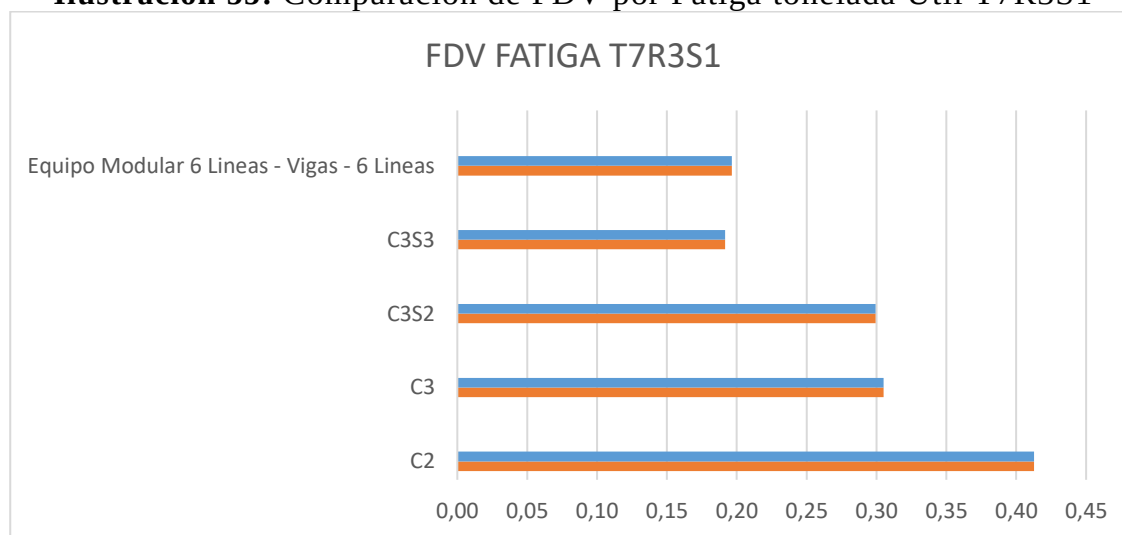
Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta el resumen comparativo de los daños que ocasiona el paso de un vehículo especial sobre las regiones analizadas, es importante dejar la salvedad que el equipo especial comparado vs los vehículos C2, C3, C3S2 y C3S3 presenta un FDV en el parámetro de Ahuellamiento mucho mayor en las estructuras de pavimento analizado, causando mayor impacto en la T7R3S1 debido a que el CBR de la subrasante es menor que en las demás estructuras analizadas, es decir que para el criterio de Ahuellamiento el daño que causa un equipo especial es mayor en las estructuras de pavimentos de la carta INVIAS en las estructuras de pavimento con suelo de subrasante de una rigidez baja.

Resultados de Factor Daño por Tonelada Útil del Vehículo especial vs los vehículos comerciales

Como se puede apreciar al dividir los factores daño por el peso de la carga de cada uno de los equipos comerciales y el equipo especial de análisis, debido a la compleja distribución del equipo especial, este causa un menor impacto similar que los demás vehículos estandarizados bajo el criterio de fatiga y un impacto mayor bajo el criterio de Ahuellamiento.

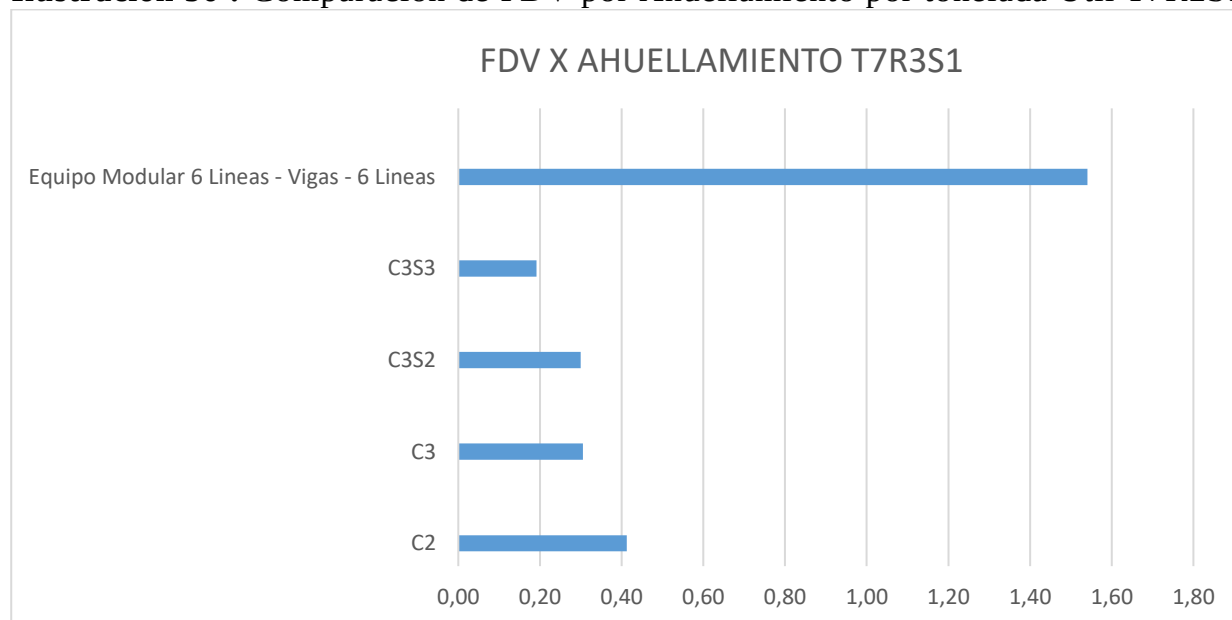
Ilustración 55: Comparación de FDV por Fatiga tonelada Útil T7R3S1



Fuente: Elaboración propia

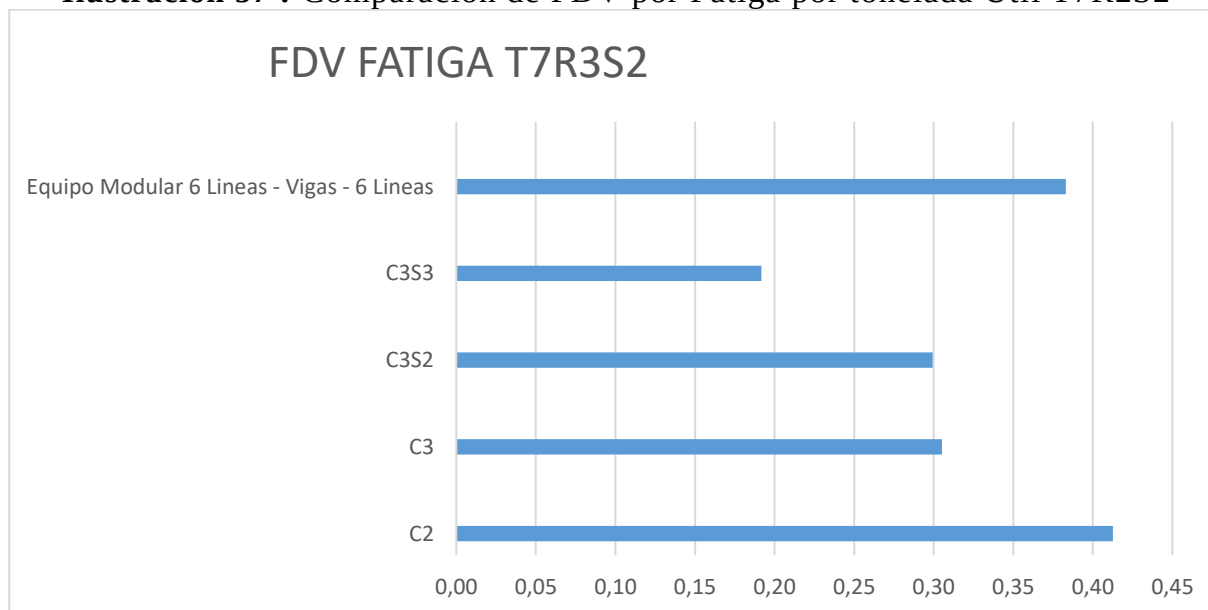
En la presente grafica se puede apreciar que el factor daño que produce un equipo especial por tonelada útil sobre un pavimento es similar al de los vehículos comerciales.

Ilustración 56 : Comparación de FDV por Ahuellamiento por tonelada Útil T7R2S1

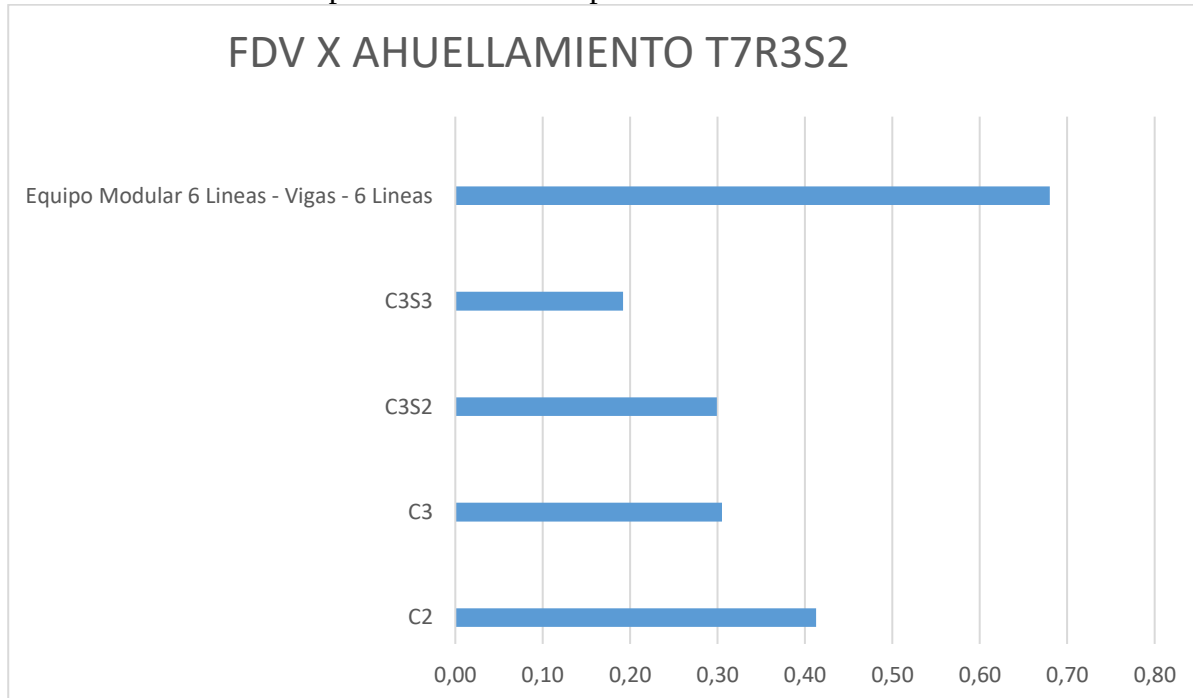


Fuente: Elaboración propia

Ilustración 57 : Comparación de FDV por Fatiga por tonelada Útil T7R2S2



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 58 : Comparación de FDV por Ahuellamiento tonelada Útil T7R2S2**Fuente:** Elaboración propia

Proporciones de daño del equipo modular por fatiga y ahuellamiento frente a los equipos comerciales estandarizados.

Tabla 27: Proporción Daño T7-R3-S1

PROPORCION DE DAÑO FATIGA T7R3S2				
PROPORCION DE DAÑO FRENTE A VEHICULOS COMERCIALES	C2	C3	C3S2	C3S3
Equipo Modular 6 Líneas - Vigas - 6 Líneas	0.93	1.26	1.28	2.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: Proporción Daño T7-R3-S2

PROPORCION DE DAÑO FATIGA T7R3S2				
PROPORCION DE DAÑO FRENTE A VEHICULOS COMERCIALES	C2	C3	C3S2	C3S3
Equipo Modular 6 Líneas - Vigas - 6 Líneas	0.93	1.26	1.28	2.00

Fuente: Elaboración propia**Tabla 29:** Proporción Daño T7-R3-S2

PROPORCION DE DAÑO AHUELLAMIENTO T7R3S1				
PROPORCION DE DAÑO FRENTE A VEHICULOS COMERCIALES	C2	C3	C3S2	C3S3
Equipo Modular 6 Líneas - Vigas - 6 Líneas	3.73	5.05	5.15	8.03

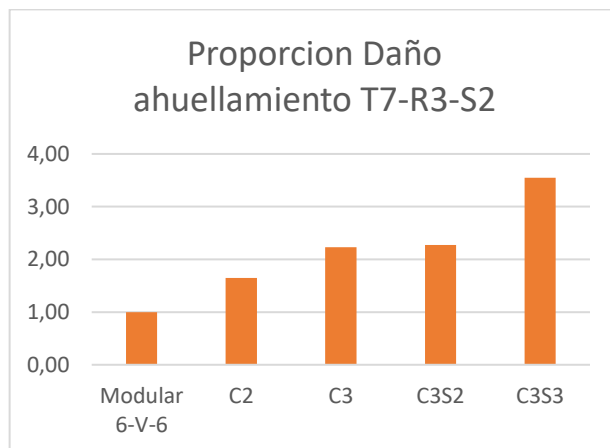
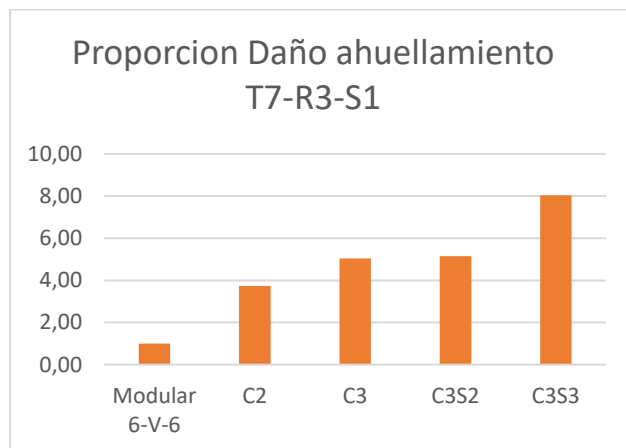
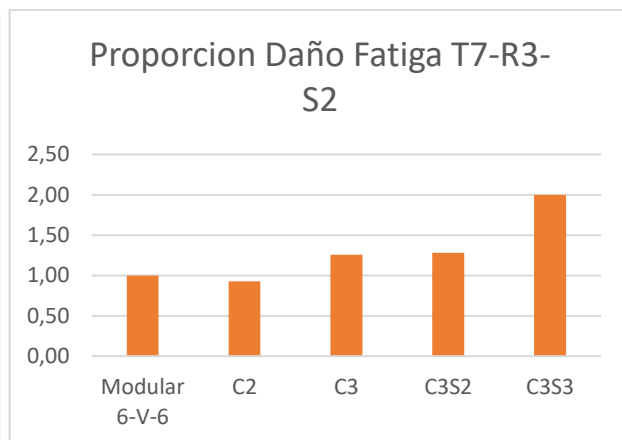
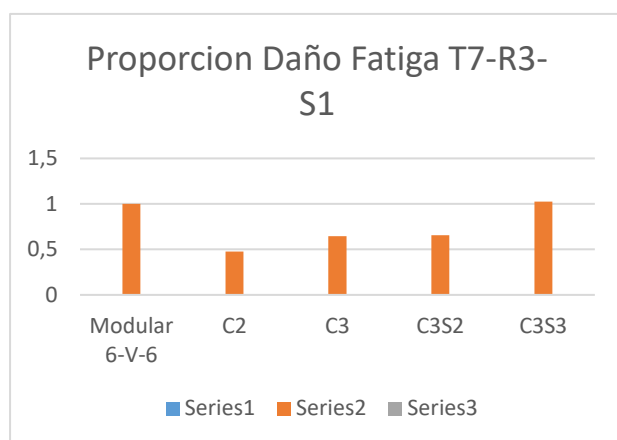
Fuente: Elaboración propia**Tabla 30:** Proporción Daño T7-R3-S2

PROPORCION DE DAÑO AHUELLAMIENTO T7R3S2				
PROPORCION DE DAÑO FRENTE A VEHICULOS COMERCIALES	C2	C3	C3S2	C3S3
Equipo Modular 6 Líneas - Vigas - 6 Líneas	1.65	2.23	2.27	3.55

Fuente: Elaboración propia

Graficas de Proporciones de daño del equipo modular por fatiga y ahuellamiento frente a los equipos comerciales estandarizados.

Para las presentes graficas se asume que el Daño que ocasiona por criterios de fatiga y ahuellamiento uno equipo especial es de 1, y las demás proporciones es la cantidad de veces adicionales de daño que produce un equipo modular respecto a los equipos estandarizados regulados bajo la resolución 4100 del Ministerio de Transporte.



ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Se puede apreciar que este documento puede servir como una guía metodológica del paso a paso para las empresas de transporte especial extrapesado que requieran presentar estudios de pavimentos mediante un método mecanicista al INVIAS cuando tengan que movilizar cargas extrapesadas.
- Las proporciones de daño que ocasiona un equipo especial modular bajo el criterio de fatiga no sobrepasan las de los equipos comerciales estandarizados bajo la resolución 4100 de 2004.
- Se identificó que el criterio de fatiga es de gran importancia para determinar la falla del pavimento con suelo de subrasante de CBR=3 y 5, y también se aprecia que el criterio de ahuellamiento es el que determina la falla en el pavimento con suelo de subrasante de CBR=3 y 5.
- Revisando los factores daño por tonelada de carga útil del equipo modular especial, en términos generales, aunque no son similares a los de los vehículos de carga convencionales que circulan por las carreteras del país, es decir, el equipo Modular especial no resulta ser mucho más agresivo que los camiones convencionales sobre las estructuras de pavimento en deformaciones referentes a la fatiga, esto incide en que el vehículo especial apenas va a usar 2 veces el corredor de Caucasia y La Apartada, mientras que un vehículo convencional pasa más de 800 veces al día por el corredor generando mayor agresividad.

- Es muy importante que un vehículo modular especial circule en los trayectos objeto de este análisis, a primeras horas de la mañana o en instantes en los cuales donde la mezcla asfáltica del pavimento presente mayor rigidez y menor temperatura, disminuyendo la posibilidad de generar agresivamente el fenómeno de ahuellamiento, que igual por el paso de 2 motores no es incluido como criterio de falla, para los concretos asfálticos.
- Con base en los resultados obtenidos, es viable que un vehículo especial modular circule por un corredor nacional con carga extrapesada, sin embargo es muy importante colocar la cantidad de módulos necesarios a la carga de tal manera que no impacte destructivamente las carreteras por las cuales transite, para esto el presente documento sirve como análisis para determinar la configuración del equipos especial.
- Es muy importante que para la circulación de una carga extrapesada el equipo modular contemple una velocidad estandarizada acorde a la establecida en la resolución 4959 del 2006, del Ministerio de Transporte, esto en pro de evitar frenadas dañinas a las estructuras de pavimento por exceso de velocidad.

BIBLIOGRAFÍA

TJAN, ALYSIUS. (2005) DETERMINATION OF EQUIVALENT AXLE LOAD FACTOR OF TRAILER WITH MULTIPLE AXLES ON FLEXIBLE PAVEMENT STRUCTURES. UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN.

AASHTO (1993) AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, WASHINGTON, DC.

SHELL (1978) SHELL PAVEMENT DESIGN MANUAL – ASPHALT PAVEMENTS AND OVERLAYS FOR ROAD TRAFFIC. SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED, LONDON, UK.

CAMPAGNOLI, SANDRA (2018) ESTUDIO TECNICO DE PAVIMENTOS PARA EL TRANSITO DEL VEHICULO ESPECIAL (CAMION ESPECIAL) ENTRE EL TRAMO SANTA MARTA – SOCIEDAD PORTUARIA – MAMATOCO - NEGUANJE EN EL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA.

ASPHALT INSTITUTE (1982) RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE ASPHALT INSTITUTE'S THICKNESS. DESIGN MANUAL (MS-1) 9TH EDITION. THE ASPHALT INSTITUTE, COLLEGE PARK, MA.

FINN, F.N., C. SARAF, R. KULKARNI, K. NAIR, W. SMITH, AND A. ABDULLAH (1977) THE USE OF DISTRESS PREDICTION SUBSYSTEMS FOR THE DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES, PROCEEDINGS OF FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS – VOL. I. UNIVERSITY OF MICHIGAN, ANN ARBOR, MI.

CARVAJAL, E. (2014). TESIS EFECTO DEL ESPESOR DEL CONCRETO ASFÁLTICO EN EL AGRIETAMIENTO POR FATIGA. UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.

CHUCTAYA, S. (S.F.). EL ESFUERZO DE TENSIÓN. SCRIBD.

DELBONO, H. (S.F.). AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS USANDO GEOSINTÉTICOS. BUENOS AIRES: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL DE BUENOS AIRES.

GALINDO, R. C. (S.F.). DEFLEXIONES EN PAVIMENTOS.

GARNICA, P. (2002). MECÁNICA DE MATERIALES PARA PAVIMENTOS.
SANFANDILA.

IDU. (2013). GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO. IDU, ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ.

MONTEJO, T. (2011). 55 AÑOS MANEJANDO LOGÍSTICA Y CARGA EXTRAPESADA. BOGOTÁ: CONSUELO MENDOZA EDICIONES.

MOREA, F. (2009). DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS, PROBLEMÁTICA Y MEDICIÓN EN LABORATORIO. TESIS.

REBOLLO, N. J. (2009). SUCEPTIBILIDAD AL AHUELLAMIENTO EN CARPETAS ASFÁLTICAS. TESIS.

RONDÓN, H. (2015). PAVIMENTOS, MATERIALES, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO. BOGOTÁ: ECOE.

TECNOLOGIA, A. (S.F.). DEFORMACION ELÁSTICA. AREA TECNOLOGIA.

MINTRANSPORTE, M. D. (2004). RESOLUCIÓN 4100. MINISTERIO DE TRANSPORTE.

MINTRANSPORTE, M. D. (2006). RESOLUCIÓN 4959. MINISTERIO DE TRANSPORTE.

UNIVERSIA. (2009). UNA SALIDA AL MAR PARA EL OCCIDENTE COLOMBIANO. UNIVERSIA.NET.

MOREA F. DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS, PROBLEMÁTICA Y MEDICIÓN EN LABORATORIO, TESIS DE BECARIO DOCTORAL CONICET. 11 P. 2009

SÁNCHEZ SABOGAL, FERNANDO, PAVIMENTOS, TOMO 1, PRIMERA EDICIÓN, 1984.

MONTEJO, ALFONSO, INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS, 2001, SEGUNDA EDICIÓN, UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA EDICIONES Y PUBLICACIONES.

GARNICA PAUL, MECÁNICA DE MATERIALES PARA PAVIMENTOS, SANFANDILA 2002.

INVIAS, MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFALTICOS PARA VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO.

AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES, AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. COPYRIGHT 1989, 1993.

PAVEMENTS. NORTHWEST TECHNOLOGY TRANSFER CENTER, TRANSAID SERVICE CENTER. WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION.

NEW YORK STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION: PAVEMENT CONDITION ASSESSMENT, NYSDOT, PÁG 143., ALBANY, NY (USA), 2010.

PAVEMENT SURFACE CONDITION FIELD RATING MANUAL FOR ASPHALT UNIVERSIA. (2009). UNA SALIDA AL MAR PARA EL OCCIDENTE COLOMBIANO. UNIVERSIA.NET.

CAUWELAER VAN, FRANS. PAVEMENT DESIGN AND EVALUATION. EDITOR MARC STET.

COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO DE OBRAS DE REHABILITACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES. BOGOTÁ: EL INSTITUTO, 2008. P. 23, 34-38, 50-53.

COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN VÍAS CON MEDIOS Y ALTOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO. BOGOTÁ: EL INSTITUTO, 1998. P. 13-18, 72-91.

ESTADOS UNIDOS. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES. WASHINGTON: LA ASOCIACIÓN, 1993. P. D-3-D-24.

ESTADOS UNIDOS. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. NCHRP GUIDE FOR MECHANISTIC-EMPIRICAL DESIGN OF NEW AND REHABILITATED PAVEMENT STRUCTURES. CHAMPAIGN: EL PROGRAMA, 2004. P. AA-1.

HUANG, YANG H. PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN. NEW JERSEY : PRENTICE HALL, 1993. P. 282-284, 294-297.

YODER E. J. AND WITCZAK M. W. PRINCIPLES OF PAVEMENT DESIGN. 2 ED. NEW YORK : JHON WILEY AND SONS, 1975. P. 147-155, 162-167.

