

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**MODELACIÓN MULTICAPA ELÁSTICA DE
PAVIMENTOS FLEXIBLES EN EL SALVADOR
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SOFTWARE**

PRESENTADO POR:

**CHÁVEZ AVILÉS, CARLOS MAURICIO
ECHEVERRÍA CHÁVEZ, JOSÉ ORLANDO
IRIONDO TOBAR, VICTOR HUGO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2018

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

MSc. CRISTOBAL HERNAN RIOS BENITEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR :

ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título :

**MODELACIÓN MULTICAPA ELÁSTICA DE
PAVIMENTOS FLEXIBLES EN EL SALVADOR
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SOFTWARE**

Presentado por :

**CHÁVEZ AVILÉS, CARLOS MAURICIO
ECHEVERRÍA CHÁVEZ, JOSÉ ORLANDO
IRIONDO TOBAR, VICTOR HUGO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

**ING. DILBER ANTONIO SANCHEZ VIDES
MSc. NÉSTOR ENRIQUE CÁRCAMO REYES**

SAN SALVADOR, MAYO DE 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES

MSc. NÉSTOR ENRIQUE CÁRCAMO REYES

AGRADECIMIENTOS

A DIOS TODOPODEROSO, por iluminarnos, darnos la fortaleza y la sabiduría para llegar al final de este camino y que se culmina con éxito al terminar esta Investigación, los obstáculos en el camino fueron muchos, pero con los favores otorgados, fueron todos superados.

A nuestra Alma Mater Universidad de El Salvador, por formarnos y proveernos de todo el conocimiento con el que a día de hoy contamos y así poder ser agentes de cambio para poder transformar este país. HACIA LA LIBERTAD POR LA CULTURA.

Al Ministerio de Obras Públicas (MOP), por habernos brindado su apoyo técnico y la información necesaria para poder realizar esta investigación.

A los diferentes profesionales de la Universidad de El Salvador y de otras universidades, que con su valiosa ayuda enriquecieron y guiaron nuestro camino para la elaboración de esta investigación, especialmente a:

Ing. Dilber Antonio Sánchez Vides.

Ing. Mauricio Ernesto Valencia.

Ing. José Ranulfo Cárcamo y Cárcamo.

Ing. Jorge Rivera Flores.

MSc. Luis Ricardo Vásquez Varela

Dr. Andrés Sotil

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme culminar esta etapa de mi carrera profesional.

A mis padres Sandra Avilés y Mauricio Chávez, por su amor y apoyo incondicional.

A mi hermana Alexandra Chávez, y a toda mi familia que siempre ha estado pendiente de mí y me ha apoyado durante mi carrera.

A Julissa, por su cariño y apoyo. A mis compañeros de tesis José y Víctor y a todos mis amigos que han estado ahí para apoyarme y brindarme su cariño.

Mauricio Chávez Avilés

DEDICATORIA

Al Sempiterno por haberme permitido llegar hasta este momento.

A mi familia que siempre me acompañó y apoyo, a mis padres Sidia Ismenia Chávez Hernández y Jaime Roberto Echeverría Sorto por creer en mí, darme su apoyo y nunca dejar de apoyarme a pesar de todos los problemas que tuve que atravesar. A mis abuelos, hermanos, primos y tíos que siempre me hicieron reír a pesar de las situaciones y permitieron hacer esta carga más liviana.

A mis amigos y compañeros de la universidad **Josué David Aguirre López, Marissa Scarlett Alvarenga Cardoza, Ana María López Granados y Karina Lisette Pérez de León** los cuales fueron mi ejemplo a seguir permitiéndome aprender con ellos y no darme por vencido.

Finalmente, a mis compañeros en el trabajo de graduación: **Carlos Mauricio Chávez Avilés y Víctor Hugo Iriondo Tobar** en quienes encontré más que un equipo de trabajo, encontré amigos...Gracias.

José Orlando Echeverría Chávez.

DEDICATORIA

A DIOS TODOPODEROSO, por darme siempre la sabiduría y la fuerza para tomar las decisiones correctas a lo largo de mi vida, por fortalecer mi espíritu y no dejarme caer cuando me vi desesperado, por darme a mis padres y haberles otorgado a ellos la fortaleza para seguir adelante y poder vivir a mi lado este momento.

A MIS PADRES, mi madre Noris Tobar y mi padre Victor Iriondo, a ellos les dedico esta investigación, por ser el motor que Dios decidió darme en este mundo para alcanzar uno de mis principales sueños, ser un profesional. Este triunfo es más suyo que mío, siempre creyeron en mí y en mis sueños, me dieron todo su apoyo durante el tiempo que duro este proceso de aprendizaje, gracias por todo, gracias por sus consejos, su motivación y por su fe incondicional en mí.

A MI FAMILIA, que siempre me apoyo y estuvo conmigo, mi hermano Marvin Iriondo, mi abuela Elisa Tobar, a mis tíos Miguel, Franklin, Mila, Alba, Paco, Delia y Fito, gracias por ayudarme siempre de corazón, a mis primos Edwin Tobar y Kevin Álvarez a quienes considero como hermanos más que primos. A todos ustedes, muchas gracias.

A LA FAMILIA ÁLVAREZ TOBAR, mi tía Alba Tobar y su esposo Julio Álvarez, a mi primo Kevin Álvarez, muchas gracias por todo su apoyo y ayuda, siempre incondicional y desinteresada, no me alcanzara esta vida para retribuirles lo que han hecho por mí, que Dios los bendiga siempre. Muchas Gracias

Victor Iriondo

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	xii
1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.1.1 DESARROLLO HISTÓRICO DE LA MODELACIÓN DE PAVIMENTOS.....	2
1.1.2 MODELO DE BOUSSINESQ (1885).....	3
1.1.3 MODELO DE WESTERGAARD 1926.....	5
1.1.4 MODELO DE HOGG 1944.....	6
1.1.5 MODELO DE BURMISTER 1945.....	7
1.1.6 GENERALIZACIÓN DEL SISTEMA MODELO MULTICAPA POR YODER Y WITZACK, 1975.....	8
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.4 ALCANCES.....	14
1.5 LIMITACIONES.....	15
1.6 JUSTIFICACIÓN	16
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 CONCEPTO GENERAL DE MODELACIÓN	19
2.1.1 GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN.....	20
2.1.2 MODELACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	21
2.2 PARÁMETROS DE LA MODELACIÓN.....	22
2.2.1 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.....	23
2.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	24
2.2.3 CARGAS DE TRÁFICO, TPDA.....	25
2.2.4 RELACIÓN DE POISSON.....	26
2.2.5 PROPIEDADES DE MATERIALES PARA SUB-BASE Y PARA LA BASE.....	28
2.2.6 PROPIEDADES DE MATERIALES PARA CARPETA DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.....	30
2.3 GENERALIDADES DE LOS SOFTWARES DE MODELACIÓN	32

2.3.1	GENERALIDADES BISAR 3.0	33
2.3.2	GENERALIDADES 3D MOVE	35
2.3.3	GENERALIDADES WINDEPAV	37
2.3.4	GENERALIDADES PITRA-PAVE	39
2.4	DEFINICIÓN DE MÉTODOS EMPÍRICOS.....	41
2.4.1	DESARROLLO DE LOS MÉTODOS EMPÍRICOS DE DISEÑO	41
2.4.2	MÉTODOS DE DISEÑO BASADOS EN LOS ENSAYOS DE CARRETERAS AASHO ROAD TEST	42
2.5	DEFINICIÓN DE MÉTODOS MECANICISTAS-EMPÍRICOS.	64
2.5.1	COMPORTAMIENTO FUNCIONAL DEL PAVIMENTO	68
2.5.2	FACTORES DE ENTRADA AL PROCESO DE DISEÑO MECANICISTA.....	69
2.6	DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD)	84
2.6.1	EL ORIGEN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO	84
2.6.2	GENERALIDADES SOBRE EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO FWD	87
2.6.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS DEFLECTÓMETROS DE IMPACTO	88
2.6.4	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR DEFLEXIONES EN SITIO	90
2.6.5	ENSAYOS A NIVEL DE RED DE CARRETERAS.....	93
2.6.6	TIPOS DE DEFLECTÓMETROS	94
2.7	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	97
2.7.1	ENSAYO PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD	97
2.7.2	ENSAYO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE POISSON.....	98
2.7.3	ENSAYO PARA DETERMINAR LA RELACIÓN DE VALOR SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR, AASHTO T-193).....	100
3.	MODELACIÓN DEL PAVIMENTO MEDIANTE SOFTWARE	103
3.1	PROYECTOS POR MODELAR.....	103
3.1.1	CARRETERA LIB16S, TRAMO: LIB22S -TAMANIQUE, LA LIBERTAD	104
3.1.2	CARRETERA CAB17N TRAMO: TEJUTEPEQUE - JUTIAPA, CABAÑAS.....	105
3.2	RECOLECCIÓN DE DATOS DE ENTRADA PARA LOS SOFTWARE	107
3.2.1	PROPIEDADES DE CADA CAPA	107
3.2.2	DEFINICIÓN DE LAS CARGAS APLICADAS	111
3.2.3	DEFINICIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN	112
3.3	MODELACIÓN CON BISAR 3.0	126
3.3.1	CREACIÓN DEL PROYECTO.....	127

3.3.2	ESTABLECER CARGAS A APLICAR	130
3.3.3	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	131
3.3.4	DEFINICIÓN DE PUNTOS DE RESPUESTA Y DATOS DE SALIDA	133
3.4	MODELACIÓN CON 3D MOVE	137
3.4.1	CREACIÓN DEL PROYECTO.....	138
3.4.2	ESTABLECER CARGAS A APLICAR	141
3.4.3	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	145
3.4.4	DEFINICIÓN DE PUNTOS DE RESPUESTA Y DATOS DE SALIDA	148
3.5	MODELACIÓN CON PITRA-PAVE.....	153
3.5.1	CREAR Y DEFINIR PROYECTO	153
3.5.2	ESTABLECER CARGAS A APLICAR	154
3.5.3	DEFINIR PROPIEDADES DE CADA CAPA.....	156
3.5.4	DEFINIR PUNTOS DE MEDICIÓN.....	156
3.5.5	DATOS DE SALIDA.....	157
3.6	MODELACIÓN CON WINDEPAV	162
3.6.1	CREACIÓN DEL PROYECTO.....	163
3.6.2	DEFINICIÓN DE LAS CARGAS APLICADAS.....	164
3.6.3	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	166
3.6.4	DEFINICIÓN DE PUNTOS DE RESPUESTA Y DATOS DE SALIDA.....	166
4.	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	171
4.1	EVALUACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE LOS SOFTWARE	171
4.2	ANÁLISIS DE MODELACIÓN.....	172
4.2.1	ANÁLISIS DE MODELACIÓN CON BISAR 3.0.....	173
4.2.2	ANÁLISIS DE MODELACIÓN CON 3D MOVE	176
4.2.3	ANÁLISIS DE MODELACIÓN CON PITRA PAVE	179
4.2.4	ANÁLISIS DE MODELACIÓN CON WIN DEPAV	182
4.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS SOFTWARE VS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL ENSAYO FWD.....	185
4.4	CONCLUSIONES.....	189
4.5	RECOMENDACIONES.....	191
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	192

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Modelo de Boussinesq (1885).....	4
Figura 1.2 Modelo de Westergaard (1926).....	5
Figura 1.3 Modelo de Hogg (1944)	7
Figura 1.4 Modelo de Burmister (1945).....	8
Figura 1.5 Generalización del Sistema Elástico Multicapa.....	9
Figura 2.1 Relación de Poisson, efecto de la aplicación de carga en un elemento.....	26
Figura 2.2 Captura de pantalla de Bisar 3.0.....	34
Figura 2.3 Captura de Pantalla software 3D-MOVE.....	35
Figura 2.4 Captura de Pantalla software DEPAV.....	37
Figura 2.5 Captura de pantalla software WinDEPAV 2.6	38
Figura 2.6 Captura de Pantalla Software Windepav	38
Figura 2.7 Captura de pantalla software PITRA PAVE	39
Figura 2.8 Representación gráfica de Esfuerzos en un punto.....	40
Figura 2.9 Proceso de Diseño AAHSTO 1993	48
Figura 2.10 Confiabilidad de Diseño Mecanicista	65
Figura 2.11 Proceso de Diseño Mecanicista-Empírico.....	67
Figura 2.12 Evolución del IRI en el Tiempo.....	68
Figura 2.13 Tabla de clasificación de vehículos FHWA	70
Figura 2.14 Propiedades y Categorías de la Estructura de Pavimento	81
Figura 2.15 Primer Deflectómetro de la Technical University of Denmark	85
Figura 2.16 Deflectómetro Portátil.....	94
Figura 2.17 Deflectómetro en Furgoneta.....	95
Figura 2.18 Deflectómetro en Furgoneta (Geófonos – Computadora – Placa de Carga)	95
Figura 2.19 Deflectómetro en Remolque.....	96
Figura 2.20 Imagen Ilustrativa - Corte del aparato triaxial y relaciones utilizadas.	100
Figura 3.1 ESQUEMA DE UBICACIÓN DE LA VÍA LIB22S.....	105
Figura 3.2 ESQUEMA DE UBICACIÓN DE LA VÍA CAB17N	106
Figura 3.3 Correlaciones típicas del módulo resistente a las propiedades empíricas del suelo y categorías de clasificación. (Modificado de NAPA Information Series 117, "Pautas para el uso de superposiciones HMA para rehabilitar pavimentos PCC", 1994).....	110
Figura 3.4 Valores típicos de Coeficiente de Poisson de materiales que forman un pavimento	111

Figura 3.5 Columnas retomadas de cuadro de datos proporcionados por el MOP para realizar análisis estadístico.	113
Figura 3.6 Histograma y polígono de frecuencia superpuestos carretera en La Libertad	115
Figura 3.7 Histograma y polígono de frecuencia superpuestos carretera en Cabañas.	116
Figura 3.8 Prueba “P” muestra de datos calle LIB22S a Tamanique	117
Figura 3.9 Prueba Q para muestra de datos LIB22S a Tamanique	117
Figura 3.10 Prueba P para muestra de datos CAB17N Tejutepeque a Jutiapa	118
Figura 3.11 Prueba Q para muestra de datos CAB17N Tejutepeque a Jutiapa.....	118
Figura 3.12 Grafico de datos normalizados muestra LIB22S	119
Figura 3.13 Grafica de datos normalizados muestra CAB17N.....	119
Figura 3.14 Herramienta de Microsoft Office Excel para análisis estadístico de datos.	120
Figura 3.15 Eje de referencia para coordenadas de puntos de ensayo, PITRA PAVE	124
Figura 3.16 Ubicación al eje del carril, ensayo FWD.....	124
Figura 3.17 Interfaz de Oracle VM. Software para virtualizar sistemas operativos	126
Figura 3.18 Sistema Operativo Virtualizado	127
Figura 3.19 Inicializando el software Bisar 3.0	128
Figura 3.20 Comenzando un nuevo proyecto en Bisar 3.0	128
Figura 3.21 Primera hoja, información relativa a las cargas.....	129
Figura 3.22 Primera hoja, información relativa a las cargas.....	129
Figura 3.23 Hoja dos, información sobre las capas que componen la estructura de pavimento	130
Figura 3.24 Hoja tres, información de ubicación de las llantas del vehículo.	131
Figura 3.25 Opción para realizar el análisis de datos.	133
Figura 3.26 Cuadro de Dialogo para elegir la manera de presentar los datos	134
Figura 3.27 Cuadro de Resultados	134
Figura 3.28 Tabla de Resultados 1	135
Figura 3.29 Tabla de Resultados 2	135
Figura 3.30 Tabla de Resultados 3	136
Figura 3.31 Tabla de Resultados ID5956.....	136
Figura 3.32 Tabla de Resultados ID10900.....	137
Figura 3.33 Pantalla de Inicio 3D Move.....	138
Figura 3.34 Elección de Sistema de Unidades.....	139
Figura 3.35 Información del Proyecto	139
Figura 3.36 Selección de Tipo de Análisis	141
Figura 3.37 Definiendo el tipo de Caso de Carga	142

Figura 3.38 Descripción General de Interfaz.....	144
Figura 3.39 Datos Propios de la Estructura de Pavimento.....	145
Figura 3.40 Ingresando Características y Numero de Capas.....	146
Figura 3.41 Ingresando propiedades de cada capa	146
Figura 3.42 Capa numero 2	147
Figura 3.43 Propiedades Capa 3	148
Figura 3.44 Ubicación de Cargas.....	149
Figura 3.45 Datos de Salida.....	150
Figura 3.46 Formas de Solicitar los datos de Salida	150
Figura 3.47 Datos de salida de 3D MOVE	151
Figura 3.48 Datos de salida de 3D MOVE	151
Figura 3.49 Datos de salida de 3D MOVE	152
Figura 3.50 Ventana de Inicio PITRA-PAVE	153
Figura 3.51 Sistema de Unidades - PITRA PAVE.....	154
Figura 3.52 Establecer Cargas a utilizar por el Programa, PITRA PAVE.....	155
Figura 3.53 Verificación de radio de carga igual al radio de la Placa de Carga del FWD (0.15m)	155
Figura 3.54 Propiedades de cada capa del pavimento. PITRA PAVE	156
Figura 3.55 Asignar puntos de Medición del Pavimento	157
Figura 3.56 Calcular Datos de salida PITRA PAVE	157
Figura 3.57 Pestaña Esfuerzos	158
Figura 3.58 Pestaña Deformaciones.....	158
Figura 3.59 Pestaña Deflexiones	158
Figura 3.60 Exportar resultados a Microsoft Excel, PITRA PAVE	158
Figura 3.61 Datos de respuesta exportados a Excel.....	159
Figura 3.62 Tabla de resultados exportados a hoja de calculo ID5956.....	160
Figura 3.63 Tabla de resultados exportados a hoja de calculo ID10900.....	161
Figura 3.64 Icono para inicializar la aplicación.....	162
Figura 3.65 Pantalla inicial de Windepav	163
Figura 3.66 Elección de modelo de carga.....	164
Figura 3.67 Calculadora Modulo de Elasticidad	166
Figura 3.68 Botón para Calcular y Analizar.....	167
Figura 3.69 Resultados en pantalla.....	167
Figura 3.70 Archivos de respuesta exportados a Excel	168
Figura 3.71 Tabla de resultados exportados a Excel ID5956.....	168

Figura 3.72 Tabla de resultados exportados a Excel ID10900.....	169
Figura 4.1 Comparación de resultados BISAR 3.0 vs FWD LIB22S	174
Figura 4.2 Comparación de resultados BISAR 3.0 vs FWD CAB17N	175
Figura 4.3 Comparación de resultados 3D MOVE vs FWD LIB22S.....	177
Figura 4.4 Comparación de resultados 3D MOVE vs FWD CAB17N.....	178
Figura 4.5 Comparación de resultados PITRA PAVE vs FWD.....	180
Figura 4.6 Comparación de resultados PITRA PAVE vs FWD CAB17N.....	181
Figura 4.7 Comparación de resultados WINDEPAV vs FWD.....	183
Figura 4.8 Comparación de resultados WinDEPAV vs FWD CAB17N.....	184
Figura 4.9 Tabla Resumen Resultados para vía LIB 22 S	185
Figura 4.10 Tabla Resumen Resultados para vía CAB17N	185
Figura 4.11 Análisis y comparación de datos vía LIB22S	186
Figura 4.12 Análisis y comparación de datos vía CAB17N	187

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Periodos de Diseño Según Tipo de Carretera.....	50
Tabla 2.2 Factor Por Distribución Por Carril DL	52
Tabla 2.3 Niveles Recomendados de Confiabilidad (R).....	54
Tabla 2.4 Valores de Desviación Estándar	58
Tabla 2.5 Valores de Desviación Estándar	63
Tabla 2.6 Valores de Desviación Estándar	63
Tabla 3.1 Propiedades de las capas, proyecto Ruta LIB22S Tramo LIB16S – Tamanique	107
Tabla 3.2 Propiedades de las capas, proyecto Ruta CAB17N Tramo Tejutepeque-Jutiapa	107
Tabla 3.3 Valores de Modulo de Elasticidad	109
Tabla 3.4 Frecuencia de Clases para muestra de datos para calle en La Libertad.....	114
Tabla 3.5 Frecuencia de Clases para muestra de datos para calle en Cabañas.	115
Tabla 3.6 Resultados de datos obtenidos por la herramienta Análisis de datos	121
Tabla 3.7 Intervalo de Confiabilidad al 95 % para muestras analizadas.	122
Tabla 3.8 Datos para proyecto 1 “Tramo de Int. LIB 22S a Tamanique	123
Tabla 3.9 Datos para proyecto 2 “Tramo de Tejutepeque a Jutiapa”	123
Tabla 3.10 Propiedades de Carretera LIB16S	125
Tabla 3.11 Datos a utilizar para la modelación de la carretera LIB16S.....	125
Tabla 3.12 Propiedades Carretera CAB17N	125
Tabla 3.13 Datos a utilizar para la modelación de la carretera CAB17N	125

Tabla 3.14 Información relativa a las cargas.....	132
Tabla 3.15 información Relativa a las Capas.....	132
Tabla 3.16 Información relativa a las cargas.....	165
Tabla 3.17 Información relativa a las capas.....	165
Tabla 4.1 Evaluación de características de los software.....	172
Tabla 4.2 Tabla comparativa FWD vs BISAR 3.0 de la Vía LIB16S.....	173
Tabla 4.3 Tabla comparativa FWD vs BISAR 3.0 de la Vía CAB17N.....	173
Tabla 4.4 Tabla comparativa FWD vs 3D MOVE de la Vía LIB16S.....	176
Tabla 4.5 Tabla comparativa FWD vs 3D MOVE de la Vía CAB17N.....	176
Tabla 4.6 Tabla Comparativa FWD vs PITRA PAVE Vía LIB22S.....	179
Tabla 4.7 Tabla comparativa FWD vs PITRA PAVE de la Vía CAB17N.....	179
Tabla 4.8 Tabla comparativa FWD vs WinDEPAV de la Vía LIB16S.....	182
Tabla 4.9 Tabla comparativa FWD vs WinDEPAV de la Vía CAB17N.....	182
Tabla 4.10 Comparación de Desviaciones en los resultados de la modelación comparados con el FWD vía LIB16S.....	187
Tabla 4.11 Comparación de Desviaciones en los resultados de la modelación comparados con el FWD vía CAB17N.....	188

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-1 Deformacion en cada Eje coordneado.....	9
Ecuación 2-1 Módulo de elasticidad o módulo de Young (E).....	28
Ecuación 2-2 Formula Empírica Guía de Diseño AASHTO 1993.....	49
Ecuación 2-3 Tráfico Total en Ambas Direcciones.....	51
Ecuación 2-4 Índice de Serviabilidad Inicial.....	52
Ecuación 2-5 Factor Equivalente de Carga LEF.....	53
Ecuación 2-6 Variación Total del Índice de Serviabilidad.....	56
Ecuación 2-7 Corrección por temperatura en el Deflectometro de Impacto.....	92
Ecuación 2-8 Coeficiente de corrección por temperatura para el Deflectometro de Impacto.....	93
Ecuación 3-1 Relación entre el Módulo de Resiliencia y el CBR de cada material.....	109
Ecuación 3-2 Relación entre el radio de contacto de una llanta y la carga en el neumático.....	112

INTRODUCCIÓN

Las vías de comunicación en El Salvador hasta diciembre de 2016 estaban compuestas por un total de 3748.83 km de vías interurbanas pavimentadas, de las cuales un 86% corresponden a pavimento flexible, por ser este uno de los sistemas constructivos más utilizados en carreteras, existe un gran número de instituciones que realizan estudios para el desarrollo de nuevos métodos de diseño, o la actualización de los métodos existentes.

La presente investigación denominada “MODELACIÓN MULTICAPA ELÁSTICA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES EN EL SALVADOR MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SOFTWARE” muestra las evaluaciones realizadas de cada uno de los modelos analíticos para las vías LIB16S tramo de LIB22S a Tamanique y CAB17N tramo de Tejutepeque a Jutiapa obteniendo las deflexiones (δ) en el eje del carril, por medio del método multicapa elástica, este método pertenece a una corriente cada vez más aceptada y reconocida, la corriente Mecanicista-Empírica, en la que se hace uso de toda la experiencia acumulada adicionando los cálculos que involucran las propiedades mecánicas y el comportamientos de los materiales que componen la estructura de pavimentos analizada.

En muchos países donde se aplica la modelación, esta se lleva a cabo mediante la aplicación de software. En la presente investigación se utilizarán los Software: BISAR 3.0, 3D Move, PITRA-PAVE y WinDePAV, esto con el propósito de seleccionar el software que genere la respuesta más cercana con los resultados obtenido por el Deflectómetro de Impacto (FWD).

El documento recopila el proceso para poder determinar el software que cumpla la condición antes mencionada el cual esta subdivido en 4 diferentes capítulos.

El primer capítulo denominado “Generalidades” consiste en una breve reseña histórica de cómo comenzó a utilizarse y aplicarse el método mecanicista empírico y como las teorías fueron cambiando hasta que se lograron definir las que son utilizadas actualmente por los software de análisis multicapa elástica.

El segundo capítulo, titulado “Marco Teórico” es una recopilación de todo los conceptos, parámetros y peculiaridades que están involucradas para poder desarrollar una correcta modelación de los datos de entrada de la vía que se esté analizando y así generar el análisis de la misma.

El capítulo “Modelación con Software” abarca una pequeña reseña acerca de los software que serán utilizados. En esta sección se introduce la información otorgada por el Ministerio de Obras Publicas de las vías en análisis para que esta fuese procesada. Se incluye una guía práctica sobre como utilizar cada software así como una serie de ejemplos con los datos depurados. Esta depuración tiene un proceso estadístico específico para elegir los datos más representativos de la muestra obtenida.

El capítulo 4 denominado “Análisis de Resultados” hace una evaluación de la eficiencia de los software desde el punto de vista de los investigadores y la elección del software cuyos resultados son los más cercanos a los que se comparan de la fuente obtenida por el MOP.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

El uso de modelos (a veces llamado modelación) nos permite conseguir una abstracción lógico-matemática del mundo real que facilita la comprensión del problema a resolver.¹

A continuación, se exponen en orden cronológico los diferentes autores y teorías de modelación que se han publicado, hasta culminar en la actualidad con la teoría de multicapa elástica.

1.1.1 DESARROLLO HISTÓRICO DE LA MODELACIÓN DE PAVIMENTOS.

La modelación de pavimentos comenzó a desarrollarse a finales del siglo XIX en Francia de la mano del matemático Valentín Boussinesq, quien en el año de 1885 planteó la primera teoría de modelación. Posteriormente en 1926 en Dinamarca el Ingeniero Westergaard partió del trabajo de Boussinesq para crear su modelo, agregando variaciones debido a temperatura y cargas de tránsito.

Entre 1938 y 1944 en Inglaterra Albert Hubert Arthur Hogg presentó su modelo considerando para el análisis por primera vez al pavimento como una estructura multicapa. Para 1945 en Estados Unidos de América, Donald M. Burmister propuso su propia teoría de modelación de pavimentos considerando cada capa,

¹ APROXIMACIÓN A LA INGENIERÍA DEL SOFTWARE - Sebastián Rubén Gómez Palomo y Eduardo Moraleda Gil.

sus espesores, composición y características como sus módulos de Elasticidad y Poisson.

A partir de lo propuesto por Burmister, en 1975 los estadounidenses Yoder y Witzack publicaron una generalización del modelo multicapa definiendo los parámetros sobre los cuales se basan los softwares utilizados al día de hoy para la modelación.

En base a todos estos estudios, se comenzó a programar software para que pudieran realizar los cálculos de manera más eficiente. Los Softwares que actualmente son más utilizados en el modelado MCE (Multicapa Elástica), son los siguientes:

3D MOVE de la Universidad de Nevada.

BISAR de la empresa SHELL.

WinDEPAV de la Universidad del Cauca.

PITRA-PAVE de LanammeUCR.

TEORÍAS DE MODELACIÓN DE PAVIMENTOS COMO UNA SOLA CAPA.

1.1.2 MODELO DE BOUSSINESQ (1885).

El primer modelo usado para determinar la distribución de esfuerzos en un pavimento surge gracias al matemático francés Joseph Valentín Boussinesq, quien en 1885 propuso una serie de ecuaciones para determinar los esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones a cualquier profundidad de la masa de suelo, su estudio se basó en una carga estática concentrada que puede ser

extrapolada como un área circular, dicha carga actúa sobre un semi-espacio infinito en planta y profundidad, considerando además que el mismo es continuo, homogéneo, isótropo y elástico lineal, con un módulo de elasticidad “ E ” y una relación de Poisson “ ν ” (Ver Figura 1.1).

Este primer modelo desarrollado por Boussinesq puede ser aplicado solamente en pavimentos cuya estructura y subrasante posean módulos de elasticidad muy similares, estando lejos de representar una masa de suelo real, no obstante, se simplifica el análisis matemático que impone dicha masa².

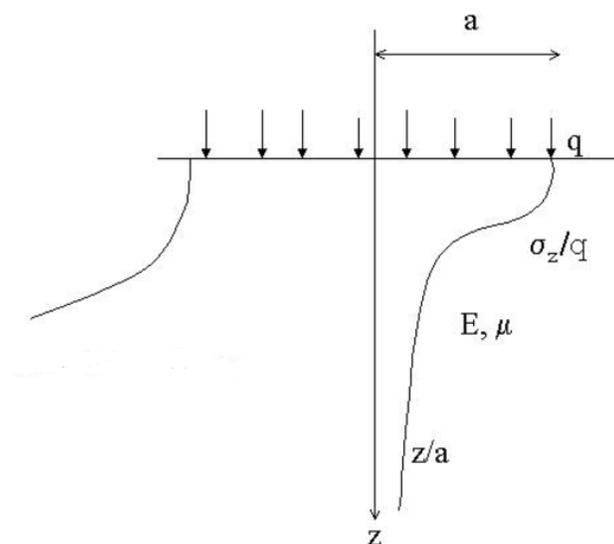


Figura 1.1 Modelo de Boussinesq (1885)

Difusión del Esfuerzo Vertical σ_z .

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos

² DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Fredy Alberto Reyes

1.1.3 MODELO DE WESTERGAARD 1926.

Westergaard en 1926 utilizó la teoría elástica de capas para predecir la respuesta de las cargas aplicadas por las ruedas en el pavimento, partiendo de la hipótesis de Boussinesq, obtuvo soluciones analíticas para las tensiones y las deflexiones debido a las variaciones de temperatura y a las cargas de tráfico aplicadas. En este análisis se asumió que el pavimento actúa como un sólido elástico homogéneo e isotrópico en equilibrio y el suelo soportante se asimila a una serie de resortes, y su funcionamiento se basa en que la reacción que el apoyo neumático transmite es proporcional al desplazamiento producido (Ver Figura 1.2).

La teoría de Westergaard difiere de otros modelos por las hipótesis que plantea, básicamente no coinciden en cuanto a la naturaleza de los materiales (elástica o viscoelástica), la tipología de las cargas, las condiciones de contacto entre capas (adherencia total, parcial o nula) y las condiciones de contorno³.

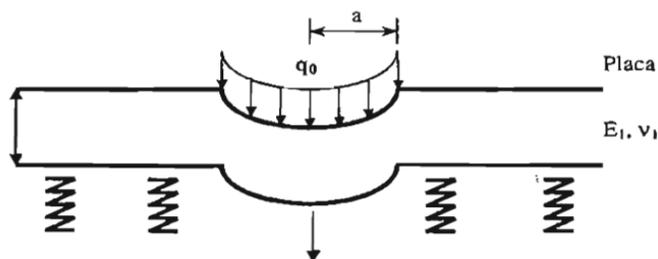


Figura 1.2 Modelo de Westergaard (1926)

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos

³ DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Fredy Alberto Reyes

TEORÍAS DE MODELACIÓN MULTICAPA ELÁSTICA DE PAVIMENTOS.

Las teorías mencionadas anteriormente idealizaban el pavimento flexible como una estructura de una sola capa, claramente esta idealización no proporciona datos verídicos, para presentar un modelo más apegado a las condiciones reales se plantearon teorías considerando el pavimento como una estructura multicapa.

Existen dentro de la teoría de capas elásticas dos modelos fundamentales, el modelo de Hogg y el modelo multicapas de Burmister.

1.1.4 MODELO DE HOGG 1944.

Albert Hubert Arthur Hogg presentó una solución matemática práctica con la cual simplificó el sistema multicapa elástico típico por un modelo equivalente bicapa el cual se compone de una capa rígida sobre un medio elástico. Su procedimiento se centraba en utilizar las deflexiones producidas en el centro de la carga y una deflexión adicional fuera del punto inicial de carga. Además, sus cálculos toman en cuenta las variaciones en el espesor del pavimento y la relación entre la rigidez de pavimento y la rigidez de la subrasante (VerFigura 1.3).⁴

⁴ ESTUDIOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS BASADOS EN LA INTERPRETACIÓN DE CURVAS DE DEFLEXIONES - Mario Hoffman- Pablo Del Águila.

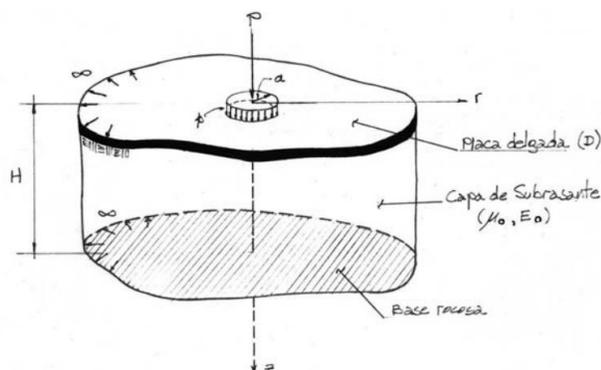


Figura 1.3 Modelo de Hogg (1944)

. Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones.

1.1.5 MODELO DE BURMISTER 1945.

Luego de la revolucionaria teoría Bicapa de Hogg, Donald M. Burmister propuso una teoría de modelación en la cual se tomaba en cuenta cada capa con su espesor, composición y características específicas (módulo de elasticidad y módulo de Poisson) con el fin de poder determinar el estado de esfuerzos a cualquier profundidad de la masa de suelos (Ver Figura 1.4).

Los estudios de Burmister introducen cálculos más complejos que los primeros modelos, ya que éste utiliza transformadas de Fourier, que a su vez necesitan de funciones de Basel para encontrar su solución, si se usan más de dos capas resulta casi imposible determinarlo en un periodo corto sin la ayuda de una computadora.⁵

⁵ DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS - Fredy Alberto Reyes

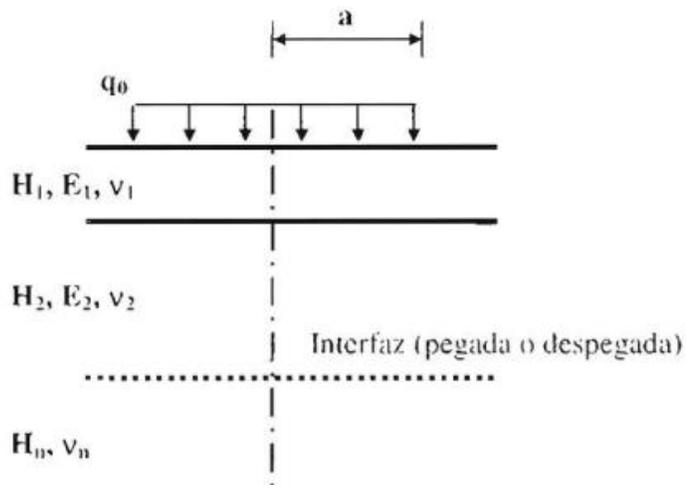


Figura 1.4 Modelo de Burmister (1945)

Fuente: Diseño Racional de Pavimentos

1.1.6 GENERALIZACIÓN DEL SISTEMA MODELO MULTICAPA POR YODER Y WITZACK, 1975.

En 1975 Yoder y Witzack publicaron la primera edición del libro titulado "Principles of Pavement Design", en el cual hicieron una generalización del modelo multicapa. Ellos definieron que en un punto dado dentro de cualquier capa del pavimento el equilibrio estático requiere de la existencia de nueve esfuerzos. Estos esfuerzos se componen de tres esfuerzos normales ($\sigma_z, \sigma_y, \sigma_x$) actuando perpendicularmente a la cara de cada elemento y seis esfuerzos cortantes ($\tau_{yx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$) actuando de manera paralela en cada cara, que por el equilibrio estático son iguales. (Ver Figura 1.5). La orientación de los elementos en el sistema es de tal forma que los esfuerzos de corte en cada cara son cero y los esfuerzos normales entonces son los principales.

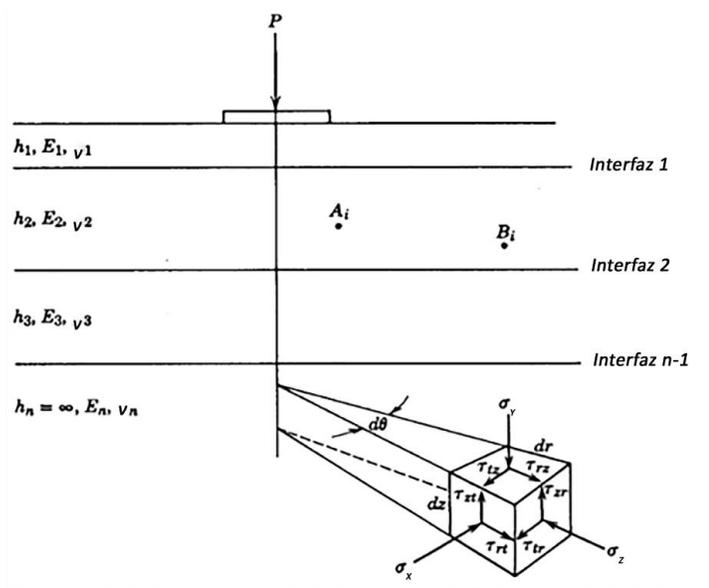


Figura 1.5 Generalización del Sistema Elástico Multicapa

Fuente: Principles of Pavement Design.

Cuando se aplica una carga simple sobre un área circular, los esfuerzos, deformaciones y deflexiones más críticos ocurren bajo el centro de la carga circular. En ese punto, los esfuerzos tangenciales y radiales son iguales.

Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones debajo de la placa pueden ser determinados con las siguientes ecuaciones (Ver Ecuación 1-1)

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_y + \sigma_x)] \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] \quad (2)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_x)] \quad (3)$$

Ecuación 1-1 Deformacion en cada Eje coordneado

Donde,

ν = Relación de Poisson.

E = Módulo de Elasticidad.

σ_z = Esfuerzo en dirección radial.

σ_y = Esfuerzo en dirección vertical.

σ_x = Esfuerzo en dirección tangencial.

La teoría elástica multicapa hace las siguientes suposiciones para la solución analítica del estado de esfuerzos y deformaciones en una estructura de pavimento⁶:

- Las propiedades de cada capa son homogéneas.
- Cada capa tiene un espesor finito, excepto la subrasante.
- Cada capa es isotrópica.
- En cada interfaz entre capas se desarrolla una fricción total.
- Entre dos estratos existe continuidad de esfuerzos.
- Los estratos se caracterizan por su Módulo de Elasticidad, Espesor y la razón de Poisson.

⁶ PRINCIPLES OF PAVEMENT DESIGN - Yoder & Witczak

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Salvador, como cualquier país en desarrollo, necesita de una red vial en óptimas condiciones que permitan mantener al país interconectado tanto interna como externamente, dicha red está sujeta a una constante ampliación y renovación por lo que se necesitan conocer los métodos de diseño recientes. Actualmente, en el país existen pocas investigaciones sobre la modelación de pavimento flexible bajo el método de análisis de multicapa elástica, por esta razón esta investigación busca sentar un precedente para actualizar las metodologías de diseño, dado que las tendencias cada vez apuntan más al desarrollo de métodos Mecanicista-Empírico.

Para comprender la importancia de la modelación de pavimentos flexibles en el país, es necesario hacer hincapié sobre la forma de diseño de su estructura. En la actualidad siguen predominando los métodos empíricos de diseño basados en la guía de AASHTO 93 “Guide for Design of Pavement Structures 1993” u otros que cumplan con las normas exigidas en el Manual Centroamericano para el diseño de pavimentos flexibles de la SIECA, mientras que, en Estados Unidos, país de origen de la guía AASHTO actualmente se diseña con la “Guía Empírico-Mecanicista de Diseño de Pavimentos” (MEPDG) en su versión 2015.

La metodología Mecanicista-Empírica de diseño de pavimento flexible tiene como proceso principal determinar su respuesta estructural, utilizando para ello la

modelación la cual arroja como respuesta la distribución de esfuerzos (σ), deformaciones unitarias (ϵ) y deflexiones (δ). El cálculo de estos parámetros se realiza considerando al pavimento flexible como un medio multicapa, en donde el comportamiento de los materiales se basa en la teoría de la elasticidad. El avance de este método respecto a los métodos empíricos es el uso de módulos elásticos para dar una mejor caracterización a los materiales, utilizar condiciones reales de tránsito por medio de espectros de carga y la incorporación de factores climáticos. Dado que en el país el clima es uno de los factores más influyentes en el comportamiento de los pavimentos flexibles, es conveniente actualizar los métodos de diseño que se utilizan para que estos sean más representativos a las condiciones de la zona.

La modelación de la estructura del pavimento flexible es fundamental para aplicar los métodos de diseño modernos basados en principios Mecanicistas- Empíricos; de manera que, para que exista desarrollo en el país en lo referente a vías terrestres es necesario adaptarse a la competencia mundial que exige procesos más óptimos y funcionales.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

- Realizar la modelación multicapa elástica de pavimentos flexibles en El Salvador mediante la aplicación de software.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Evaluar con los parámetros de diseño las carreteras LIB16S tramo LIB22S – Tamanique y CAB17N Tramo Tejutepeque Jutiapa, mediante la respuesta de los modelos analíticos utilizados por los softwares BISAR 3.0, 3D MOVE, WinDePav y PITRA-PAVE.
- Determinar la Distribución de esfuerzos (σ), deformaciones unitarias (ϵ) y deflexiones (δ) mediante la realización de modelos multicapa elástica de los tramos en estudio.
- Determinar el software más indicado para ser usado en la modelación de pavimentos en El Salvador en base a la comparación de datos obtenidos por los softwares en estudio y el ensayo FWD.

1.4 ALCANCES

- Se realizará la modelación multicapa elástica de pavimentos flexibles en las carreteras LIB16S tramo LIB22S – Tamanique y CAB17N Tramo Tejutepeque Jutiapa de El Salvador, mediante la aplicación de los softwares BISAR 3.0, 3D MOVE, WinDePav y PITRA-PAVE, utilizando los datos de diseño dados por el Ministerio de Obras Públicas.
- La investigación busca sentar un precedente para el desarrollo de las metodologías de diseño de pavimentos flexibles que se utilizan actualmente en el país, dado que las tendencias en cuanto a investigación de metodologías de diseño de pavimentos cada vez apuntan más al desarrollo de métodos Mecanicista-Empírico.
- Mediante la realización de modelos multicapa elástica de los tramos en estudio se pretende determinar su distribución de esfuerzos (σ), deformaciones unitarias (ϵ) y deflexiones (δ).

1.5 LIMITACIONES

- Debido al tiempo y a la poca disponibilidad de datos el análisis se realizará únicamente en dos tramos de pavimento flexible en El Salvador.
- La modelación se realizará dentro del rango elástico del pavimento flexible.
- La imposibilidad de realizar ensayos de laboratorio pertinentes para obtener el Módulo de Elasticidad y la Relación de Poisson, requerirá que se utilicen valores ya definidos en literatura conocida sobre el tema.
- El equipo FWD es muy difícil de conseguir, ya que posee un costo elevado, es necesario importarlo y las gestiones para uso académico demoran mucho tiempo, además de las condiciones y restricciones para el uso del mismo, como: coordinación con la Policía Nacional Civil, petición de cuadrilla de banderilleros, uso en horario nocturno o en horas de la madrugada, entre otras.
- Los software a utilizar requieren que se genere un ambiente de programación propio, compatible al sistema operativo para el cual se diseñaron.
- El presente estudio no pretende reformar el método de diseño de pavimento actual, dado que excede los alcances de la investigación, en cambio busca sentar un precedente para el desarrollo de las metodologías mecanicistas-empíricas.

1.6 JUSTIFICACIÓN

En nuestro país, El Salvador, el diseño de pavimentos flexibles se ha elaborado desde sus inicios siguiendo los procedimientos propuestos por la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes o por sus siglas en inglés AASHTO, de los cuales el más utilizado es la “Guide for Design of Pavement Structures” en su versión del año 1993. Se sabe actualmente que hubo una actualización de la guía en el año 2015.

Una de las principales limitantes de la Guía empírica de AASHTO 1993 es que no estudia de manera apropiada los efectos producidos por los esfuerzos, deformaciones, deflexiones o el efecto aplastante producido por las cargas vehiculares. Su diseño está basado en nomogramas que idealizan la mayoría de los parámetros, lo cual puede resultar en secciones sobradas que no son óptimas para las condiciones reales que se viven o, por otro lado, espesores que no son capaces de soportar las cargas a las que se encuentra expuesta la estructura.

En El Salvador no existen muchas referencias sobre investigaciones bajo el método de análisis de multicapa elástica, razón por la cual es importante y necesario realizar un estudio de este tipo para conocer las metodologías de modelación de estructuras de pavimento flexible mediante el método de estudio que se propone y así poder comparar de manera objetiva los resultados que se obtengan utilizando los diferentes softwares.

La presente investigación comprende el análisis por el método de multicapa elástica de dos tramos de carretera de pavimento flexible en El Salvador, por medio de la modelación en varios softwares y la comparación de resultados, con el propósito de predecir esfuerzos, deformaciones y deflexiones a los que es sometido el diseño inicial de dichas vías.

Se decidió utilizar los softwares BISAR 3.0, 3D MOVE, WinDePav y PITRA-PAVE por sus ventajas para analizar las estructuras de pavimentos flexibles. Estos nos permiten modelar las estructuras de pavimento flexible basados en las propiedades de sus capas, espesores y el tipo de carga que soportan. Además, su interfaz facilita tanto el manejo como el procesamiento de datos, su capacidad de proceso permite obtener resultados refinados en poco tiempo y utiliza pocos recursos en el equipo, haciéndolos una herramienta práctica y útil para el desarrollo de esta investigación.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

Toda investigación independientemente de su complejidad o de la extensión de los tópicos que abarque, requiere de una fuente o una base bibliográfica y teórica la cual permita respaldar los supuestos e hipótesis planteadas. A continuación, se presenta el marco teórico que respalda la investigación, así como a las hipótesis y situaciones planteadas en la formulación de la misma.

2.1 CONCEPTO GENERAL DE MODELACIÓN

Para la mayoría de los trabajos de ingeniería es muy habitual utilizar prototipos o maquetas. Estos modelos facilitan al ingeniero la labor de comprensión de los problemas que se plantean en el nuevo sistema a desarrollar.

Un modelo es un bosquejo que representa un conjunto real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de lo que existe en la realidad. Los modelos son muy útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente en la realidad en sí.

La realización de un modelo mediante un software tiene como objetivo entender mejor el funcionamiento requerido y facilitar la comprensión de los problemas planteados. Sin embargo, con esto no se busca, en principio, un modelo físico de su comportamiento. En este caso el sistema software deberá efectuar de una forma más o menos compleja un determinado tratamiento de la información.

Hay que tener en cuenta que cuando se cita el término “modelo”, en este proyecto de investigación, se refiere a un modelo desarrollado aplicando un software. No se debe confundir este modelo con una maqueta o prototipo.

2.1.1 GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN

Hay diversos tipos de modelos en uso y todos diferentes entre ellos según el propósito que se persiga. La diversidad va desde el más básico modelo físico como puede ser una estatua o maqueta, hasta modelos muy complicados que sólo pueden utilizarse empleando computadoras de alto rendimiento.

A continuación, se describen algunas características que todo modelo debe cumplir ⁷:

1. Abstracto: Simplificación de la realidad.
2. Comprensible: Expresado de tal forma que se pueda entender fácilmente.
3. Preciso: Representa fielmente el sistema modelado.
4. Predictivo: Se puede utilizar para obtener conclusiones correctas sobre el sistema.
5. Barato: Más económico que construir y estudiar el propio sistema.

⁷ Bran Selic, —ThePragmaticsof Model-DrivenDevelopmentII, IEEE Software, 20(5), 2003.

Los requisitos primordiales para construir cualquier modelo, independientemente de su naturaleza (física o virtual) son los siguientes:

1. Tener un propósito claramente definido.
2. Identificar las consideraciones esenciales que deben estar incluidas en el modelo.
3. Desechar consideraciones superfluas (estas son fuente de confusión).
4. El modelo debe representar la realidad en forma simplificada.

2.1.2 MODELACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

La modelación multicapa de pavimento toma en cuenta todas las propiedades particulares de cada capa, que es el tipo de análisis con el que se diseñara el pavimento. Este procedimiento de análisis permite establecer las características mecánicas de una estructura de pavimento mediante un proceso de evaluación integral y la compatibilidad del comportamiento real con el simulado.

El objetivo parcial de la modelación es obtener las características de resistencia de los diferentes materiales constitutivos de la estructura, de manera que reflejen en el modelo un comportamiento similar al medido en el terreno.

Para efectos prácticos entenderemos “Modelación de Pavimentos Flexibles” como el procedimiento, que es una parte fundamental para el diseño del pavimento flexible por el método mecanicista-empírico y que permite conocer comportamientos específicos de una estructura de pavimento a partir de sus

propiedades físicas y mecánicas. Entre estas propiedades podemos mencionar el espesor de sus capas, número de sus capas, el tipo de material que compone cada capa para determinar módulos de elasticidad, módulos de Poisson, CBR entre otros; además de estos hay factores externos que de igual manera se toman en cuenta para su análisis como pueden ser la temperatura, el TPDA (Tráfico Promedio Diario Anual) y el tipo de clima del lugar en el que se realiza el análisis.

Debido a la complejidad del análisis que conlleva el proceso de modelación, este método ha tomado fuerza gracias a la aplicación de software que nos permite simplificar el cálculo y obtener la información esperada de manera práctica.

Normalmente los procesos de modelación se utilizan para poder conocer las deflexiones, las deformaciones y la distribución de esfuerzos de un paquete estructural en específico, esto permite facilitar el diseño de los pavimentos, este proceso se ha incorporado y ha sido utilizado constantemente por la corriente Mecanicista-empírica de diseño que cada vez está cobrando más fuerza en la mayoría de los países a la hora de diseñar sus calles, carreteras, autopistas, etc.

2.2 PARÁMETROS DE LA MODELACIÓN.

Desde los inicios de las primeras propuestas de modelación, los diferentes autores iban proponiendo e innovando con cada una de sus teorías, estas incluían cambios sustanciales que iban desde considerar el número de capas, tomar en cuenta los materiales que componen cada capa, el espesor de cada

capa, las propiedades mecánicas de los materiales y hasta factores externos que afectan tanto de manera directa como indirecta el pavimento.

Debido a esto se listará y desglosara los parámetros necesarios que serán utilizados por los softwares de modelación para realizar el respectivo análisis multicapa de las vías elegidas. Los parámetros que se utilizaran para la modelación son los siguientes:

2.2.1 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.

Se denomina **Estructura de Pavimento** al espesor total que compone la estructura que se está analizando, siendo esta del tipo **Flexible**.

La Estructura de Pavimento se subdivide en varias capas las cuales son las que aportan la resistencia necesaria para la serviciabilidad para la cual se espera trabaje, las capas más comunes en las cuales se subdivide son:

- **Sub-rasante**
- **Sub Base**
- **Base**
- **Superficie de Rodadura**

2.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD.

El módulo de elasticidad es una constante que se aplica para todos los materiales isotrópicos y homogéneos que cumplen con la ley de Hooke la cual permite a los sólidos que son sometidos a esfuerzos disipar esa energía gracias a la capacidad elástica que es característica de cada material.

Esta manera de disipar energía consiste en deformarse hasta el punto que sean capaces de soportar el esfuerzo al cual se están sometiendo, posteriormente a esto gracias a la elasticidad del material estos pueden regresar a sus dimensiones originales. Cabe resaltar que la esta capacidad elástica de los cuerpos es propia y característica de cada tipo de material por lo cual es correcto asumir que esta propiedad variara de un sólido a otro.

Este módulo de elasticidad puede ser determinado mediante ensayos de laboratorio, el ensayo utilizado para poder obtener la información requerida se denomina Ensayo de Tracción y también puede realizarse mediante un Ensayo de Compresión.

Una manera general de describir este término es la siguiente: se define como la relación lineal elástica entre un esfuerzo aplicado y la correspondiente deformación producida en dicha dirección de aplicación.

Dicho de otra manera, el módulo de elasticidad es la relación esfuerzo-deformación que solo puede existir cuando el suelo se comporta de una manera relativamente elástica, es decir que al ser sometido a una carga y deformarse,

este recupera su estado inicial al ser retirada la carga, desapareciendo la deformación.

La definición anterior, está basada en el modelo elástico lineal que en 1678 estableció Robert Hooke².

2.2.3 CARGAS DE TRÁFICO, TPDA.

La principal y casi exclusiva carga a la cual se ven expuestos los pavimentos es el tránsito, los vehículos que a diario transitan sobre ellos. Para el análisis y diseño de vías se realiza una estimación de la acumulación de vehículos que soportara a lo largo de toda su vida útil lo cual se simplifica al convertirse en un sistema de Ejes Equivalentes.

Uniformizar el tipo de carga permite un mejor análisis para el diseño de los espesores de las capas que conforman la estructura de pavimento.

Para esto se define un tipo en particular de vehículo, a partir del cual se hacen los análisis en base a la influencia que este genera en la estructura que se está estudiando.

El manual de la SIECA considera para efectos de cálculo que un Eje Equivalente corresponde a un Eje de Carga que produzca el mismo daño y efecto físico que el de un camión que pese 80kN o como su equivalente de 18 kips. De la misma manera el manual AASHO considera la carga como 80 kN o como su equivalente de 18 kips)

El tránsito es la carga a la que estará expuesta la estructura de pavimento la cual se medirá o se registrará en base al TPDA, el cual se puede definir como el Tránsito Promedio Diario Anual. Y se mide en base al tráfico registrado a cierta hora en cierta vía el cual es extrapolado con factores diurnos, nocturnos, diarios, semanales, mensuales y anuales.

2.2.4 RELACIÓN DE POISSON.

El módulo de elasticidad no es suficiente parámetro para determinar la relación esfuerzo-deformación de un suelo en todas las direcciones. Al aplicarse al cuerpo una carga de tensión en la dirección i , a pesar que la deformación unitaria causada en dicha dirección obedece la Ley de Hooke, el cuerpo no sólo se extiende en la dirección de la tensión, sino que se contrae en los otros dos ejes j y k , sufriendo deformaciones respectivas ϵ_j y ϵ_k .

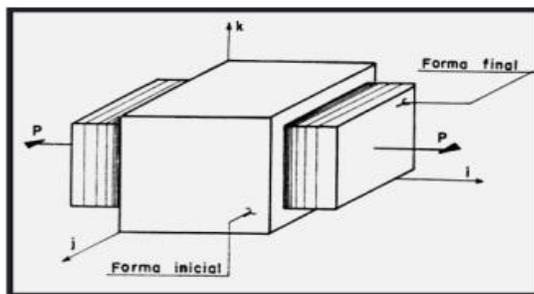


Figura 2.1 Relación de Poisson, efecto de la aplicación de carga en un elemento.

[Avendaño, 2005].

Este comportamiento fue definido por el científico Francés Simeón Denis Poisson quien observó que cuando un cuerpo se acortaba por efecto de una compresión, éste se alargaba en la dirección perpendicular a la compresión, de igual manera, si el cuerpo se alargaba por efecto de tracción, éste disminuía su ancho en la dirección perpendicular a la tensión. (Ver Figura 2.1)

La relación de Poisson es una propiedad de los materiales elásticos y es definida como: —La relación entre la deformación unitaria en una dirección no esforzada (ϵ_j ó ϵ_k) y la deformación unitaria en la dirección esforzada (ϵ_i).

Se conoce como relación de Poisson a el comportamiento de un cuerpo el cual cuando se somete a una fuerza se deformará en dirección a esta fuerza. Sin embargo, siempre que se producen deformaciones en dirección de la fuerza aplicada, también se producen deformaciones laterales⁸.

Las deformaciones laterales tienen una relación constante con las deformaciones axiales, por lo que esta relación es constante, siempre que el material se encuentre en el rango elástico de esfuerzos, o sea que no exceda el esfuerzo del límite proporcionalidad; la relación es la siguiente:

$$\nu = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

⁸ Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de El Salvador. “página 106

Donde ϵ es la deformación unitaria y ν es el coeficiente de Poisson, llamado así en honor de Siméon Denis Poisson el que propuso este concepto en 1828. El coeficiente de Poisson depende indirectamente del módulo de elasticidad o módulo de Young (E), del módulo de rigidez o de cizalladura (G), la cual se puede expresar de esta manera (Ver ecuación 2.1):

$$E = 2G (\nu + 1)$$

Ecuación 2-1 Módulo de elasticidad o módulo de Young (E)

Cabe recalcar que el rango de valores para el coeficiente es muy pequeño, oscila dentro 0,25 y 0,35; habiendo excepciones, muy bajos como para algunos concretos ($\nu = 0,1$), o muy altos como lo es para el hule ($\nu = 0,5$), el cual es el valor más alto posible.

2.2.5 PROPIEDADES DE MATERIALES PARA SUB-BASE Y PARA LA BASE.

Como se utilizan diferentes tipos de materiales para formar la sub base y la base con el fin de no obtener estructuras con precios altos suelen utilizarse diferentes tipos de suelos que pueden o no ser tratados antes de ser utilizados.

El material que se utiliza para la sub base suele depender en muchas ocasiones de la capacidad portante del suelo de soporte bajo este (Sub-rasante) y en base al aporte que este puede hacer para poder satisfacer los valores admisibles de deformación vertical provocada por las cargas a las cuales estará expuesta.

La sub-base puede ser conformada por material granular, por algún tipo de suelos tratados y estabilizado y si las condiciones son lo suficientemente adecuadas podría incluso no ser necesaria la colocación de la sub-base.

Esta capa no resistirá tanta carga como la base por lo tanto su calidad puede ser menor

Por otro lado, la capa de la base suele estar sometida a solicitaciones importantes, por lo que los materiales que las constituyen deben tener una muy buena calidad. La base puede ser conformada de la misma manera por suelos estabilizados o por material granular siempre y cuando estos sean capaces de resistir la carga y ser capaz de aportar la resistencia necesaria para que toda la estructura de pavimento funcione de la manera que se espera.

Entre las propiedades que nos interesa conocer de la sub base y de la base podemos mencionar:

- **Espesor:** ancho formado por determinada cantidad de material que conforme ya sea la base o la sub base
- **Módulo de Elasticidad:** Capacidad del Suelo para deformarse debido a cargas externas y de regresar a su dimensión original.
- **La relación de Poisson:** Tendencia del suelo a sufrir deformación en los dos sentidos restantes a la vez que presenta deformación en su sentido axial
- **CBR.** Se determina mediante un ensayo que lleva su mismo nombre, es el que permite determinar la resistencia que posee la capa al esfuerzo cortante

y también poder evaluar la calidad del suelo para poder ser utilizado como capa en un pavimento.

- **Alta resistencia a la deformación:** su deformación o la deformabilidad de la capa de la base se verifica a partir de medidas de deflexiones o también pueden ser aceptados ensayos de placas para esta capa. Esta última tiene menores requisitos ya que los esfuerzos a los cuales se verá sometidos serán menores a los que se encuentra la base, no obstante, es importante contar con una estructura que sea capaz de soportar adecuadamente la base.

2.2.6 PROPIEDADES DE MATERIALES PARA CARPETA DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.

Se define como mezcla asfáltica en caliente a la combinación de agregados con un ligante. La cantidad relativa de ligante y de agregado determinan las propiedades físicas de la mezcla.

De todas las capas esta es la que será expuesta directamente al efecto de las cargas y será la primera en presentar los efectos del aplastamiento, las deflexiones, los desplazamientos y la distribución de esfuerzos a la cual estarán sujetos a lo largo de toda su vida útil.

Es importante que podamos listar y conocer todas las propiedades mínimas con las cuales debe contar la carpeta de mezcla asfáltica de antemano, para que de

esta manera el diseño no sea deficiente y seamos capaces de conocer cómo se comportara la carpeta ante las condiciones a las cuales estará sometida.

Algunas de las propiedades más importantes de la carpeta de mezcla asfáltica en caliente son:

- **Granulometría:** La cual es la distribución de los diferentes tamaños de las partículas las cuales usualmente varían para ser clasificadas y utilizadas en carpetas de rodado y bases.
- **Estabilidad:** es la capacidad que posee la mezcla asfáltica para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos, ondulaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.
- **Durabilidad:** comprende todas las características que permiten a la mezcla asfáltica dar una mayor vida de servicio, como puede ser:
 - Resistencia de la mezcla asfáltica a endurecerse durante la operación de la mezcla
 - Resistencia al efecto abrasivo del tránsito
 - Resistencia a la acción destructiva de los agentes atmosféricos (aire, agua, cambios de temperatura)
 - Flexibilidad suficiente para resistir roturas por la aplicación repetidas de las cargas.

- **Resistencia a la fatiga:** esta propiedad permite reducir a gran medida las grietas formadas por la repetición de cargas. La repetición de carga puede llegar a formar microgrietas las cuales a su vez forman macro grietas.
- **Resistencia al Deslizamiento:** Es la capacidad que tiene el pavimento de proporcionar una fricción adecuada en el interfaz neumático - calzada de rodamiento para obtener condiciones de frenado adecuada aun en superficies húmedas.
- **Trabajabilidad:** es la que permite colocar de manera adecuada la mezcla asfáltica y para que también este pueda ser completamente funcional una vez que se haya puesto en servicio.
- **Impermeabilidad:** Es la propiedad de la mezcla asfáltica que permite inhibir el paso de los líquidos, en particular del agua. Esto es pensado para que el agua (o los líquidos) no penetre en las capas inferiores y produzca daños a ellos.

2.3 GENERALIDADES DE LOS SOFTWARES DE MODELACIÓN

La modelación con software es una herramienta que ha vuelto mucho más práctico el diseño mecanicista-empírico ya que mediante los diferentes softwares que existen en el mercado y también de manera libre es mucho más fácil poder obtener los comportamientos de los pavimentos y facilitar de manera notoria la toma de decisiones durante el diseño de la estructura de pavimento que se está evaluando.

2.3.1 GENERALIDADES BISAR 3.0

BISAR es un software desarrollado y patentado por Shell Research, comenzó como una herramienta virtual para facilitar el procesamiento de los datos relacionados al análisis y diseño de pavimentos.

Inicialmente era utilizado para dibujar y leer nomogramas además de las cartas de diseño, gracias a esto se permitió el laborioso trabajo de interpolar en ellas.

La introducción del programa de computadora (software) BISAR 3.0 al entorno de Windows se origina al remplazar el trabajar en DOS que tenía la versión BISAR PC 2.0 a un ambiente el cual puede ser soportado por el sistema operativo. (Ver figura 2.2)

El programa puede ser aceptado por Windows desde sus primeras versiones como lo fue la Windows 3.1 y sus respectivas sucesoras.

El programa actualmente ofrece la capacidad del cálculo de las deflexiones, los esfuerzos y las tensiones en el pavimento además que es capaz de determinar los desplazamientos y las fuerzas horizontales entre cada una de las capas de las estructuras de pavimento que se están analizando incluyendo cargas provocadas por aeronaves.

Esto nos ofrece la oportunidad de calcular los esfuerzos de compresión y los perfiles de tensión en la estructura a través de la variedad de los patrones de carga.

BISAR3.0 es una herramienta muy generosa para el cálculo la cual puede usarse para refinar diseños de SPDM3.0, para esto BISAR3.0 cuenta con acceso a la configuración SDW (Standar Dual Wheel Configuration que es traducida como Configuración del Eje Doble Estándar) para poder determinar de manera automática la posición en las capas bajo la estructura que se está considerando. Nuestro software permite tener dos tipos de salida de datos el denominado “DR

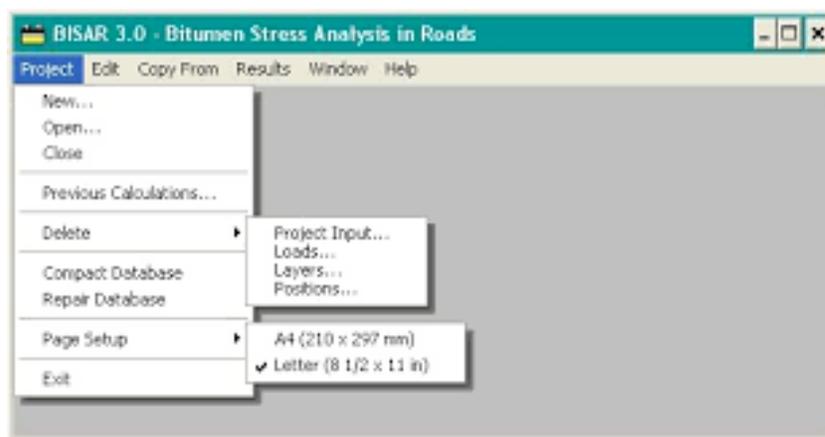


Figura 2.2 Captura de pantalla de Bisar 3.0

(Detailed Report-Reporte Detallado) el cual provee de una visión de los resultados principales de manera que pueda ser comprendida más fácilmente, además de contar con un reporte más avanzado con información particular acerca de los cálculos hechos en la capa seleccionada.

2.3.2 GENERALIDADES 3D MOVE.

3D MOVE (Figura 2.3) es un software que nos permite realizar el análisis de multicapa elástica de manera apropiada y que se enfoca en la teoría de que las capas que componen cada estructura de pavimento se comportan como medios continuos y que tiene su base en los modelos matemáticos que implementan la transformada de Fourier.

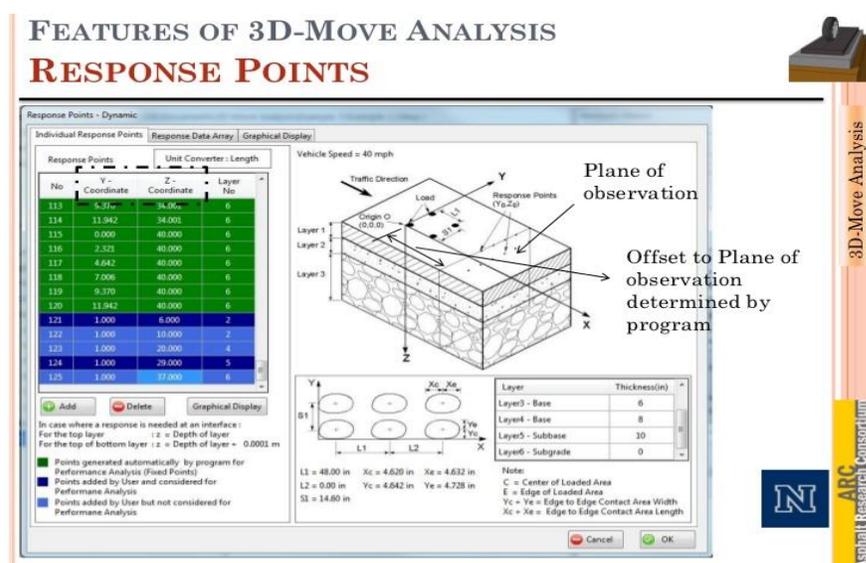


Figura 2.3 Captura de Pantalla software 3D-MOVE

El modelo analítico que 3D-MOVE adopta, utiliza la respuesta del pavimento ingresada usando la aproximación de que este se comporta como un pavimento que posee una base formada por una capa finita continua. El Modelo Analítico del 3D MOVE permite contabilizar factores importantes de respuesta del pavimento como lo es el movimiento del tráfico inducido por la compleja distribución de esfuerzos ocasionada por el contacto en 3 dimensiones (normal y

cortante) de cualquier cuerpo, velocidad del vehículo, y características del material viscoelástico que conforma cada una de sus capas. Esta aproximación considera cada capa del pavimento como continua además de utilizar la técnica de la transformada de Fourier; por lo tanto, es posible manejar superficies cargadas por completo ya sea con cargas múltiples y distribuciones de esfuerzos no uniformes provocadas por las llantas. Desde que los grabados pueden ser de cualquier manera, estas consideraciones permiten analizar todo tipo de llantas incluidos aquellas que tienen bases amplias. (Siddharthan et al. 1998; 2000; 2002). El método de capas finitas es mucho más eficiente (en termino de ingreso de datos que los modelos basados en las cargas móviles por elementos finitos (Huhtala and Pihlajamaki 1992; Al-Qadi and Wang 2009). Esto es porque la mayoría de veces los pavimentos están compuestos de capas colocadas de manera horizontal y sus respuestas son habitualmente requeridas por solo unas pocos estacionamientos seleccionados, para este tipo de problemas o condiciones es muy útil hacer uso del Modelo Analítico 3D-MOVE . Desde que la relación de dependencia de los materiales (viscoelástico) puede ser establecida con este análisis, es una herramienta ideal para modelar el comportamiento de las capas del concreto asfaltico (AC) y que también está en función de la velocidad del vehículo.

2.3.3 GENERALIDADES WINDEPAV.



Figura 2.4 Captura de Pantalla software DEPAV

WINDEPAV es una interface para el sistema operativo Windows del software predecesor denominado DEPAV (Ver Figura 2.4), el cual fue desarrollado por la Universidad de El Cauca para el Ministerio de Transporte de Colombia durante la Investigación Nacional de Pavimentos de Colombia (INPACO) en 1994. El programa original fue creado por los Profesores Alfonso Murgueitio Valencia, Carlos Alberto Benavides y Efrain Solano Fajardo, es una interfase en MS-DOS del programa francés Alizé

Su función principal es la de calcular los esfuerzos y deformaciones máximas que una rueda doble colocada en la superficie produce en los niveles de interface de un Sistema Elástico Multicapa, constituido de (2) Dos a (6) Seis capas, caracterizadas por el Espesor, Modulo de Elasticidad y Relación de Poisson. Además, que es capaz de calcular la Deflexión y el radio de Curvatura al centro de la Rueda Doble Ha habido muchas actualizaciones de Win DEPAV siendo la más reciente WinDEPAV 2.6 se publica en el año 2017 la cual incluye mejoras sustanciales que facilitan el uso del software. (Ver Figura 2.5 y Figura 2.6).

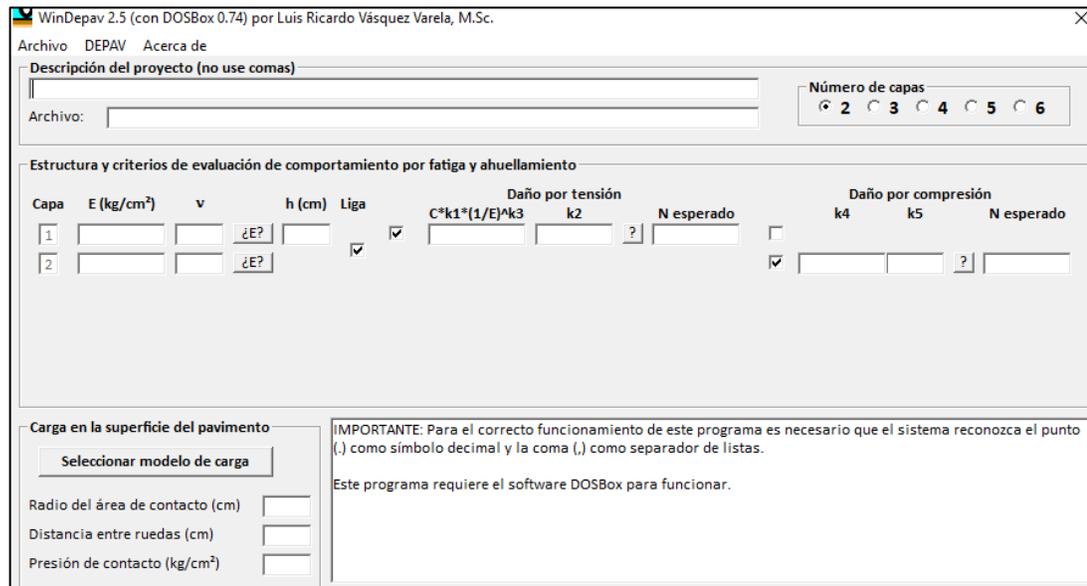


Figura 2.5 Captura de pantalla software WinDEPAV 2.6

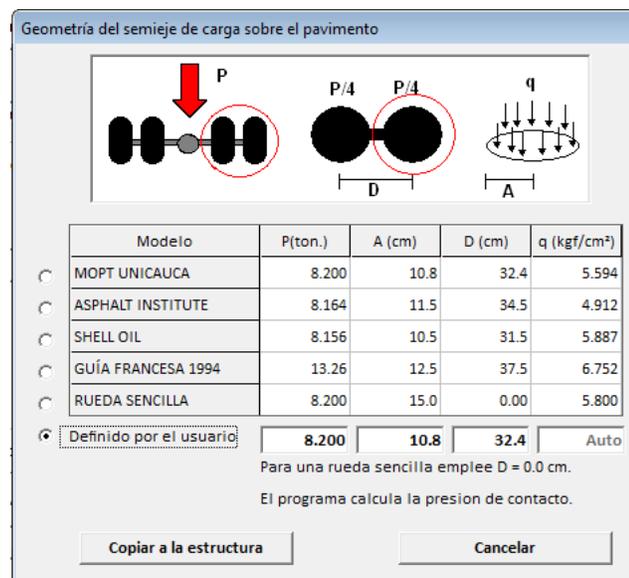


Figura 2.6 Captura de Pantalla Software Windepav

2.3.4 GENERALIDADES PITRA-PAVE.

Este software fue creado y patentado por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), es una entidad académica de investigación adscrita a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, en Costa Rica Centroamérica.



Figura 2.7 Captura de pantalla software PITRA PAVE

PITRA PAVE es un software de multicapa elástica general para el análisis estructural de pavimentos flexibles, el cual permite obtener esfuerzos, deformaciones y deflexiones ante determinadas cargas.

Una de las características de PITRA-PAVE es que por su lógica de programación permite que pueda ser utilizado en casi cualquier sistema operativo y con una cantidad de recursos mínimos consumidos por el equipo, siendo su interfaz casi la misma en cada uno de ellos permitiendo que el rendimiento sea muy similar en cada plataforma operativa

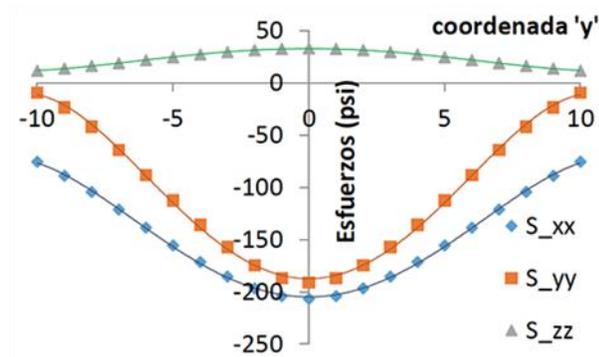


Figura 2.8 Representación gráfica de Esfuerzos en un punto

En numerosas ocasiones se ha comparado este software con muchos otros de esta misma clase y de gran reconocimiento y son pocos los casos donde se han obtenido diferencias en las soluciones, pero a diferencia de estos tiene una capacidad y velocidad de procesamiento mayor.

Las principales ventajas que se pueden resaltar de PITRA-PAVE son:

- Software multiplataforma (Windows, MacOS, Linux).
- Interface propia para ver resultados.
- Exportación a archivos “csv” para Excel, OpenOffice, Pages, Matlab y otros
- Mucho más rápido que otros programas.
- Estructuras con hasta 40 capas elásticas.
- Número de cargas y puntos ilimitados.
- Sistemas de Unidades Ingles y Métrico.

En la Figura 2.7 podemos apreciar el logo que caracteriza al software y en la Figura 2.8 se aprecia la manera gráfica en que el software produce los datos de salida.

2.4 DEFINICIÓN DE MÉTODOS EMPÍRICOS.

Los métodos empíricos están basados en resultados de experimentos o experiencias, los cuales requieren de muchas observaciones para establecer conexiones entre variables de diseño y su funcionamiento, es por ello que no es necesario establecer una base científica firme de las conexiones observadas en los experimentos, esto da como resultado que en muchos casos resulta práctico y conveniente confiar en la experiencia sin tratar de cuantificar la causa exacta.

2.4.1 DESARROLLO DE LOS MÉTODOS EMPÍRICOS DE DISEÑO

Los primeros métodos de diseño se desarrollaron en una primera etapa antes de la segunda guerra mundial (entre 1900 a 1930) fundamentándose en las características de los suelos de fundación y en la resistencia del pavimento, comparándose el comportamiento de pavimentos similares que habían tenido buena duración, se conocía que además del suelo, el tráfico de la vía y el clima de la zona tenían efecto sobre el pavimento, el cual en la mayoría de los casos era diseñado en base a la experiencia y sentido común del ingeniero, durante esta época se sabe surgieron más de 18 métodos de diseño, siendo el Índice de Grupo y CBR los más divulgados.

2.4.1.1 Método del Índice de Grupo

Este método se basa en las características físicas del material, como lo son su composición granulométrica y plasticidad, el Índice de Grupo aumenta según disminuye la calidad del material, es por ello que a suelos de subrasante con altos valores de Índice de Grupo se les colocaba espesores mayores de carpeta asfáltica, para este método de diseño se omiten todas las cargas aplicadas por vehículos livianos, concentrándose en los vehículos pesados diarios que pasan por la vía a ser diseñada.

2.4.1.2 Método del Valor de Soporte California (CBR)

El método CBR para diseño de pavimentos fue uno de los primeros en usarse. Se basa en la premisa, que a menor Valor de Soporte de subrasante, se requieren mayores espesores de pavimento para protegerlo de las cargas aplicadas por el tránsito. El CBR es la relación existente entre una carga que produce una deformación de 2.5 mm en el material ensayado y la carga que produce esa misma deformación en una muestra patrón de roca triturada.

2.4.2 MÉTODOS DE DISEÑO BASADOS EN LOS ENSAYOS DE CARRETERAS AASHO ROAD TEST

Los métodos de diseño planteados en esta etapa del desarrollo de los métodos empíricos, surgen del estudio de los efectos causados por las cargas de tráfico que actúan sobre los pavimentos, cuantificándose diversos factores que

participan e afectan en el diseño y comportamiento de la estructura; se considera, en especial, el efecto de las cargas y su número de aplicaciones sobre el pavimento, además de la cuantificación del grado de falla en la estructura. Analizándose los factores de diseño, corrigiéndose y ajustándose en base al comportamiento real ante el tráfico. En esta etapa de los diseños empíricos, tuvieron gran influencia los “Ensayos de Carreteras”, modelos a escala real que fueron el fundamento de los métodos actuales.

2.4.2.1. Bates Road Test

Entre 1922 y 1923 en el estado de Illinois, EEUU se construyeron más de 63 secciones de prueba con superficies de ladrillo, concreto y la mezcla asfáltica para determinar que material era propicio para dejar atrás las carreteras de barro que existían en el estado para la época, este experimento se conoció como Bates Road Test. Para el desarrollo de la prueba se usaron camiones Liberty del ejército de los Estados Unidos, equipados con neumáticos de goma sólida de 5 pulgadas de ancho en el eje trasero.

2.4.2.2. Carretera Experimental de Maryland

El Road Test de Maryland inicio en el año de 1949 por pedido de la HIGHWAY RESEARCH BOARD en la Autopista inter-urbana US-301 que se extiende a lo largo de 7 estados de la unión americana incluyendo Maryland, dicho tramo de prueba fue pavimentado usando concreto hidráulico reforzado con barras de

acero. Tenía como objetivo determinar el daño causado por dos configuraciones de ejes distintos, cada uno con dos cargas diferentes, una configuración se constituía de ejes simples de 8.2 ton y 10.1 ton, mientras la otra usaba ejes dobles de 14.5 y 20.3 ton, obteniendo como descubrimientos principales:

- Se determina el efecto de la velocidad, ya que, al comparar tramos bajo las mismas cargas, se observó que aquellos en los cuales los vehículos circulaban a velocidades menores a 65 kph habían sufrido un 20% más de daño que en aquellos con velocidades mayores a la indicada.
- La equivalencia entre ejes dobles y simples dependía de la ubicación transversal de la carga.

2.4.2.3. Experimento Vial de la Western Association of State Highway Officials (WASHO)

El experimento vial de la WASHO se realizó en el estado de Idaho entre 1952 y 1954 por la Western Association of State Highway Officials, para determinar el efecto de diferentes configuraciones de ejes e intensidad de carga sobre el pavimento. Se construyeron dos tramos rectos de 580 metros, con 5 secciones diferentes de 92 metros cada una, compuestas por espesores totales de entre 150 y 550 mm.

El principal nuevo resultado obtenido por el experimento fue la determinación que un eje tándem con una carga 1.5 veces la carga que un eje simple, causaban el mismo deterioro.

2.4.2.4. Experimento Vial de la American Association of State Highway and Transportation Officials AASHO (USA)

El experimento de la AASHO (USA) ha sido el más completo de todos los que se han ejecutado hasta la fecha, los datos que se obtuvieron siguen produciendo beneficios, ya que los últimos métodos de diseño se fundamentan en los datos de campo determinados en esta prueba.

Su ejecución en un inicio especulaba sería similar a la de la WASHO, pero el comité asesor encargado decidió ampliar sus alcances. De 1951 a 1954 se realizó la planificación y en 1955 se inicia la fase del trazado, para iniciar su construcción cerca de Ottawa en el estado de Illinois en 1956 e iniciar oficialmente la aplicación de cargas en 1958.

Para 1960 se concluye la etapa de mediciones en campo iniciándose el análisis de los datos, publicándose para 1962 las primeras guías provisionales de Diseño de Pavimentos, para alcanzar este punto se necesitaron cerca de 11 años y una inversión de 27 millones de dólares en su época.

El ensayo introdujo el concepto de serviciabilidad en el diseño, la cual en resumen es una medida de la capacidad de brindar al usuario una superficie lisa y suave, variando su valor entre 0 (intransitable) y 5 (perfecto estado).

2.4.3. DESARROLLO DEL MÉTODO DE LA AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO)

Luego de 10 años de diseños de pavimentos con aciertos, decepciones y ejecuciones de más estudios satélites que permitieron el ajuste y perfeccionamiento de la Guía Provisional de la AASHO de 1962, se realiza la segunda edición de dicha guía, incorporando el tránsito y siendo responsabilidad de la Organización de Administradores de carreteras, conociéndose desde esa fecha como Guía AASHTO-72.

Entre los años de 1984 y 1985 un Sub-Comité de Diseño de Pavimentos junto a un grupo de consultores especializados en el área de pavimentos, iniciaron el proceso de revisión de la Guía Provisional de 1972, siendo en 1986 que se presenta una nueva versión del método AASHTO titulada “Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO”, en esta actualización se pierde el calificativo de “Provisional” que contenían las versiones de 1962 y 1972. La edición de 1986 cambia drásticamente la metodología de diseño, considerando la teoría multicapa elástica en su procedimiento, incorporando parámetros como el factor de confiabilidad y el Módulo Resiliente, sustituyéndose también el factor regional por un enfoque más adecuado en la consideración de los efectos climáticos.

2.4.4. MÉTODO DE DISEÑO AASHTO 1993

En el año de 1993 luego de las revisiones anteriores, ve la luz una nueva revisión, la cual hasta el día de hoy se conoce como Método AASHTO-93. Esta nueva revisión, supone que un pavimento recién construido comienza a dar un servicio de alto nivel. A medida que el tiempo transcurre, y con él las repeticiones de carga de tránsito, el nivel de servicio baja. El método impone un nivel de servicio final que se debe alcanzar al concluir el periodo de diseño (Ver figura 2.9). Este método mantiene las ecuaciones de comportamiento de los pavimentos que se establecieron en el Experimento Vial de la AASHO (1961), como los modelos 32 básicos que deben ser empleados en el diseño de pavimentos; sin embargo, presenta cambios substanciales en el área de diseño de pavimentos asfálticos como lo son:

- Incorporación del “Factor de Confiabilidad”, la introducción de este factor se atribuye a la posibilidad de un cambio en el tráfico durante el periodo de diseño
- Sustitución de la Relación de Soporte (CBR) por el Modulo Resiliente. Obtener dicho modulo mediante el Método de Ensayo AASHTO T-274, proporciona un resultado más preciso y de carácter científico, fundamentado por la teoría elástica.
- Módulos Resilientes de la subrasante para cálculo de coeficientes estructurales de materiales procesados o del sitio.

- Creación de guías para construcción de sub-drenajes y modificación de las ecuaciones de diseño.
- Sustitución del "Factor Regional" por un enfoque más racional que toma en consideración los efectos de las características ambientales como la humedad y temperatura sobre las propiedades de los materiales.

A continuación, la Figura 2.9 muestra un flujograma con el proceso en el cual se basa la metodología de diseño de pavimentos de la American Association of State Highway and Transportation Officials 1993 (AASHTO 93).

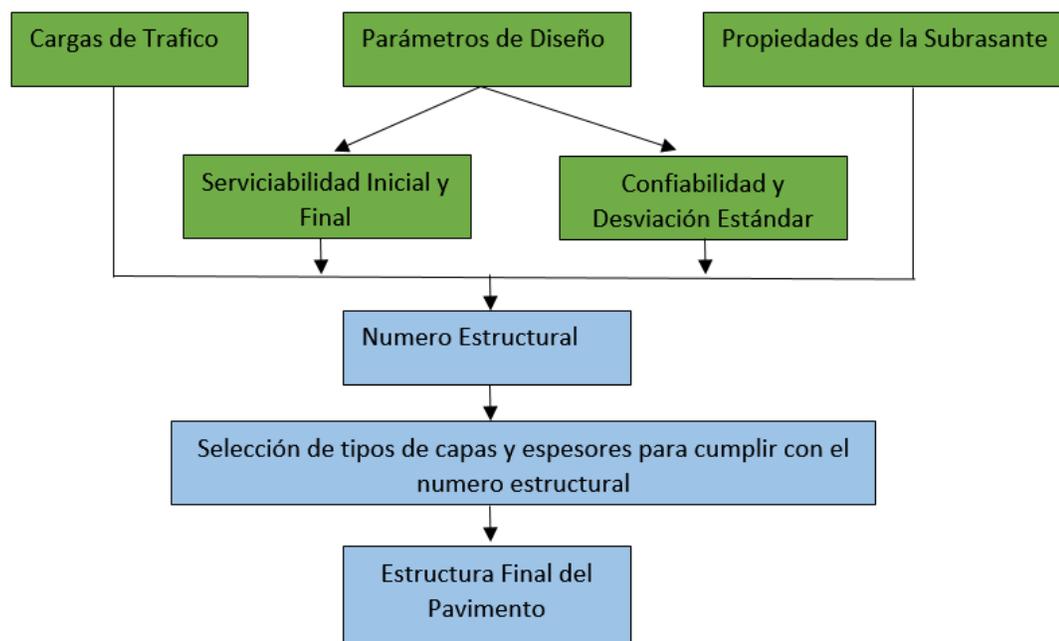


Figura 2.9 Proceso de Diseño AASHTO 1993

La Ecuación 2-2 planteada para el método de diseño AASHTO - 93 es:

$$\log_{10} W_{t18} = Z_R * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_R - 8.07$$

Ecuación 2-2 Formula Empírica Guía de Diseño AASHTO 1993

Dónde:

W18 = Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80kN) calculadas conforme al tránsito vehicular.

Zr = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.

So = Desviación estándar de todas las variables.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad.

Mr = Módulo de resiliencia de la subrasante.

SN = Número Estructural

La ecuación de AASHTO- 93 (Ecuación 2-2) se resuelve a través de iteraciones sucesivas hasta cumplir la igualdad dada, ya sea manualmente o usando programas informáticos como WinPAS, creado por la ACPA (American Concrete Pavement Association)

2.4.4.1. VARIABLES DE DISEÑO.

Para poder llevar a cabo el diseño de una estructura por medio de AASHTO-93 es preciso poder conocer y determinar las diferentes variables que influyen y condicionaran el mismo, a continuación, se describen las principales:

2.4.4.1.1. VARIABLES DE TIEMPO

Se consideran dos variables principales de este tipo: período de diseño y vida útil del pavimento. El período de diseño se refiere al período de tiempo para el cual se diseña un pavimento en función del tránsito y las condiciones del entorno se comiencen a alterar. La vida útil se refiere al tiempo transcurrido entre la puesta en operación del camino y el momento en el que el pavimento requiera rehabilitarse, es decir, cuando éste alcanza un grado de serviciabilidad mínimo. La Tabla 2.1 Periodos de Diseño Según Tipo de Carretera muestra periodos de diseño para diferentes tipos de vías.

Tipo de Carretera	Período de Diseño
Autopista Regional	20 – 40 años
Troncales suburbanas	15 – 30 años
Troncales Rurales	
Colectoras Suburbanas	10 – 20 años
Colectoras Rurales	

Tabla 2.1 Periodos de Diseño Según Tipo de Carretera

Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 1993

Para el caso en el que no se considere rehabilitaciones, el periodo de diseño es igual al período de vida útil; pero si se considera una planificación por etapas, es decir, una estructura de pavimento seguida por una o más operaciones de rehabilitación, el período de diseño comprende varios períodos de vida útil, el del pavimento y el de los distintos refuerzos. Para efectos de diseño se considera el período de vida útil, mientras que el período de análisis se utiliza para la comparación de alternativas de diseño, es decir, para el análisis económico del proyecto.

2.4.4.1.2. TRANSITO

Los pavimentos se proyectan para que resistan un determinado número de cargas durante su vida útil. El tránsito está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes que producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento. Para hacer más sencillos los cálculos, el tránsito se transforma a un número de cargas por eje simple equivalente de 18 kips (80 kN) ó ESAL (Equivalent Single Axle Load), de tal manera que el efecto de cualquier eje pueda ser representado por un número de cargas por eje simple. La ecuación siguiente (Ver Ecuación 2-3) puede ser usada para calcular el parámetro del tránsito W18 en el carril de diseño.

$$W_{18} = D_D * D_L * W_{18}$$

Ecuación 2-3 Tráfico Total en Ambas Direcciones

Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 1993

Donde:

W18 = Tránsito acumulado en el primer año, en ejes equivalentes sencillos de 8.2 ton, en el carril de diseño.

D_D = Factor de distribución direccional; se recomienda 50% para la mayoría de las carreteras, pudiendo variar de 0.3 a 0.7, dependiendo de en qué dirección va el tránsito con mayor porcentaje de vehículos pesados.

W'18 = Ejes equivalentes acumulados en ambas direcciones.

DL = Factor de distribución por carril, cuando se tengan dos o más carriles por sentido. Los valores recomendados se muestran en la Tabla 2.2.

Número de Carriles en una Dirección	%ESAL en Carril de Diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Tabla 2.2 Factor Por Distribución Por Carril DL

Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 1993

El proceso de convertir el tránsito a un número de ESAL's de 80 kN, proviene del Road Test de la AASHO, tomando en cuenta el Índice de Serviciabilidad, el cual es un valor que indica el grado de confort que tiene la superficie para el desplazamiento natural y normal de un vehículo, este valor se calcula a través del IRI (Índice de Rugosidad Internacional). El Índice de serviciabilidad y el IRI se relacionan a través de la Ecuación 2-4 que se muestra a continuación:

$$PSI = 5e^{-0.0041xIRI}$$

Ecuación 2-4 Índice de Serviciabilidad Inicial

Dónde:

PSI=Índice de Serviciabilidad

IRI = Índice Internacional de Rugosidad

e = 2.71828183 (Número de Euler)

El factor equivalente de carga (LEF, por sus siglas en ingles), es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por la carga de un eje estándar de 18 Kips y la carga producida por otro tipo de eje.

$$LEF = \frac{\text{No de ESAL's de 80 kN que produce una pérdida de seviciabilidad}}{\text{No de ejes de 80kN que producen la misma pérdida de seviciabilidad}}$$

Ecuación 2-5 Factor Equivalente de Carga LEF

Cada tipo de pavimento responde de manera diferente a una carga, los LEFs también cambian en función del tipo de pavimento. Debido a esto los pavimentos rígidos y flexibles tienen diferentes LEFs y que también cambia según el SN (número estructural) en pavimentos flexibles, además de cambiar según el valor del índice de seviciabilidad asumido para el diseño (La expresión para calcular el valor de LEF se presenta en la Ecuación 2-5)

2.4.4.1.3. CONFIABILIDAD (R)

La confiabilidad es la probabilidad de que el pavimento se comporte satisfactoriamente durante su vida útil o período de diseño, resistiendo las condiciones de tráfico y medio ambiente dentro de dicho período. Cuando se habla del comportamiento del pavimento se refiere a la capacidad estructural y funcional de éste, es decir, a la capacidad de soportar las cargas impuestas por el tránsito, y asimismo de brindar seguridad y confort al usuario durante el período para el cual fue diseñado. Por lo tanto, la confiabilidad está asociada a la aparición de fallas en el pavimento.

A continuación, en la Tabla 2.3, se muestran valores recomendados de confiabilidad según el tipo de vía.

Niveles Recomendados de Confiabilidad (R)		
Clasificación de la vía	Urbana	Rural
Autopistas	85-99,9	80-99,9
Troncales	80-99	75-95
Locales	80-95	75-95
Ramales y Vías Agrícolas	50-80	50-80

Tabla 2.3 Niveles Recomendados de Confiabilidad (R)

Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 1993

El valor de la confiabilidad está relacionado al concepto de optimización del costo total del pavimento. Con valores cercanos a 50% se obtienen menores espesores de pavimento y costos de construcción al inicio menores, con valores de R cercanos a 100% se obtienen mayores espesores y los costos aumentan. Sin embargo, esto implica que con valores cercanos al 50 el deterioro será mayor y los costos asociados al mantenimiento del pavimento a lo largo de su vida útil serán altos, mientras que cercanos al 100%, sus costos de mantenimiento serán menores.

2.4.4.1.4. SERVICIABILIDAD

La serviciabilidad se usa como una medida del comportamiento del pavimento, esta se relaciona con la seguridad y comodidad que puede brindar al usuario, cuando éste circula por la vialidad. También se relaciona con las características físicas que puede presentar el pavimento como grietas, fallas, peladuras, etc, que podrían afectar la capacidad de soporte de la estructura (comportamiento estructural).

El concepto de serviciabilidad está basado en cinco aspectos fundamentales resumidos como sigue:

1. Las carreteras están construidas para el confort y conveniencia del público usuario.
2. El confort y calidad de la transitabilidad, es materia de una respuesta subjetiva de la opinión del usuario.
3. La serviciabilidad puede ser expresada por medio de la calificación realizada por los usuarios de la carretera y se denomina la calificación de la serviciabilidad.
4. Hay características físicas de un pavimento que pueden ser medidas objetivamente y que pueden relacionarse a las evaluaciones subjetivas.
5. El comportamiento se puede representar por la historia de la serviciabilidad de un pavimento.

Cuando el conductor circula por primera vez o en repetidas ocasiones sobre una vialidad, experimenta la sensación de seguridad o inseguridad dependiendo de lo que ve y del grado de dificultad para controlar el vehículo. El principal factor asociado a la seguridad y comodidad del usuario es la calidad de rodamiento que depende de la regularidad o rugosidad superficial. del pavimento. La valoración de este parámetro define el concepto de Índice de Serviciabilidad Presente (PSI, por sus siglas en ingles).

El PSI califica a la superficie del pavimento de acuerdo a una escala de valores de 0 a 5. Claro está, que, si el usuario observa agrietamientos o deterioros sobre la superficie del camino aún sin apreciar deformaciones, la clasificación decrece. El diseño estructural basado en la serviciabilidad, considera necesario determinar el índice de serviciabilidad inicial (P_o) y el índice de serviciabilidad final (P_t), para la vida útil o de diseño del pavimento.

a) **Índice de serviciabilidad inicial P_o**

El índice de serviciabilidad inicial (P_o) se establece como la condición original del pavimento inmediatamente después de su construcción o rehabilitación. AASHTO estableció para pavimentos rígidos un valor inicial deseable de 4.5, si es que no se tiene información disponible para el diseño

b) **Índice de serviciabilidad final (P_t)**

El índice de serviciabilidad final (P_t), ocurre cuando la superficie del pavimento ya no cumple con las expectativas de comodidad y seguridad exigidas por el usuario.

La pérdida de serviciabilidad se define como la diferencia entre el índice de servicio inicial y terminal.

$$\Delta PSI = P_o - P_t.$$

Ecuación 2-6 Variación Total del Índice de Serviciabilidad

Los factores que influyen mayormente la pérdida de serviciabilidad son: tráfico, medio ambiente y edad del pavimento. Los efectos que causan éstos factores en el comportamiento del pavimento han sido considerados en este método. El factor edad (tiempo) no está claramente determinado. Sin embargo, en la mayoría de los casos es un factor negativo neto que contribuye a la reducción de la serviciabilidad. El efecto del medio ambiente considera situaciones donde se encuentran arcillas expansivas o levantamientos por helada. Esto se expresa en la Ecuación 2-6.

2.4.4.1.5. DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S_o)

Desviación estándar del sistema, es función de las posibles variaciones en las estimaciones de tránsito (cargas y volúmenes) y comportamiento del pavimento a lo largo de toda su vida de servicio. Este valor acota la variabilidad de todos estos factores dentro de unos límites permisibles, con el fin de asegurar que la estructura del pavimento se comporte adecuadamente durante todo su periodo de diseño.

Los **valores de desviación estándar** en los tramos de prueba de AASHTO, no incluyeron ningún error en la estimación del tránsito; sin embargo, el error en la predicción del comportamiento de las secciones en tales tramos, fue de 0.35 en pavimentos flexibles, lo que corresponde a un valor de la desviación estándar total debido al tránsito de 0.45 para este tipo de pavimento. (Ver Tabla 2.4).

Tipo de Pavimento	So
Pavimentos Flexibles	0.40-0.50
Construcción Nueva	0.35-0.40
Sobre capas	0.50

Tabla 2.4 Valores de Desviación Estándar

Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 1993

2.4.4.1.6. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

Las propiedades de los materiales, se valoran para obtener el Módulo de Resiliencia, ya que en función de éste se llega a los coeficientes de los números estructurales (SN), la subrasante por ser la capa en la que se apoya la estructura del pavimento, está definida por este Módulo.

Inicialmente cuando se comenzaron a efectuar los primeros diseños de pavimento, este concepto estaba basado en las propiedades de la subrasante tales como: la granulometría, plasticidad, clasificación de suelos, etc. Posteriormente se tomaron en cuenta sus propiedades básicas y se analizaron otro tipo de ensayos que permitieran conocer en mejor forma el comportamiento de estos suelos. Se efectuaron ensayos utilizando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación como el CBR y ensayos de compresión simple. Estos se cambiaron por ensayos dinámicos y de repetición de cargas como el de Módulo de Resiliencia, que son pruebas que demuestran en mejor forma el comportamiento y lo que sucede debajo de los pavimentos en lo que respecta a tensiones y deformaciones.

2.4.4.1.6.1. Características Físico - Mecánicas de la subrasante

La subrasante es el suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural. En la década del 50 se puso más énfasis en las propiedades fundamentales de la subrasante y se idearon ensayos para caracterizar mejor a estos suelos. Usando cargas estáticas o de baja velocidad de deformaciones como el CBR y compresión simple, son reemplazados por ensayos dinámicos y de repetición de cargas tal como el ensayo del Módulo Resiliente, que representan mucho mejor lo que sucede bajo un pavimento en lo concerniente a tensiones y deformaciones. Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías

- a) Propiedades Físicas: son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.
- b) Propiedades Mecánicas: dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos. La calidad de los suelos para subrasantes se puede relacionar con el Módulo Resiliente, Módulo de Poisson, CBR y el módulo de Reacción de la Subrasante.

Clasificación de suelos

La clasificación de suelos es el indicador de las propiedades físico - mecánicas que tienen los suelos. La clasificación que mejor describe y determina las propiedades de un suelo a usarse como subrasante es la clasificación de AASHTO M-145; las primeras variables son: la granulometría y la plasticidad. En

términos generales, un suelo conforme a su granulometría se clasifica así:

Grava: de un tamaño menor a 76.2 mm (3") hasta tamiz No. 10 (2 mm)

Arena Gruesa: de un tamaño menor a 2 mm hasta tamiz No.40 (0.425 mm)

Arena Fina: de un tamaño menor a 0.425 mm hasta tamiz No.200 (0.075 mm)

Limos y Arcillas: tamaños menores de 0.075 mm

Dos suelos finos con granulometrías similares, pueden llegar a tener propiedades totalmente diferentes dependiendo de su plasticidad, propiedad que se analiza en el suelo que pasa el tamiz No. 40; dichas propiedades de plasticidad, se analizan conforme las pruebas de límites de Atterberg, las cuales son:

Límite Líquido o LL: Es el estado de un suelo, cuando pasa de un estado plástico a un estado semilíquido.

Límite Plástico o LP: Es la frontera entre el estado plástico y el semisólido de un suelo.

Índice Plástico o IP: es la diferencia entre LL y LP, que nos indica la plasticidad del material. Se concluye que, para los suelos gruesos, la propiedad más importante es la granulometría y para los suelos finos son los límites de Atterberg

Valor soporte California (CBR, AASHTO T-193)

Este ensayo fue inventado por la División de Carreteras de California en 1929 y nos permite determinar la Resistencia al Corte de un suelo bajo condiciones de Humedad y Densidad controladas.

Módulo de resiliencia (Mr)

En el método de AASHTO del 1986 y 1993, se reemplaza al CBR por el módulo de resiliencia para utilizarlo como variable para caracterizar la subrasante, subbase y base. El módulo de resiliencia es una medida de la propiedad elástica de los suelos que reconoce a su vez las características no lineales de su comportamiento. El módulo de resiliencia puede ser usado directamente para el diseño de pavimentos flexibles, pero también puede ser convertido a un módulo de reacción de la subrasante (valor k) para el diseño de pavimentos rígidos. En este método de AASHTO se deben usar los valores medios resultantes de los ensayos de laboratorio, ya que la incertidumbre de la confiabilidad (R) debe tomarse en cuenta.

El Módulo de Elasticidad se puede determinar directamente con un ensayo o por correlaciones, como la propuesta en la guía de diseño de estructuras de pavimento AASHTO 93, la cual tiene como dato de entrada el CBR (AASHTO T-193).

2.4.4.1.7. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES

Estas características son las que definen que el pavimento mantenga sus cualidades estructurales a lo largo de su vida.

2.4.4.1.7.1. DRENAJE

El proceso mediante el cual el agua de infiltración superficial o agua de filtración subterránea es removida de los suelos y rocas por medios naturales o artificiales, se llama drenaje. Este factor es de los más importantes en el diseño de pavimentos. El agua es el segundo causante principal del deterioro de la estructura del pavimento, siendo la pérdida de soporte uno de sus más graves consecuencias. Para minimizar los efectos del agua se debe:

- Prevenir el ingreso del agua al pavimento (drenaje superficial).
- Proveer de un drenaje para remover el agua rápidamente (drenaje subterráneo).
- Construir un pavimento suficientemente fuerte para resistir el efecto combinado de carga y agua.

Los efectos del drenaje sobre el comportamiento del pavimento han sido considerados en el método AASHTO-93 por medio de un coeficiente de drenaje (Cd). El drenaje es tratado considerando el efecto del agua sobre las propiedades de las capas del pavimento y sus consecuencias sobre la capacidad estructural de éste.

Como es imposible impedir el ingreso del agua a la estructura del pavimento; es necesario la construcción de un sistema de subdrenaje que permita remover rápidamente esta agua es por ello que se clasifica la calidad del drenaje en función del agua removida (ver Tabla 2.5) y del Porcentaje de tiempo al cual está expuesta la estructura del pavimento a niveles de humedad próxima a la

saturación (ver Tabla 2.6). En la actualidad se están utilizando subbases altamente permeables y drenes laterales para evacuar rápidamente el agua.

CALIDAD DE DRENAJE:	AGUA REMOVIDA EN
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Malo	Agua no drena

Tabla 2.5 Valores de Desviación Estándar

Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 1993

Los efectos del drenaje sobre el comportamiento del pavimento han sido considerados en el método AASHTO-93 por medio de un coeficiente de drenaje (Cd). El drenaje es tratado considerando el efecto del agua sobre las propiedades de las capas del pavimento y sus consecuencias sobre la capacidad estructural de éste. En la Tabla 2.5 se muestran las calidades que se les puede dar a un drenaje según la cantidad de agua drenada y en la Tabla 2.6 se muestran los valores de desviación estándar en base al tiempo de exposición y su calidad.

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo al cual está expuesta la estructura del pavimento a niveles de humedad próxima a la saturación			
	Menor del 1%	1 – 5%	5 – 25%	Mayor del 25%
Excelente	1.40 – 1.36	1.36 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Bueno	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Regular	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Pobre	1.15 – 1.05	1.05 – 0.8	0.80 – 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

Tabla 2.6 Valores de Desviación Estándar

Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 1993

Los materiales de drenaje incluyen: agregados, geotextiles y tuberías. Los agregados se usan como capas de drenaje y drenes franceses o como material de filtro para sus protecciones. Los geotextiles son usados para reemplazar agregados como filtros. Las tuberías pueden ser perforadas, ranuradas o de junta abierta, siendo colocadas dentro de los drenes franceses para recolectar agua.

2.5 DEFINICIÓN DE MÉTODOS MECANICISTAS-EMPÍRICOS.

Las metodologías mecanicistas procuran tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, y se pueden determinar en laboratorio o en campo. Esta metodología facilita el pronóstico correcto de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por consiguiente, aumentar la confiabilidad de los diseños, basándose en la aplicación de la mecánica estructural, la cual permite determinar la respuesta de los elementos estructurales que componen el pavimento, tales como esfuerzos, deformaciones y desplazamientos debido a las cargas aplicadas a las ruedas, utilizando los fundamentos y modelación que permite la teoría elástica.

Yoder y Witzack (1975) señalaron que el proceso de diseño de cualquier pavimento para ser completamente racional, debe considerar tres elementos primordiales, los cuales son:

- La teoría para predecir las fallas asumidas ó parámetros de deterioro.
- La evaluación de las propiedades de los materiales aplicables a la teoría seleccionada.
- La determinación entre la relación de la magnitud de los parámetros en cuestión al nivel de desarrollo deseado.

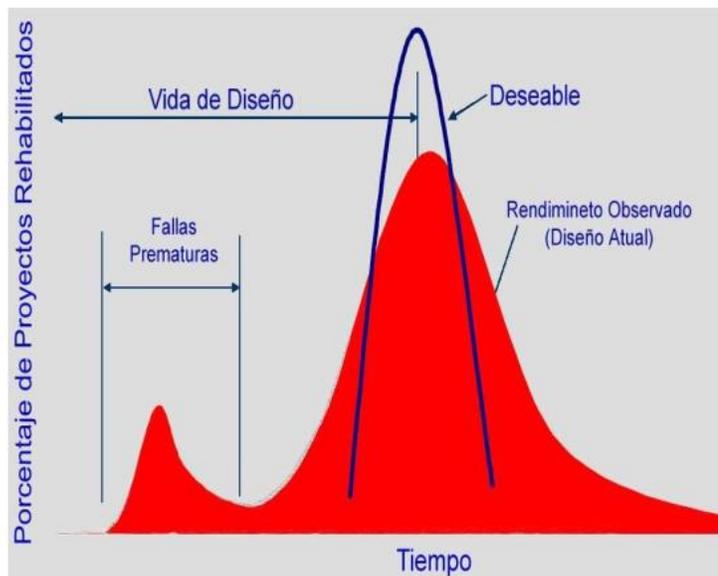


Figura 2.10 Confiabilidad de Diseño Mecanicista

El método mecanicista se apoya en la teoría elástica lineal o no lineal. Es válido considerar la teoría elástica lineal como una primera aproximación dado que las deformaciones que sufre el pavimento por las cargas de tránsito son prácticamente elásticas. Es debe considerar la teoría de la elasticidad dado que

el tiempo de aplicación de la carga que ejercen las llantas al pavimento es muy pequeño. En la Figura 2.10 se puede apreciar un gráfico que muestra la Confiabilidad de los Diseños Mecanicistas.

Los valores de la respuesta son utilizados para predecir el daño basado en ensayos de laboratorio y datos del comportamiento en campo. La dependencia existente de la metodología, respecto al comportamiento, es necesaria debido a que la teoría sola, no provee lo suficiente para un diseño confiable. La metodología empírica mecanicista AASHTO 2002, ya no utiliza una ecuación de regresión para el diseño, sino recomienda la aplicación de la teoría elástica, modelando el medio mediante múltiples capas horizontales, homogéneas, con comportamiento elástico en el caso de la sub-rasante y bases granulares y comportamiento visco elástico en el caso de los materiales asfálticos.

La aplicación del análisis deformacional en el diseño de pavimentos flexibles tiene el objetivo de controlar las deformaciones en la estructura de pavimentos, incluyendo el terreno de fundación. La magnitud de las deformaciones que se presente en su estructura debido a las cargas asociada a la duración del pavimento. Este análisis se realiza a través de programas de cómputo como el 3D MOVE de la universidad de Nevada o WINDEPAV de Colombia.

Los programas utilizan la técnica numérica de elementos finitos para la solución de las ecuaciones diferenciales del problema elástico y del modelamiento elástico de los materiales. Los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos, resultante de la aplicación de la carga de diseño permiten determinar el período de vida de

la estructura mediante el uso de los denominados modelos de daño. Estos modelos son ecuaciones empírico-mecánicas que relacionan el número de pasadas admisibles sobre el pavimento en función de los esfuerzos y deformaciones calculadas, siendo este un proceso iterativo que termina hasta conseguir el valor óptimo de los esfuerzos y deformaciones necesarios para evitar los diferentes tipos de falla que se esperan en la capa de rodadura (La Figura 2.11 muestra el proceso lógico de diseño Mecanicista Empírico).



Figura 2.11 Proceso de Diseño Mecanicista-Empírico

2.5.1 COMPORTAMIENTO FUNCIONAL DEL PAVIMENTO

El comportamiento funcional del pavimento concierne al buen estado del pavimento y al servicio que presta a los usuarios con esas características, este comportamiento se mide en término de la regularidad de la superficie por medio del IRI (Índice de Regularidad Estructural) adoptado por la guía AASHTO 2002 como el indicador de este comportamiento.

El valor del IRI aumenta gradualmente desde un valor inicial correspondiente a la puesta en marcha del proyecto (Ver Figura 2.12), incrementando debido a deterioros superficiales o falta de actividades de mantenimiento de la vía, contribuyendo además factores relacionados al sitio como el suelo de la subrasante o la pérdida de propiedades de la capa de rodadura debido al tránsito.

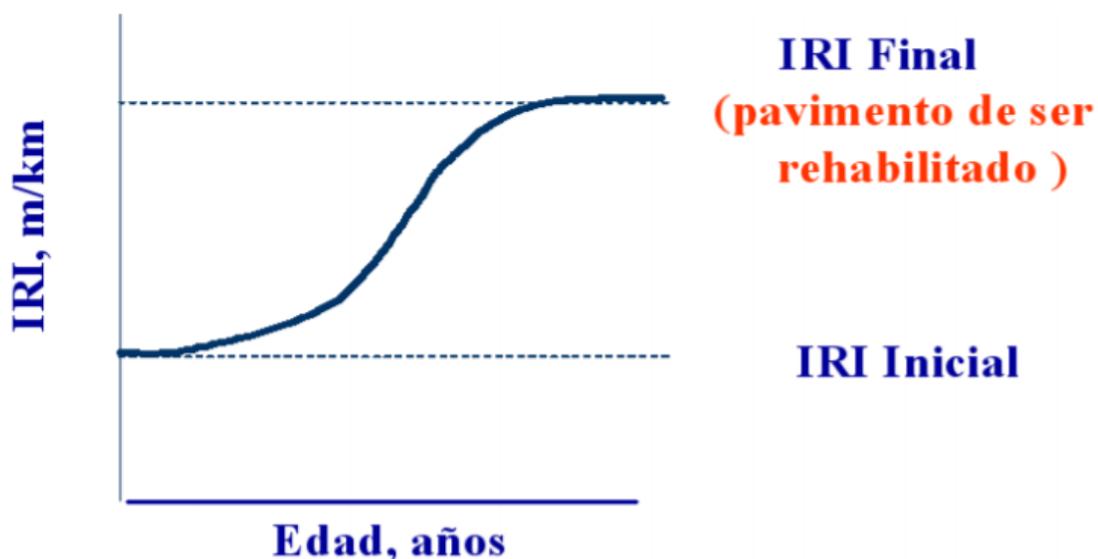


Figura 2.12 Evolución del IRI en el Tiempo

El IRI fue adaptado como una medida estándar de la rugosidad por las siguientes razones:

- Permite especificar rangos o niveles de tolerancia para la aceptación de tramos nuevos de carretera.
- El IRI puede ser usado para monitorear el comportamiento del camino a través del tiempo.
- Permite fijar umbrales de alerta para el daño de la vía y poder realizar labores de mantenimiento.

2.5.2 FACTORES DE ENTRADA AL PROCESO DE DISEÑO MECANICISTA

Los métodos de diseño de pavimento mecanicista empíricos tienen como datos de entrada el tránsito vehicular, clima y estructura de pavimento.

2.5.2.1 TRANSITO VEHICULAR

El tránsito vehicular constituye la demanda principal al sistema estructural del pavimento; es bajo el paso repetido de los vehículos que los pavimentos se deterioran. Su caracterización es fundamental, y a la vez muy compleja dada la gran distribución de tipos de vehículos y, por tanto, de cargas.

Para la caracterización del tránsito vehicular se puede utilizar la práctica común de convertir el tráfico en un número de ejes equivalentes sencillos duales de 8 toneladas (18 kips) para el período de diseño. Para trabajar directamente con las configuraciones vehiculares y su tipo de eje específico se debe hacer a través del concepto de espectro de carga, el cual es un enfoque real para caracterizar el tráfico.

2.5.2.1.1 CLASIFICACIÓN DE VEHÍCULOS

El esquema de la clasificación de la FHWA (Administración Federal de Carreteras) es separado en categorías dependiendo si el vehículo lleva pasajeros o si es vehículo comercial (ver Figura 2.13). Los vehículos sin pasajeros son fundamentalmente subdivididos por el número de ejes y el número de unidades incluyendo unidades de remolque y maquinaria pesada.

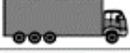
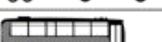
Class 1 Motorcycles		Class 7 Four or more axle, single unit	
Class 2 Passenger cars		Class 8 Four or less axle, single trailer	
			
			
			
Class 3 Four tire, single unit		Class 9 5-Axle tractor semitrailer	
			
			
Class 4 Buses		Class 10 Six or more axle, single trailer	
			
			
Class 5 Two axle, six tire, single unit		Class 11 Five or less axle, multi trailer	
			
			
Class 6 Three axle, single unit		Class 12 Six axle, multi-trailer	
			
			
		Class 13 Seven or more axle, multi-trailer	
			
			

Figura 2.13 Tabla de clasificación de vehículos FHWA

Clases de vehículos de circulación en El Salvador considerados por la FHWA

CLASE 1. Motocicletas: Vehículos motorizados de dos o tres ruedas. Esta categoría incluye motocicletas, motocicletas de tres ruedas, bicicletas con motor, patinetas con motor.

CLASE 2. Vehículos para pasajeros: Son todos los tipos de sedán, cupés y pick up, que tienen como función primordialmente el propósito de transportar pasajeros e incluye a los vehículos que funcionan para jalar remolques recreativos ó livianos.

CLASE 3. Unidades de vehículos simples, dos ejes, cuatro llantas: Son otros vehículos para pasajeros de dos ejes. En esta clasificación se incluyen los pickups, paneles, camionetas y otros vehículos como casas rodantes, ambulancias, coches fúnebres y microbuses. Otros vehículos de unidades simples de dos ejes y cuatro llantas que están incluidos en esta clasificación son los que halan remolques livianos y recreativos.

CLASE 4 Buses: Son todos los buses manufacturados para el transporte de personas con dos ejes y seis llantas ó tres ejes ó más llantas. Esta categoría incluye únicamente buses tradicionales.

CLASE 5. Camiones de eje doble con seis llantas:

Son todos los vehículos que tienen dos ejes y doble llantas posteriores incluye camiones, vehículos recreativos y para acampar, casas rodantes, etc.

CLASE 6. Camiones de tres ejes: Son todos los camiones de una sola unidad que tienen tres ejes de una sola armazón incluyendo camiones tipo C-2A, C-2, C-3, C-4.

CLASE 8. Camiones de remolque simple de cuatro ó menos ejes: Son todos los vehículos con cuatro ó menos ejes que consiste de dos unidades, una de las cuales es remolque como los T2-S1 y T2-S2, T3-S1.

CLASE 9. Camiones de remolque simple de cinco ejes: Son todos los vehículos que consisten de dos unidades, una de las cuales es un camión con remolque ó directamente un camión de carga tipo T2-S3, T3-S2.

CLASE 10. Camiones de remolque simple con seis ó más ejes: Son todos los vehículos con seis ó más ejes que consisten de dos unidades, una de las cuales es un camión con remolque ó directamente un camión de carga como T3-S3.

CLASE 11. Camiones de remolque múltiple con cinco ó menos ejes:
Son todos los Camiones con cinco ó menos ejes que consisten de tres ó más unidades, una de las cuales es un camión con remolque ó directamente un camión de carga asi como los C2-R2 y C3-R2.

CLASE 12. Camiones de remolque múltiple de seis ejes: Son todos los vehículos que consisten de tres ó más unidades, una de las cuales es un camión con remolque ó directamente un camión de carga, como el C3-R3.

En la tabla 2.13 se muestran la clasificación previamente descrita.

2.5.2.1.2 Velocidad de Operación De Vehículos

La velocidad de operación es un parámetro fundamental para el diseño de pavimento flexible, influye en la respuesta de la rigidez de las capas de concreto asfáltico en la estructura del pavimento. A medida que el tráfico se mueve sobre la carretera, un gran número de pulsos de tensión se aplican a cada elemento de los materiales dentro del paquete estructural del pavimento. Por lo general, estos pulsos de tensión duran un corto periodo de tiempo, y su magnitud y duración dependerá de la velocidad del vehículo, tipo, geometría de la estructura del pavimento y ubicación del elemento en cuestión.

2.5.2.1.3 Factores de ajuste y distribución de tráfico

Los factores de distribución mensual se utilizan para determinar la variación mensual de tráfico en el año base. Estos valores son simplemente la relación entre el tráfico de camiones y el TPDA. El promedio de la proporción de los 12 meses del año base debe ser igual a 1,0.

- Para los datos de tráfico, se debe determinar el número total de camiones (en una clase determinada) por cada clase en un período de 24 horas.
- Utilizar datos representativos de todos los días analizados en el periodo de un año, para determinar el promedio de tráfico diario de camiones por cada mes.

Los factores de distribución horaria (HDF) representan el porcentaje del TPDA dentro de cada hora del día. La suma del porcentaje diario de tráfico de camiones por incremento de tiempo debe sumar el 100 por ciento.

Los factores de crecimiento vehicular en un segmento ó en un sitio en particular son estimados de una mejor manera cuando existe disponibilidad de datos de conteo de tráfico continuo, puesto que el volumen de tráfico en un solo sitio puede ser afectado por una variedad de factores externos. Una estimación menos confiable de los factores de crecimiento se puede calcular también de los datos obtenidos de conteos de duración corta, puesto que las estimaciones individuales de TPDA de tales conteos no son exactas como los disponibles por conteos continuos.

Los factores de distribución de carga por eje, representan el porcentaje total de aplicaciones de ejes dentro de cada intervalo de carga para un tipo específico de eje y clase de vehículo. Estos datos deben ser proporcionados por cada mes y para cada clase de vehículo. Una clasificación de los intervalos de carga para cada tipo de vehículo se proporciona a continuación:

- Ejes Simples: De 3,000 a 40,000 lb. a intervalos de 1,000 lb.
- Ejes Tandem: De 6,000 a 80,000 lb. a intervalos de 2,000 lb.
- Ejes Tridem y Cuádruples: De 12,000 a 102,000 lb a intervalos de 3,000lb.

2.5.2.1.4 Localización promedio de la llanta

Es la distancia del borde externo de la rueda a la marca del pavimento. Este factor es importante en la predicción de daños por fatiga y grietas JPCP, pero no se utiliza para el análisis en pavimentos flexibles. Existen tres tipos de niveles de datos:

- Nivel 1: El valor determinado con mediciones directas en segmentos de sitios.
- Nivel 2: Un valor promedio regional determinado de mediciones sobre carreteras con características de tráfico similares y condiciones de sitio (clase funcional, tipo de pavimento, nivel de servicio, etc.).
- Nivel 3: Valor promedio nacional ó estimaciones basadas en experiencias locales.

2.5.2.1.5 Desviación estándar del paso del tráfico

Esta es la desviación estándar del tráfico lateral alejado de las roderas. Influye en el número de aplicaciones de carga por eje en un punto de partida para la predicción de la falla y el rendimiento; este parámetro afecta a la predicción de la fatiga y la deformación permanente en el sistema de pavimento y afecta directamente a la progresión del daño por fatiga y ahuellamiento.

2.5.2.1.6 Diseño ancho del carril

Esta es la distancia entre las marcas de los carriles a cada lado del carril de diseño. Se utiliza principalmente para el diseño de pavimento rígido y tiene poco

efecto en los análisis de pavimento flexible; el valor por defecto para los carriles de ancho estándar es de 12 pies.

2.5.2.1.7 Número de tipos de eje por clase de camiones

Esta entrada representa el número medio de ejes para cada clase de vehículo (clase 4 a 13) para cada tipo de ejes (tándem único, trídem y cuádruple). Existen tres niveles de datos:

- Nivel 1. Los valores determinados por el análisis directo de los datos de tráfico del sitio-específico
- Nivel 2. Los valores determinados por el análisis directo de los datos de tráfico regional
- Nivel 3. Los valores por defecto basados en el análisis de bases de datos nacionales.

2.5.2.1.8 Configuración del eje

Una serie de datos son necesarios para describir los detalles de la carga de los neumáticos y el eje para su uso en el módulo de la respuesta del pavimento. Para cada uno de los siguientes elementos se utilizan los valores típicos; sin embargo, los valores del sitio específico pueden ser utilizados si la información está disponible.

- **Ancho de eje promedio:** Es la distancia entre dos bordes exteriores de un eje. Para camiones se puede suponer 8,5 pies para el ancho del eje

- **Separación de los neumáticos dobles:** Es la distancia entre los centros de un neumático dual. El espacio de neumáticos dual para los camiones es de 12 pulgadas.
- **Presión de los Neumáticos:** Es la presión de inflado en caliente o la presión de contacto de un neumático o una llanta dual. Para los camiones pesados, la presión típica de inflación en caliente es de 120 psi.
- **Separación de los ejes** - la distancia entre los ejes consecutivos de un tándem, trídem o quad. La distancia media entre ejes es de 51,6 pulgadas tándem y de 49,2 pulgadas en el trídem.

2.5.2.1.9 Distancia entre ejes

Esta entrada de datos es representativa en pavimentos rígidos y tiene poco efecto sobre el análisis de pavimentos flexibles. Estos datos pueden ser obtenidos directamente de las bases de datos del fabricante o medidos directamente en el campo. La distancia media entre ejes (en metros) a corto, mediano o largo plazo, tienen valores recomendados de 12, 15 y 18 pies de distancia entre ejes, respectivamente.

2.5.2.1.10 Dimensiones del neumático y las presiones de inflado

Las dimensiones del neumático y las presiones de inflado son entradas importantes en los modelos de la predicción de comportamiento. El aumento de la presión del neumático va en detrimento del pavimento, pues aumenta los esfuerzos que se transmiten al mismo, presentándose mayores deformaciones en pavimentos flexibles. Varios esfuerzos fueron emprendidos para verificar las

presiones del neumático usadas en la industria de vehículos, basada en la información recogida por la Asociación del Neumático y el Rim (TRA), la Asociación de Fabricantes de Llantas (RMA), la Asociación Americana de Vehículos (ATA) y de la Asociación de los Fabricantes de Vehículos de Remolques (TMA).

2.5.2.2 CLIMA

El clima tiene un efecto significativo sobre el desempeño de pavimentos flexibles. La interacción de los factores climáticos con los materiales del pavimento y la carga es una relación muy compleja. Factores tales como la precipitación, temperatura, ciclos hielo-deshielo, y el nivel freático, afectan a la temperatura del pavimento, el subsuelo y el contenido de humedad; lo que a su vez afecta directamente la capacidad de carga de las capas y el rendimiento final del pavimento.

Se deben analizar al menos 24 meses de datos meteorológicos. Estos son necesarios para que el Modelo Climático Integrado usado pueda proporcionar una solución sensata. Los cambios en los perfiles de temperatura y humedad en la estructura de pavimento y subrasante a través del periodo de diseño del pavimento son considerados en el método mecanicista, por medio del modelo climático integrado. Este es un programa dimensional acoplado del flujo del calor y de la humedad, que simula cambios en el comportamiento y características de los materiales del pavimento y subrasante tomando en cuenta las condiciones climáticas a través de los años de operación.

El Modelo Climático Integrado permite predecir y determinar:

- Módulo dinámico (E^*) base para mezclas asfálticas y módulo Resiliente (MR) para subrasante y bases no ligadas.
- Conversión de perfiles no lineales de temperatura en diferencias de temperatura lineales.
- Distribuciones de frecuencias de gradientes térmicos para cada mes del año.
- Distribuciones de probabilidad para gradientes térmicos durante el día (positivo) y la noche (negativo).
- Parámetros como nivel de penetración de heladas, días húmedos, humedad relativa, etc.

Para lograr el análisis climático requerido para el Incremento de la acumulación de daño, se requiere información de parámetros relacionados al tiempo sobre una base horaria de toda la vida de diseño del proyecto.

La información climática requiere los siguientes datos para realizar el diseño de pavimento flexible:

- Temperatura horaria del aire durante el período de diseño.
- Precipitación horaria durante el período de diseño.
- Velocidad del viento horaria.
- Porcentaje de luz solar horaria.
- Valores humedad relativa ambiental horaria.
- Profundidad del agua estacional o permanente en el sitio del proyecto.

La temperatura del aire es requerida para la ecuación de balance de calor para el cálculo de las ondas largas de radiación emitidas por el aire y por la transferencia de calor convectivo de la superficie hacia el aire.

Los flujos de calor resultantes de la precipitación y la infiltración en la estructura de pavimento no han sido considerados en la formulación de las condiciones de flujos de calor ligados en la superficie. El papel de la precipitación bajo estas circunstancias no es totalmente claro y los métodos para incorporarla en el balance de la energía no han sido realizados. Sin embargo, **la precipitación** es necesaria para calcular la infiltración en los casos de proyectos de rehabilitación de pavimentos y procesos de envejecimiento.

La velocidad del viento es requerida en los cálculos del ajuste del coeficiente de transferencia de calor en la superficie del pavimento. **El porcentaje de rayos de sol** son necesarios para los cálculos de balance de calor en la superficie del pavimento.

La humedad relativa horaria tiene un gran impacto sobre la contracción por secado del JPCP y el CRCP y también para determinar la abertura y el ancho de la grieta inicial en el CRCP.

La profundidad del agua subterránea se pensó para ser la mejor estimación de la profundidad media anual o de la profundidad media estacional. Este parámetro desempeña un papel significativo en la exactitud total de los contenidos de agua de la fundación del pavimento. Cada iteración debería ser hecha para caracterizar este parámetro de la mejor manera posible.

2.5.2.3 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Las propiedades de la estructura de pavimento son valores de entrada para el modelo climático y se organizan en las siguientes categorías: Drenaje y características de la superficie, las propiedades de capa y posible tipo de falla. A continuación se presenta un diagrama resumen de la estructura de pavimento.

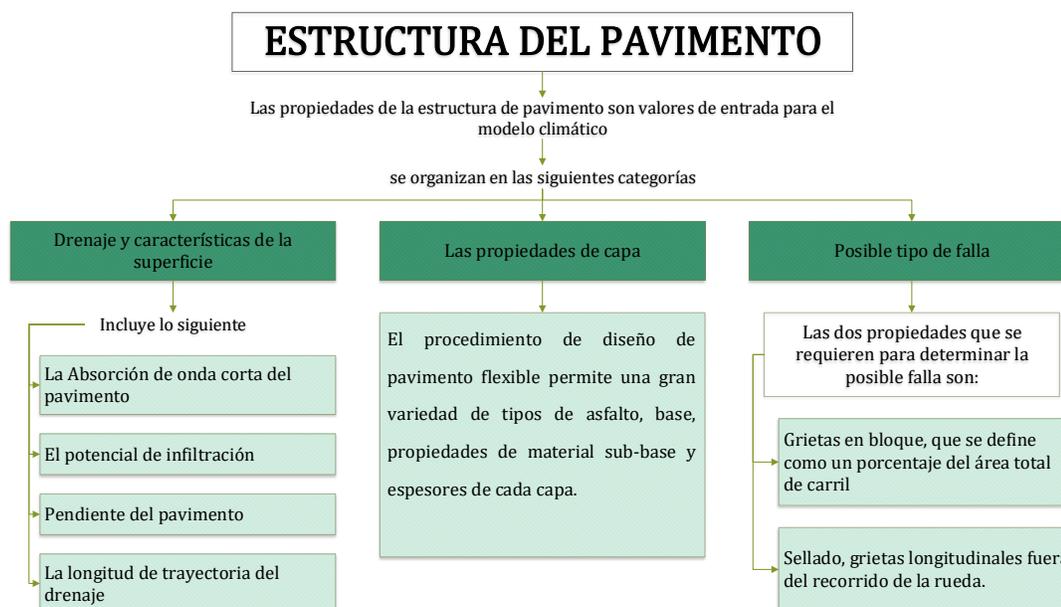


Figura 2.14 Propiedades y Categorías de la Estructura de Pavimento

2.5.2.3.1 Drenaje y características de la superficie.

Estas propiedades generales de la estructura de pavimento para el diseño, y la información requerida en esta categoría incluye lo siguiente:

- Capa superficial de onda corta del pavimento y su capacidad de absorción.
- El potencial de infiltración.
- Pendiente del pavimento.
- La longitud de trayectoria del drenaje.

La Absorción de onda corta del pavimento, ya sea asfáltico o hidráulico, depende de la composición del pavimento, el color y textura. La capacidad de absorción de onda corta es la relación entre la cantidad de energía solar absorbida por la superficie del pavimento y la energía total que fue expuesta a la superficie, lo que naturalmente afecta el régimen de temperatura dentro de la estructura del pavimento y a la respuesta estructural asociada.

La Infiltración define la cantidad de agua que se penetra en la estructura del pavimento. La calibración de los modelos de falla del pavimento flexible supone que no se produce la infiltración de la humedad durante el período de diseño. Así, el procedimiento de diseño de pavimento flexible no permite al diseñador elegir cualquier nivel de infiltración en este momento.

La sección transversal del pavimento es la pendiente perpendicular a la superficie del pavimento en la dirección del tráfico. Esta entrada se utiliza para calcular el tiempo requerido para drenar una capa de base o de subbase del pavimento en una condición inicialmente húmeda.

La longitud de trayectoria del drenaje es la distancia medida a lo largo del resultado de la sección transversal y longitudinal del pavimento. Se mide del punto más alto de la sección representativa del pavimento al punto en donde ocurre el drenaje.

2.5.2.3.2 Las propiedades de capa.

El procedimiento de diseño de pavimento flexible permite una gran variedad de tipos de la mezcla asfáltica, base, propiedades de material sub-base y espesores de cada capa. La estructura del pavimento original definida por el usuario por lo general tiene de 4 a 6 capas. Sin embargo, en el método mecanicista de diseño es posible subdividir la estructura del pavimento en 12 a 15 subcapas para el modelado de la temperatura y las variaciones de la humedad.

2.5.2.3.3 Posible tipo de Falla.

Las dos propiedades que se requieren para determinar la posible falla son:

- Grietas en bloque, que se define como un porcentaje del área total de carril.
- Sellado, grietas longitudinales fuera del recorrido de la rueda, que se define en términos de pies por milla.

Estas propiedades adicionales son necesarias para los modelos de predicción de rugosidad (IRI).

2.6 DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD)

El deflectómetro de impacto es uno de los equipos más conocidos y de mayor difusión en el mundo para medir la capacidad estructural de los pavimentos.

2.6.1 EL ORIGEN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

La historia de los deflectómetros de impacto se remonta a los inicios de la década de los 60 del siglo XX, cuando los ingenieros franceses del LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) comienzan a investigar sobre una forma alternativa a la viga Benkelman para medir la capacidad estructural de los pavimentos; estas investigaciones dan lugar a la construcción del primer prototipo de esta clase de equipos para la medida de la deflexión, cuyo principio de medida era una masa que se dejaba caer sobre un sistema de muelles sin amortiguamiento.

Este sistema presentaba el problema de que, debido a la presencia del sistema de muelles sobre el que impactaba la masa, era difícil controlar la forma del ciclo de carga durante los ensayos. Para solventarlo, los ingenieros franceses idearon un nuevo sistema de dos muelles, con una masa entre ellos, consiguiendo de esta manera que el ciclo de carga fuese de tipo sinusoidal. No obstante, mediante este sistema, la duración de la carga era en todos los casos superior a 40-50 ms, demasiado para simular el paso de una rueda cargada circulando a una velocidad similar a la de un vehículo pesado.

Por ello, los investigadores franceses idearon el sistema que, con las evoluciones correspondientes, ha llegado hasta la actualidad: el deflectómetro con aplicación

de carga amortiguada. De esta forma, la aplicación de la carga seguía siendo de tipo sinusoidal, y además la duración del impacto pasó a ser del orden de 28 ms, lo que sí permitía simular el paso de una rueda cargada a velocidades normales de circulación.

Los ingenieros daneses, tras las lecturas de los trabajos de sus colegas franceses, adoptan su tecnología (la del sistema de masa amortiguada), y de esta manera la Technical University of Denmark construye su primer deflectómetro (Ver Figura 2.15), cuya forma de trabajo es similar a lo que conocemos hoy en día.

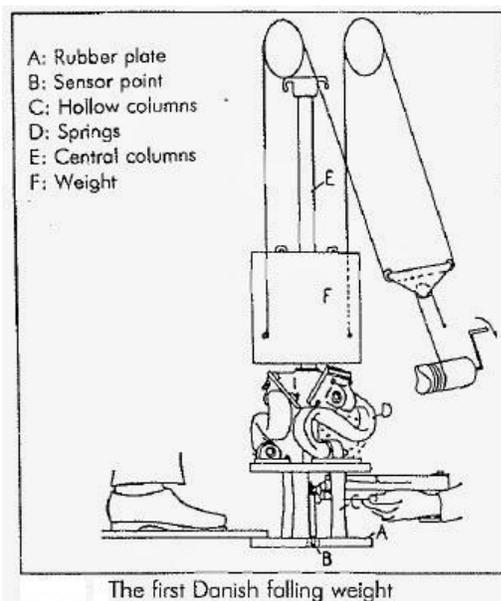


Figura 2.15 Primer Deflectómetro de la Technical University of Denmark

En un principio, en los ensayos con deflectómetro de impacto únicamente se medía la deflexión bajo el punto de aplicación de la carga. Sin embargo, esta deflexión global del pavimento ofrece muy poca información del estado de todas

las capas. De ahí, la necesidad de obtener datos de deflexión en algunos puntos alejados del punto de aplicación de la carga, con el objetivo de conocer la forma del denominado cuenco de deflexión.

Aunque ya con anterioridad y referido a los ensayos con la viga Benkelman se había puesto de manifiesto la oportunidad de registrar simultáneamente en radio de curvatura, es en 1970 cuando C.P. Walkering, de Shell, sugiere la medida de la deflexión en el punto de aplicación de la carga y a una distancia de dos veces el radio de la placa de aplicación de la carga, gracias a las cuales se podría determinar el módulo elástico de las capas en un sistema bicapa de espesores conocidos. Profundizando en dicha idea, posteriormente, en 1974 Ullidtz propone la medida de la deflexión también a una distancia de cinco veces el radio de la placa. Como se sabe, actualmente los deflectómetros de impacto incluyen al menos 6 y hasta 9 geófonos capaces de registrar la deflexión en tantos puntos distanciados secuencialmente del punto de aplicación de la carga.

2.6.2 GENERALIDADES SOBRE EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO FWD

El deflectómetro de impacto en la actualidad es el equipo de referencia para la medición del estado estructural de los pavimentos. El operador controla todas las funciones del deflectómetro desde el ordenador que se instala en el vehículo remolcador (en caso de ser con remolque). Este proceso permite a un solo operador realizar el trabajo de medición de manera fácil y sencilla.

La principal aportación del deflectómetro de impacto frente a los equipos clásicos de deflectometría, es el análisis de la capacidad de soporte mediante el cálculo inverso de los módulos de rigidez de las capas a partir de los cuencos de deflexión registrados.

Para la gestión de datos se suministra el programa RoSy DESIGN, que permite realizar cálculos retroactivos para el análisis de datos de autopistas y aeropuertos.

La magnitud y duración de la carga influye considerablemente en las deflexiones de los pavimentos. Es recomendable que el equipo que se utiliza en pruebas no destructivas sea capaz de aplicar una carga al pavimento, similar a la carga actual de diseño. En el caso de ensayos realizados en carreteras, variando la altura de caída y las masas se puede crear un impulso que simula cargas de tránsito reales hasta 50kN, lo que corresponde a un eje de 10 Toneladas, para carreteras. En el caso de Aeropuertos se debe variar la altura de caída y las masas de forma tal que se pueda crear un impulso en el rango de 900kN a 1400kN.

2.6.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS DEFLECTÓMETROS DE IMPACTO

El sistema de los equipos de impacto tiene que cumplir con los siguientes requerimientos:

- **Sistema de instrumentación**

Durante su operación debe soportar temperaturas de entre -10 y 50 °C; tolerar humedad relativamente alta, lluvia o niebla; y otras condiciones adversas tales como polvo, golpes, o vibraciones que se pueden presentar normalmente en campo.

- **Dispositivo generador de impacto**

El dispositivo generador de impacto debe ser del tipo de masa en caída libre con un sistema de guía; capaz de levantar una o varias masas predeterminadas. La onda debe aplicarse con una amplitud de pico a pico de 50 kN. La duración del impulso de fuerza habrá de permanecer entre 20 y 60 ms. El sistema de guía debe presentar una fricción despreciable diseñada de tal manera que las masas caigan perpendiculares a la superficie del pavimento.

- **Placa de carga**

La placa de carga debe ser capaz de distribuir uniformemente la carga sobre la superficie del pavimento. Los diámetros más comunes de las placas son de 300 y 450 mm de diámetro para realizar mediciones sobre autopistas y aeropistas,

respectivamente. La placa será capaz de permitir mediciones de deflexión en los pavimentos al centro de la placa.

- **Transductor de deflexión**

Debe ser capaz de medir el desplazamiento vertical máximo, y estar montado de tal manera que minimice la rotación angular con respecto a su plano de medición en el movimiento máximo esperado. El número y espaciado de los sensores es opcional y dependerá de los propósitos de la prueba y de las características de cada capa del pavimento. El espaciado adecuado entre sensores es de 300mm. Los sensores pueden ser de varios tipos: transductores de desplazamiento, de velocidad o de aceleración.

- **Celda de carga**

La celda tiene que ser colocada de tal manera que no restrinja la capacidad de obtener mediciones de deflexión, bajo el centro de la placa de carga. Además, debe ser resistente al agua y a los impactos en carretera durante el desarrollo del ensayo o transporte.

2.6.4 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR DEFLEXIONES EN SITIO

1. Coloque el dispositivo de prueba y la placa de carga sobre el punto que se desee probar. El lugar de prueba debe estar libre, en lo posible de gravas, gravillas y escombros para asegurar que la placa quede apoyada completamente. Las superficies de grava o suelo tienen que estar lo más niveladas posible, y remover todo el material suelto para asegurar que la placa de carga haga contacto perfecto con la superficie del pavimento que se pretende evaluar.
2. Mida la temperatura ambiente y la del pavimento. Si la prueba se desarrolla por un periodo largo de tiempo, tome temperaturas del pavimento cada hora para establecer una correlación directa entre la temperatura ambiente y la de la superficie del pavimento.
3. Registre la siguiente información para cada pavimento evaluado: nombre del operador; fecha y hora; factores de calibración; inicio y fin de la estación o localización física del tramo evaluado; localización de cortes o terraplenes; ubicación de alcantarillas, puentes y otras características de control vertical; límites y extensión de los deterioros superficiales; condiciones ambientales, y descripción del tipo de pavimento.
4. Inicie el programa de adquisición de datos, e introduzca la información que requiera la configuración del equipo de deflexión al momento del ensaye. La configuración del equipo se almacena en un archivo de salida, y constituye un insumo para el programa de análisis. Esta información normalmente

incluye el diámetro de la placa de carga, número y posición de los transductores de deflexión y la orientación de los transductores de deflexión con respecto a la placa de carga.

5. Baje la placa de carga y los transductores para asegurarse de que se encuentran en una superficie estable y firme.
6. Levante el dispositivo generador de impacto a la altura deseada, y deje caer el peso. Registre la deflexión máxima de la superficie y la carga máxima. En caso de que ocurra una deformación permanente bajo la placa de carga, mueva el aparato y reduzca el impacto aplicado hasta que la deformación permanente no sea significativa para el primer ensayo en campo.
7. Ejecute como mínimo dos secuencias de carga (c), y compare los resultados. Si las diferencias son mayores del 3 % en cualquier transductor, registre la variabilidad en el reporte. Los ensayos adicionales se pueden hacer con la misma o diferente carga. Con la finalidad de determinar la no linealidad de un sistema de pavimento, es factible desarrollar ensayos para diferentes niveles de carga.

2.6.4.1.1 CORRECCIÓN POR TEMPERATURA

La temperatura como factor climático y ambiental es un agente externo de gran influencia en los análisis de deflexión, el cual afecta directamente la rigidez de la carpeta asfáltica, cuyas propiedades visco elásticas son dependientes de esta variación.

Debido a esta variabilidad, se hace necesario realizar una corrección para conocer la temperatura efectiva del pavimento al momento del ensayo. Algunos estudios sugieren que la temperatura puede ser tomada al tercio o a la mitad de la capa bituminosa, concordando en que no es aconsejable emplear la temperatura tomada sobre la superficie de la carpeta. Esta medición se puede realizar a través de orificios construidos directamente sobre el pavimento ó a partir de estimaciones basadas en correlaciones con datos ambientales.

Dentro de las correlaciones más empleadas se encuentra la del instituto del asfalto, presentada a continuación:

$$M_p = M_a * \left(1 + \frac{1}{Z + 4}\right) - \frac{34}{Z + 4} + 6$$

Ecuación 2-7 Corrección por temperatura en el Deflectometro de Impacto

M_p = Temperatura media de la mezcla (°F).

M_a = Temperatura media ponderada del aire (°F).

z = Profundidad a la cual se estima la temperatura de la mezcla (in). Por recomendación del Instituto del Asfalto, la profundidad z se debe tomar en el punto medio de la capa.

Se recomienda para obtener datos confiables no hacer medición de deflexiones con temperaturas de pavimento inferiores a 2°C o superiores a 40°C.

Pavimentos flexibles que posean capas asfálticas inferiores a 5 cm no tendrán la necesidad de realizar correcciones por temperatura; pero aquellos con espesores superiores deberán aplicar un coeficiente de corrección (Ct), el cual puede ser calculado por medio de la siguiente expresión:

$$Ct = \frac{1}{1 - 0.0008 * h1 * (20 - t)}$$

Ecuación 2-8 Coeficiente de corrección por temperatura para el Deflectometro de Impacto

Donde:

Ct = Coeficiente de corrección por temperatura.

h1 = Espesor de la carpeta asfáltica (cm).

t = Temperatura de la carpeta asfáltica al momento del ensayo (°C).

2.6.5 ENSAYOS A NIVEL DE RED DE CARRETERAS

Este nivel de ensayo proporciona un panorama general de la capacidad estructural de los pavimentos. Los ensayos de deflexión, tradicionalmente se llevan a cabo en intervalos de 100 a 500 m dependiendo de las condiciones específicas de los pavimentos y la magnitud del área por analizar. Se recomienda un mínimo de siete ensayos por sección uniforme de pavimento para asegurar una muestra estadísticamente significativa.

2.6.6 TIPOS DE DEFLECTÓMETROS

2.6.6.1 DEFLECTÓMETRO PORTÁTIL

El Deflectometro de peso liviano (Ver Figura 2.16) es un equipo ligero que permite realizar el ensayo de placa de carga dinámica para control de compactación de capas de relleno, zapatas y zanjas hasta una profundidad de 60cm.



Figura 2.16 Deflectómetro Portátil

El equipo determina el “Modulo de deformación vertical del suelo bajo la acción de una carga dinámica”, sus unidades pueden ser MN/m² ó Mpa.

El peso completo del equipo es aprox. 35Kg, se puede transportar de modo manual hasta la zona de trabajo, pudiéndose acceder a zonas de escaso espacio. Son manipulados por un único operario y no requiere de fuentes de suministro de energía. El tiempo del ensayo es inferior a 2 minutos y se obtienen los resultados en las condiciones reales del sitio en ese momento, pudiéndose imprimir estos de manera inmediata.

2.6.6.2 DEFLECTÓMETRO EN FURGONETA

El Deflectómetro de Impacto integrado en furgoneta (Ver Figura 2.17) está bien equipado para efectuar mediciones en ciudades densamente pobladas, en áreas con tráfico pesado o donde la seguridad y las maniobras rápidas son necesarias.



Figura 2.17 Deflectómetro en Furgoneta



Figura 2.18 Deflectómetro en Furgoneta (Geófonos – Computadora – Placa de Carga)

El FWD estándar integrado en una furgoneta incluye un ordenador, programa FWD basado en Windows, un módulo de registro horario, bloqueo de transporte, indicador de medición de distancias DMI (siglas en inglés para Distance Meter Indicator) integrado en el programa, tres sensores de temperatura, placa de carga de cuatro secciones, 9 geófonos y luces de emergencia (Ver Figura 2.18).

2.6.6.3 DEFLECTÓMETRO EN REMOLQUE



Figura 2.19 Deflectómetro en Remolque

El Deflectómetro en Remolque (Ver Figura 2.19) incluye las últimas tecnologías, que permiten que las pruebas y las actividades de recopilación de datos se realicen 5 veces más rápido, en comparación con los FWD convencionales, mientras se obtienen los mismos niveles de precisión y se cumplen todos los estándares.

Durante las pruebas de FWD, se registran tanto la temperatura del pavimento como la temperatura del aire para que se puedan incluir los ajustes adecuados en los procedimientos de análisis de datos. Las pruebas de campo generalmente se realizan de acuerdo con los procedimientos estándar ASTM descritos en ASTM D 4695-03, *“Guía estándar para medidas generales de deflexión del pavimento”*.

2.7 ENSAYOS DE LABORATORIO

Las relaciones esfuerzo-deformación en los suelos, son indispensables para determinar asentamientos de las fundaciones que descansan sobre los mismos. Estas relaciones esfuerzo-deformación que detallan el comportamiento del suelo pueden ser fácilmente comprendidas cuando se comparan con las correspondientes a sólidos ideales perfectamente elásticos. Es aquí donde el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, toman importancia debido a que ellos definen completamente la relación Esfuerzo-deformación de los materiales elásticos. El Módulo de Elasticidad se puede determinar directamente con un ensayo o por correlaciones, como la propuesta en la guía de diseño de estructuras de pavimento American Association of State Highway and Transportation Officials 1993 (AASHTO 93), la cual tiene como dato de entrada el CBR (AASHTO T-193).

2.7.1 ENSAYO PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD

Todos los materiales se caracterizan por el Módulo de Elasticidad (E) (también llamado Módulo Dinámico (Md), si las mezclas son de asfalto o Módulo de Resiliencia (Mr) si son materiales granulares o suelos sin tratar).

El Módulo Resiliente de Diseño (M_R) es determinado por la Oficina de Materiales del Estado de Florida (SMO, por sus siglas en inglés) directamente de las pruebas de laboratorio (AASHTO T 307 y AASHTO T 274) para nuevos proyectos de construcción y reconstrucción.

Para nuevas construcciones con secciones de relleno sustanciales de más de 3 pies, se deben obtener muestras de las áreas de préstamo potenciales para estimar el módulo elástico del terraplén de la carretera.

La Oficina de Materiales del Estado de Florida (SMO) generalmente utiliza como MR de diseño el valor correspondiente al 90% del módulo elástico determinado según AASHTO T 307 a 11 psi. Así, el 90% de los resultados de las pruebas individuales son iguales o mayores que el valor de diseño.⁹

2.7.2 ENSAYO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE POISSON.

El coeficiente de Poisson, debe su nombre al matemático francés Simeón Poisson (1781-1840). Este coeficiente representa la relación entre la deformación unitaria longitudinal o axial y la deformación unitaria transversal de algún elemento:

$$\nu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

Donde,

ε_2 y ε_1 tienen signos opuestos:

ε_1 : deformación unitaria longitudinal, positiva en tracción.

⁹ Flexible Pavement Design Manual – Office of Design, Pavement Management Section
Tallahassee, Florida.

ε_2 : deformación unitaria transversal, negativa en compresión.

ν : coeficiente de Poisson, es negativo, sin embargo, en la práctica se aplica con signo positivo.

Una de las principales menciones del coeficiente de Poisson fue la realizada en 1678 por Robert Hooke, quien publicó su ley, basado en un estudio de deformación en resortes, así se estableció que para materiales que tienen un comportamiento isotrópico, el módulo de Young, el módulo de cizalladura o corte y el módulo volumétrico o compresibilidad (K) están relacionados por la relación de Poisson.¹⁰

Los valores que se emplean en el cálculo del módulo de Poisson corresponden a la zona elástica sugerida para el módulo de elasticidad, por esta razón generalmente se determinan ambos en una misma prueba o ensayo triaxial.

Anteriormente para la determinación del módulo Resiliente se mencionó el ensayo Triaxial el cual se basa en AASHTO T 274. Para la determinación del coeficiente de Poisson se consideran para los cálculos algunas relaciones (Ver figura), en donde ε_a y ε simbolizan la deformación axial y lateral respectivamente, d el diámetro original del espécimen, d_1 el diámetro del espécimen deformado, L la altura original del espécimen y D_L deformación de la altura del espécimen.

¹⁰ Veseth 1988.

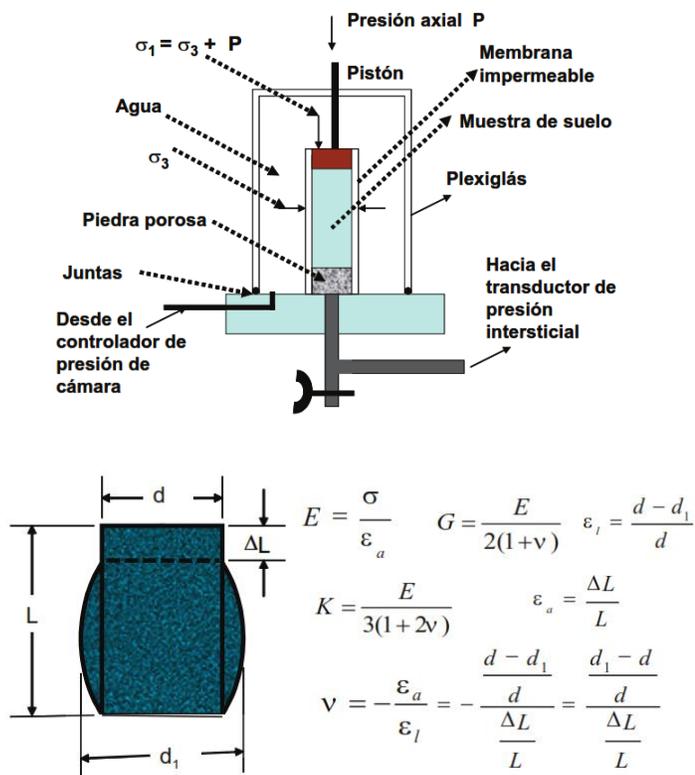


Figura 2.20 Imagen Ilustrativa - Corte del aparato triaxial y relaciones utilizadas.

2.7.3 ENSAYO PARA DETERMINAR LA RELACIÓN DE VALOR SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR, AASHTO T-193)

El Ensayo para determinar la relación de Valor Soporte de California (CBR, California Bearing Ratio) mide la resistencia que opone un suelo a la penetración de un pistón de 3 plg². de área en una muestra de suelo de 6 plg. (15 cm) de diámetro y 5 plg. (12.5 cm) de altura, a una velocidad de 1.27 mm/min (0.5 plg./min). La fuerza necesaria para que el pistón penetre dentro del suelo se mide a determinados intervalos de penetración; estas fuerzas medidas, se comparan con las que se necesitan para producir iguales penetraciones en una muestra

que sirve de patrón, la cual es piedra partida bien graduada; la definición del CBR (Según ecuación 2.7) es:

$$CBR = \frac{\text{Fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5 mm en un suelo}}{\text{Fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5mm en la muestra patrón}}$$

Ecuación 2.7. Ecuación de CBR

*Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos
AASHTO 1993*

Relación que nos da un valor que se indica en porcentaje, el cual puede ser muy variable dependiendo de los suelos analizados; 2 a 4 % en arcillas plásticas hasta un 70 % o más en materiales granulares de buena calidad.

Todos los suelos, tanto finos como gruesos o sus mezclas, se compactan a diferentes contenidos de humedad tanto arriba como bajo de su humedad óptima. Las muestras elaboradas bajo estos procedimientos se sumergen en agua durante un período mínimo de 96 horas, antes de proceder a su ensayo, con el objeto de simular las condiciones de saturación a las cuales van a estar sometidos los suelos como la subrasante de una carretera y en esta forma, obtener los CBR's de los suelos bajo las condiciones más críticas. En el ensayo y en la inmersión, se colocan pesos sobre las muestras, con el objeto de simular las cargas tanto vehiculares, como de la estructura de pavimento, a las cuales van a estar sometidos los suelos de la subrasante.

El método del CBR para diseño de pavimentos, fue uno de los primeros en utilizarse y se basa principalmente en que a menor valor de CBR de la subrasante es necesario colocar mayores espesores en la estructura de pavimento para protegerlo de la frecuencia de las cargas de tránsito.

CAPÍTULO 3

MODELACIÓN DEL PAVIMENTO MEDIANTE SOFTWARE.

3. MODELACIÓN DEL PAVIMENTO MEDIANTE SOFTWARE

En el capítulo dos se abordó el concepto de modelación multicapa elástica de pavimentos, en la cual se toma en cuenta las propiedades específicas de cada capa, siendo este un procedimiento base para diseñar el pavimento flexible. Como datos de salida se obtienen las características mecánicas de las estructuras de pavimento.

Para el caso particular de esta investigación nuestro objeto de comparación será la cantidad de energía aplicada por el FWD y la deformación registrada por este, cabe resaltar que el ensayo y el equipo nos permite conocer el cuenco de deflexión (formada por todas las deformaciones que los geófonos registran) del cual únicamente tomaremos como referente la deformación bajo el plato ya que es el valor que obtiene de realizar la modelación mediante el uso de los software.

3.1 PROYECTOS POR MODELAR

Los proyectos consisten en dos vías terciarias ubicadas en los departamentos de la Libertad y Cabañas, con un TPDA entre 100 y 200 vehículos por día, ambas están construidas en concreto asfáltico, base y sub base granular y con una subrasante mejorada.

3.1.1 CARRETERA LIB16S, TRAMO: LIB22S -TAMANIQUE, LA LIBERTAD

Este camino denominado LIB16S, de acuerdo con el código asignado en la Red Vial Nacional que además la cataloga como una ruta Departamental terciaria, tiene una longitud de 9.325 Km, que se localiza en la zona sur – oeste del Departamento de La Libertad (Ver Figura 3.1), iniciando en el Desvío que desde el camino LIB22S que conduce hacia la población denominada Tamanique, cabecera del municipio homónimo, Departamento de La Libertad, pasando por los Cantones y Caseríos Santa Lucía, San Antonio, El Cuervo, todos de la jurisdicción del mencionado municipio, hasta finalizar aproximadamente en el Km. 18.83 del camino LIB16S, que es el inicio de la zona urbana de Tamanique. Como se presenta el Esquema de ubicación del proyecto. El tramo en general se caracteriza por presentar una superficie de rodamiento con un revestimiento consistente de concreto asfáltico, dos carriles de 3 metros de ancho, uno por sentido, sin hombros.

La fecha de finalización de la vía LIB16S según los Documentos de Aprobación de Requisitos Contractuales (DARC), fue en mayo del año 2014 y la realización del ensayo de deflectometría, en el archivo consolidado con los datos del ensayo entregado por el MOP señala que el mismo fue realizado durante el año 2015, el tiempo transcurrido entre la finalización de la vía y el ensayo fue de 1 año.



Figura 3.1 ESQUEMA DE UBICACIÓN DE LA VÍA LIB22S

3.1.2 CARRETERA CAB17N TRAMO: TEJUTEPEQUE - JUTIAPA, CABAÑAS

La vía denominada CAB17N asignado en la Red Vial Nacional que además la cataloga como una ruta Departamental terciaria se ubica al oeste del Departamento de Cabañas (Ver Figura 3.2), iniciándose en el Km. 0+071 a la salida del Municipio de Tejutepeque en la colonia Guadalupe, tomando rumbo norte, pasando por los Cantones Santa Rita y Santa Olaya hasta finalizar en el Km 8+500 en la entrada al casco urbano del Municipio de Jutiapa al final de la 6a Avenida Norte exactamente en donde comienza el pavimento, ambos Municipios pertenecen al Departamento de Cabañas, Zona Paracentral del País. Como se presenta en el esquema de ubicación del proyecto.

El terreno de la zona está distribuido en: plano 47 % ondulado 26 % y montañoso 27%. La topografía del terreno adyacente es predominantemente del tipo montañoso.

La vía tiene una longitud de 7.79 km, catalogada como ruta departamental con categoría terciaria, con dos carriles de 3 metros de ancho cada uno, uno por sentido y sin hombros. La estructura del pavimento es de tipo flexible, con una subrasante conformada, sobre una base de material granular de 25 centímetros y una superficie de rodadura de concreto asfáltico de 5.25 cm de espesor.

La fecha de finalización de la vía CAB17N según los Documentos de Aprobación de Requisitos Contractuales (DARC), fue en septiembre del año 2011 y la realización del ensayo de deflectometría, en el archivo consolidado con los datos del ensayo entregado por el MOP señala que el mismo fue realizado durante el año 2015, el tiempo transcurrido entre la finalización de la vía y el ensayo fue de 4 años.

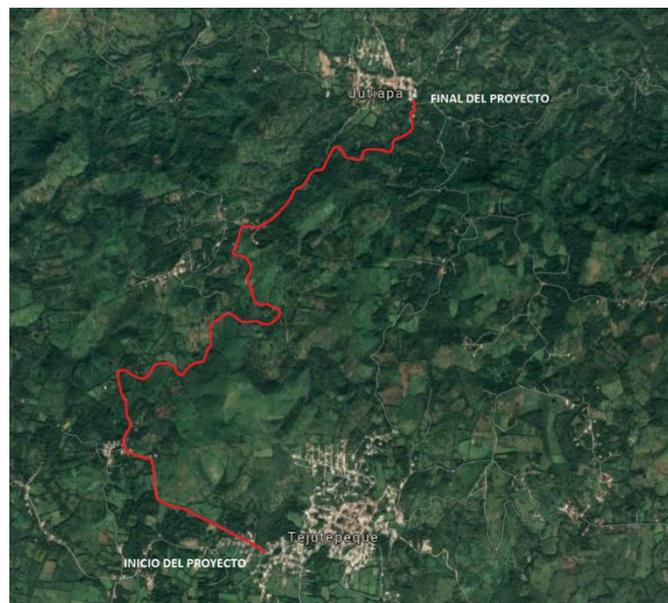


Figura 3.2 ESQUEMA DE UBICACIÓN DE LA VÍA CAB17N

3.2 RECOLECCIÓN DE DATOS DE ENTRADA PARA LOS SOFTWARE

Para poder comparar el comportamiento real del pavimento con el simulado por medio de la modelación con software, se deben determinar deflexiones en el eje Z. Los datos requeridos para realizar dicha modelación son los siguientes: Propiedades de cada capa, definición de las cargas aplicadas, definición de puntos de medición.

3.2.1 Propiedades de cada capa

En resumen, las propiedades de cada capa para las vías estudiadas son las mostradas en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2:

Código	Número de Capas	Tipo	Propiedades			
			Espesor (cm)	CBR (%)	MR (psi)	Poisson
LIB16S	3	Concreto Asfáltico	5.00	-	45,000	0.35
		Base Granular	20.00	80	42,205	0.40
		Subrasante mejorada	30.00	20	17,380	0.40

Tabla 3.1 Propiedades de las capas, proyecto Ruta LIB22S Tramo LIB16S – Tamanique

Código	Número de Capas	Tipo	Propiedades			
			Espesor (cm)	CBR (%)	MR (psi)	Poisson
CAB17N	3	Concreto Asfáltico	5.25	-	45,000	0.35
		Base Granular	25.00	80	42,205	0.40
		Sub-base Granular	40.00	25	20,048	0.40
		Subrasante	-	10	11,153	0.40

Tabla 3.2 Propiedades de las capas, proyecto Ruta CAB17N Tramo Tejutepeque-Jutiapa

A continuación, se muestra el detalle del cálculo de los valores mostrados.

3.2.1.1 Descripción de la Estructura de Pavimento

A continuación, se muestra una breve descripción de la forma en que están conformadas las estructuras de pavimento que se modelarán.

3.2.1.1.1 Carretera Lib16s, Tramo: Lib22s -Tamanique, La Libertad

La carretera situada en el departamento de La Libertad está compuesta de 3 capas las cuales consisten en:

- Concreto asfáltico: el espesor de esta capa corresponde a 5 cms.
- Base Granular: posee un espesor de 20 cms
- Subrasante mejorada: tiene un espesor de 30 cms y esta recibió un tratamiento previo para mejorar sus características

3.2.1.1.2 Carretera CAB17N Tramo: Tejutepeque - Jutiapa, Cabañas

La vía que está situada en el departamento de Cabañas, conformada por 3 capas las cuales son:

- Concreto asfáltico: el espesor de esta capa es de 5.25 cm
- Base Granular: esta posee un espesor de 25 cms
- Sub-base Granular: la capa mencionada es de un espesor de 40 cm

3.2.1.2 El módulo de elasticidad de cada capa

El diseñador de un pavimento, en caso no cuente con pruebas para caracterizar el módulo resiliente, puede considerar correlaciones entre los diferentes indicadores de resistencia.

Algunos valores típicos de módulos de elasticidad de materiales para pavimentos son los mostrados en la Tabla 3.3:

Material	Rango (Kg/cm²)
Concreto Hidráulico	200,000-550,000
Concreto Asfáltico	15,000-45,000
Base tratada con asfalto	5,000-30,000
Base tratada con cemento	35,000-70,000
Concreto Pobre	100,000-300,000
Base Granular	1000-3500
Subbase granular	800-2000
Suelo granular	500-1,500
Suelo fino	200-500
1 Kg/cm ² = 0,1 MPa = 14,3 psi	

Tabla 3.3 Valores de Modulo de Elasticidad

Para el análisis utilizaremos la correlación establecida en el “Appendix CC-1: Correlation of CBR values with soil index properties - Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures 2002” (Ver Ecuación 3-1)

$$M_R = 2555 CBR^{0.64}$$

Ecuación 3-1 Relación entre el Módulo de Resiliencia y el CBR de cada material

Como una validación preliminar de dicha correlación los valores resultantes se compararon con los rangos de los valores de CBR recomendado para materiales definidos por el sistema de clasificación USCS (Ver Figura 3.3). Los materiales de USCS no se usaron como fuente de datos para desarrollar las correlaciones de CBR según AASHTO 2002.

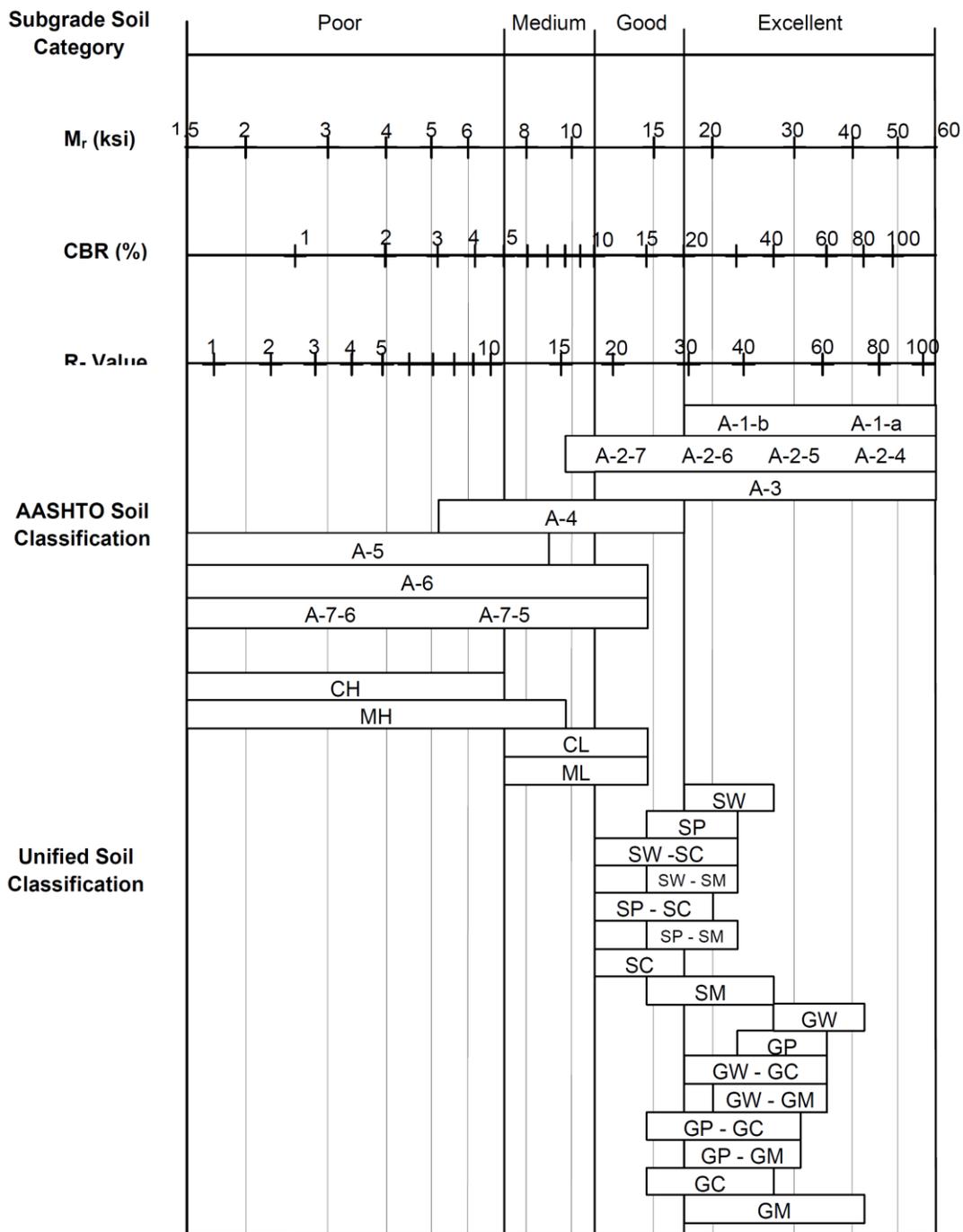


Figura 3.3 Correlaciones típicas del módulo resistente a las propiedades empíricas del suelo y categorías de clasificación. (Modificado de NAPA Information Series 117, "Pautas para el uso de superposiciones HMA para rehabilitar pavimentos PCC", 1994).

3.2.1.3 Coeficiente de Poisson de cada capa

Los valores típicos de la relación de Poisson (ν) para algunos materiales se encuentran en la Tabla 3.4:

Material	Rango	Típico
Concreto hidráulico	0.10-0.20	0.15
Concreto asfáltico	0.15-0.45	0.35
Suelo granular	0.10-0.20	0.15
Suelo fino	0.15-0.35	0.25
Concreto Pobre	0.10-0.20	0.15
Base y subbase granular	0.30-0.40	0.40
Suelo de subrasante	0.30-0.50	0.40

Figura 3.4 Valores típicos de Coeficiente de Poisson de materiales que forman un pavimento

3.2.2 Definición de las Cargas aplicadas

Los pavimentos se diseñan en función del efecto que produce el tráfico sobre ellos y poder resistir un determinado número de cargas aplicadas durante su vida útil. El tránsito está compuesto de vehículos de diferente peso y número de ejes y que para efectos de cálculo se les transforma en un número de ejes equivalentes de 80 kN o 18 Kips,

Cuando se evalúan estructuras de pavimento por medio del FWD que han sido diseñadas bajo un eje equivalente de 18 Kips, como es lo usual en las vías de nuestro país, el valor de la carga que se emplea en el equipo para el impacto es de 9000 lbs, este valor corresponde a la mitad de la carga aplicada por un eje equivalente al pavimento, dado que pretende simular el efecto de un lado del eje sobre el mismo

Para calcular la presión en el neumático, se utilizan los valores de carga aplicada por el Deflectómetro y el radio del plato de carga, despejando la Ecuación 3-2:

$$\alpha = \sqrt{\frac{P}{\rho\pi}}$$

Ecuación 3-2 Relación entre el radio de contacto de una llanta y la carga en el neumático.

Donde:

α = radio de contacto

P = carga total en el neumático

ρ = presión en el neumático (Asumida igual a la presión de contacto)

3.2.3 Definición de puntos de Medición

Para definir el número de puntos de medición se hará uso de métodos estadísticos¹¹ para reducir el rango de valores a datos más representativos.

La muestra inicial de datos de deflectometría para la vía LIB16S es de 37¹², estos se redujeron a un número definitivo de once (11). Para la vía CAB17N el número de datos de deflectometría es de 33, reduciéndose a cuatro (4) (ver sección 3.2.3.4).

¹¹ Pulido Gutiérrez Humberto, De la Vara Salazar Román, (2004);” Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma”, 1º edición, Mc. Graw-Hill, México

¹² y ¹¹ Ver Anexo 1

El Ministerio de Obras Publicas compartió la información obtenida de realizar el ensayo con el Deflectómetro de Impacto según la norma ASTM – 4695-03 en las vías CAB17N y LIB16S. La prueba se realizó cada 250 metros en cada una de las vías, lo que nos devolvió la información de la deflexión en cada punto. (Ver Anexo 1)

El proceso fue consultado y asesorado por un experto en temas estadísticos, consiste en verificar si las muestras de datos obtenidas corresponden a una distribución normal de datos, esto debido a que los datos fueron el resultado de un ensayo. Para usar estos métodos estadísticos se debe comprobar que los datos corresponden a una tendencia normal, para finalmente generar un intervalo de confianza por debajo y por encima de la media de cada distribución de datos las cuales constituirán las muestras reducidas para cada vía.

Al ser las variables requeridas la deflexión contra la energía aplicada, los datos utilizados corresponden a las columnas (Ver Figura 3.5):

- Punto de análisis (distancia en m)
- Carga Transmitida (kN)
- Deflexión (en mm E-03)

ID	FWD_Load	Defl0
5948	36.8	892

Figura 3.5 Columnas retomadas de cuadro de datos proporcionados por el MOP para realizar análisis estadístico.

La elección del valor de Defl0 el cual corresponde al punto bajo el plato de carga es debido a que es el que permite comparar las deflexiones generadas por los software según el valor de carga con el cual se modele.

3.2.3.1 Comprobación de normalidad de datos por medio de histograma y polígono de frecuencia

Para cada grupo de datos se realizó un histograma además de superponer un polígono de frecuencia con el fin de determinar si hay o no una tendencia que favorezca el comportamiento de normalidad(Ver Tabla 3.4 y Tabla 3.5).

A continuación, se presenta el resultado para el tramo correspondiente al departamento de La Libertad (Ver Figura 3.6 y Figura 3.6)

LIB 22S a Tamanique		
Clase	Frecuencia	% acumulado
253	1	2.70%
359.5	2	8.11%
466	9	32.43%
572.5	14	70.27%
679	5	83.78%
785.5	1	86.49%
y mayor...	5	100.00%

Tabla 3.4 Frecuencia de Clases para muestra de datos para calle en La Libertad.

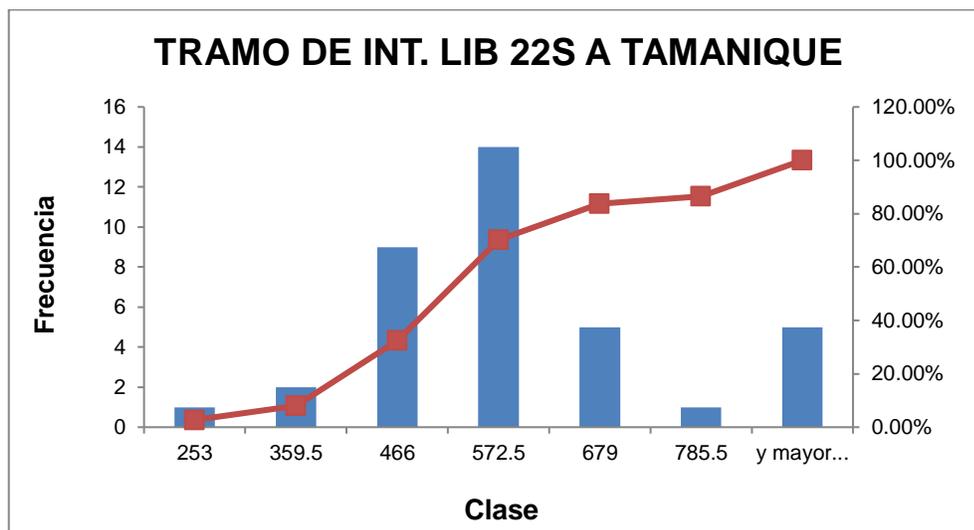


Figura 3.6 Histograma y polígono de frecuencia superpuestos carretera en La Libertad

De igual forma para los resultados del tramo correspondientes al departamento de Cabañas se realizó un análisis estadístico.

Tramo CAB17N Tejutepeque a Jutiapa		
<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>
312	1	3.03%
445	3	12.12%
578	13	51.52%
711	9	78.79%
844	6	96.97%
y mayor...	1	100.00%

Tabla 3.5 Frecuencia de Clases para muestra de datos para calle en Cabañas.

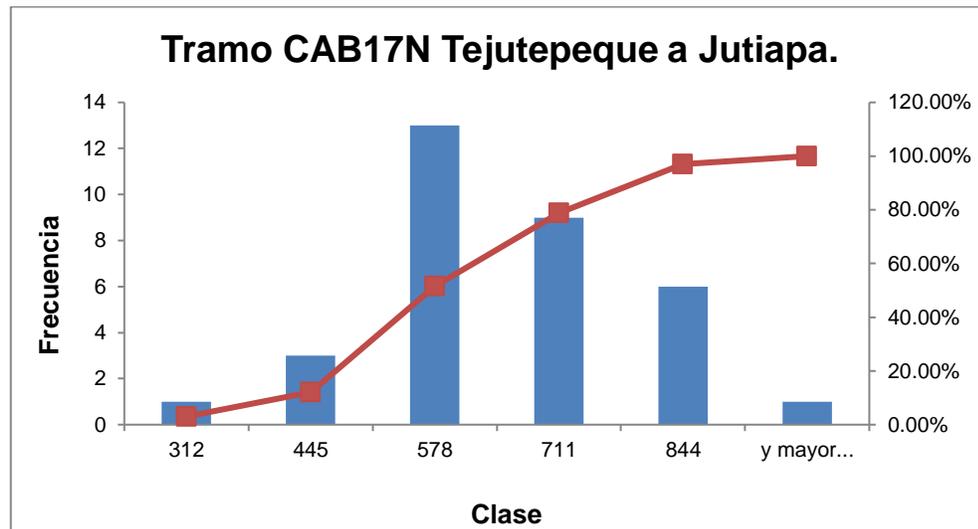


Figura 3.7 Histograma y polígono de frecuencia superpuestos carretera en Cabañas.

Los histogramas muestran una tendencia hacia una distribución normal.

3.2.3.2 Comprobación de normalidad de datos por pruebas P y Q

La aplicación XLSTAT versión estudiantil puede instalarse sobre Microsoft Office Excel. Con este Software se generó las pruebas P y las pruebas Q para determinar si se acepta que la distribución se comporte como normal. De XLSTAT se obtienen las gráficas de la Figura 3.8, Figura 3.10, Figura 3.11 y Figura 3.11

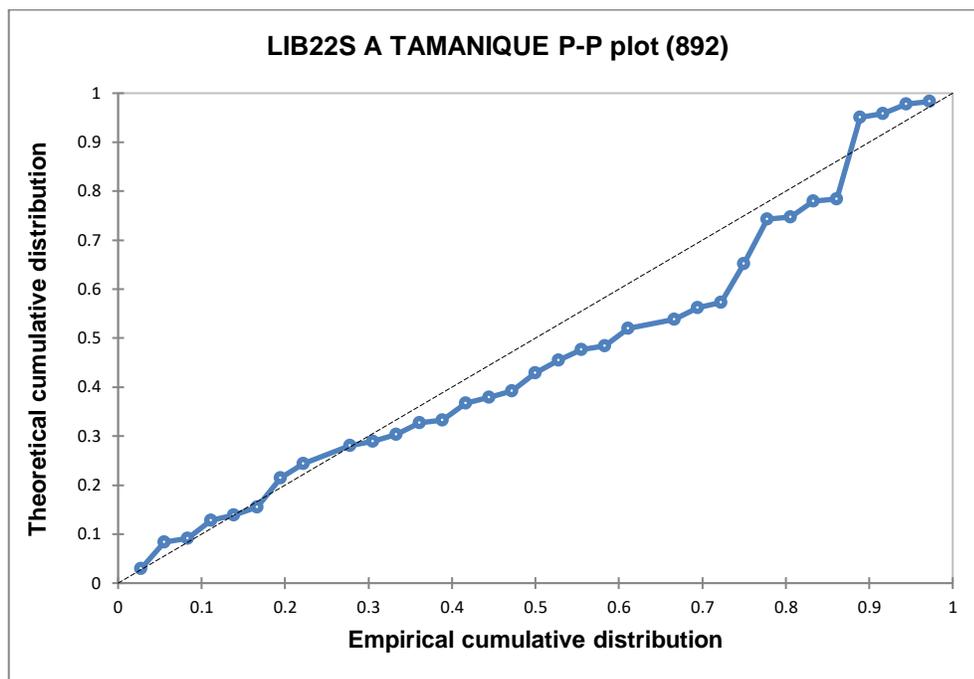


Figura 3.8 Prueba "P" muestra de datos calle LIB22S a Tamanique

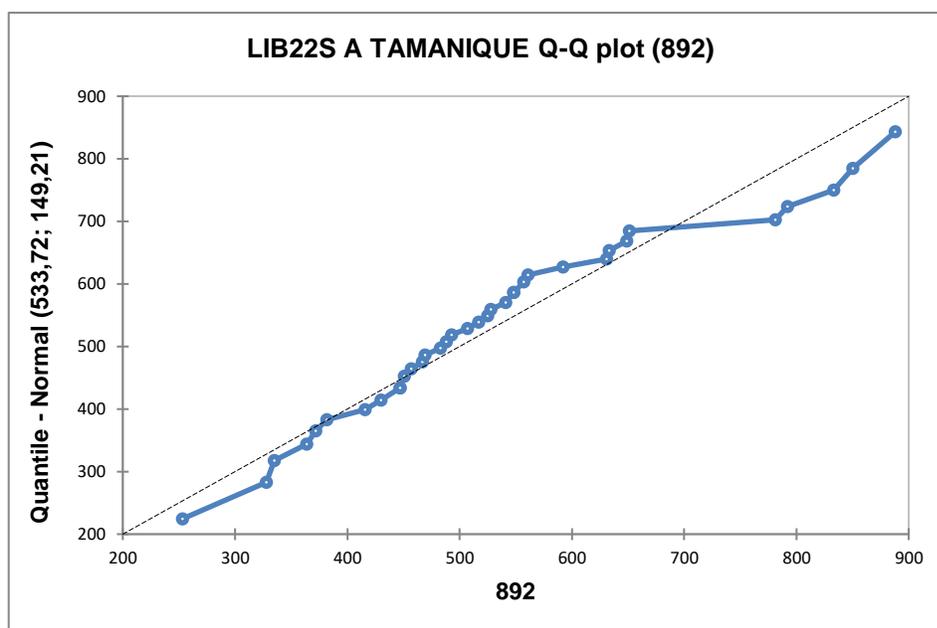


Figura 3.9 Prueba Q para muestra de datos LIB22S a Tamanique

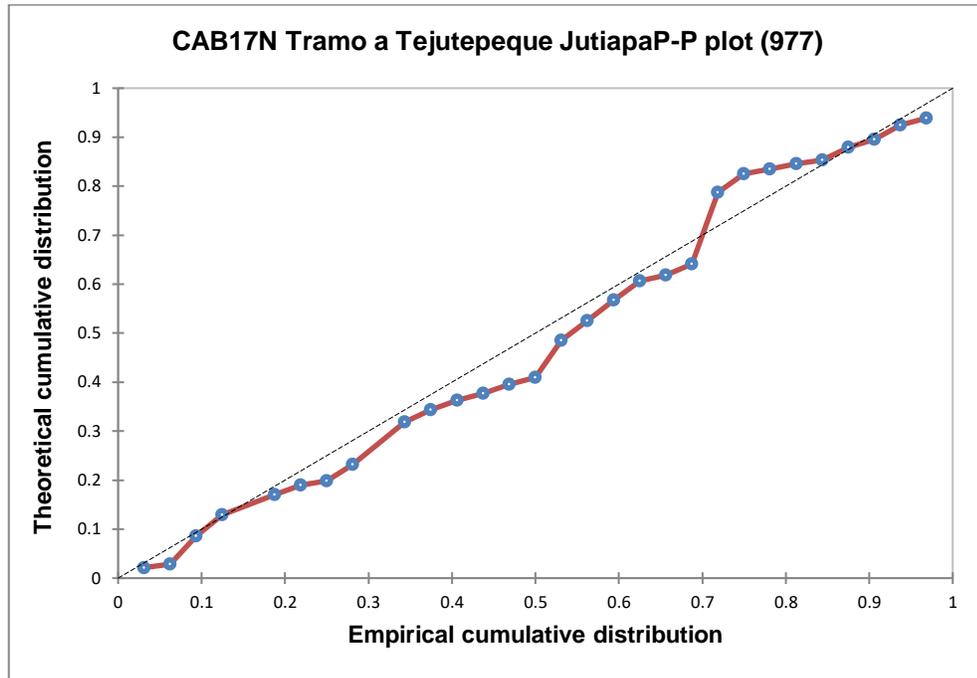


Figura 3.10 Prueba P para muestra de datos CAB17N Tejutepeque a Jutiapa

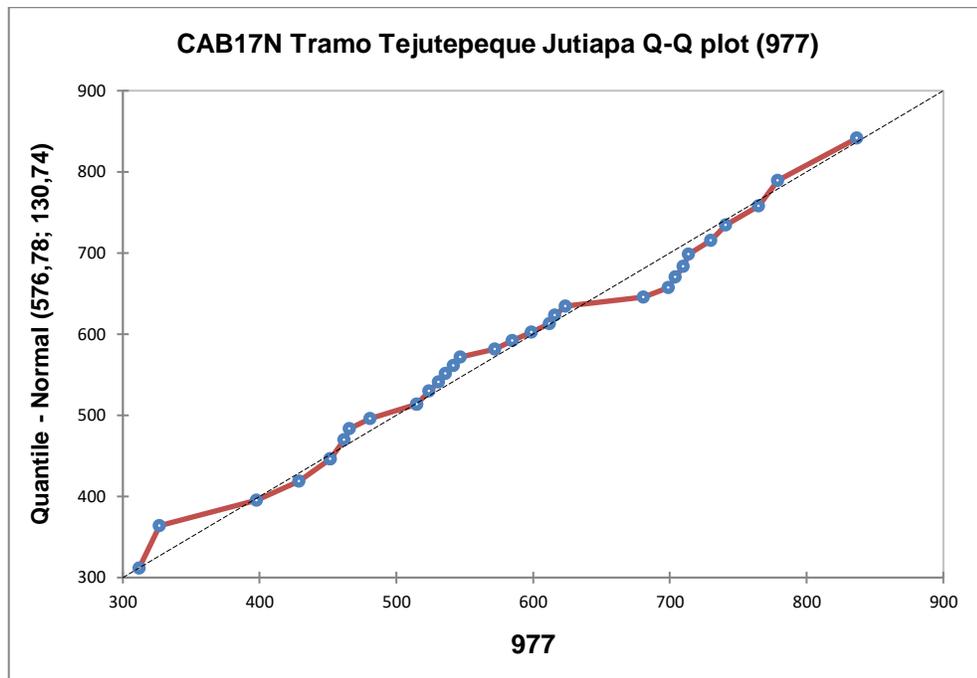


Figura 3.11 Prueba Q para muestra de datos CAB17N Tejutepeque a Jutiapa

La filosofía de estas pruebas “P” y “Q” es que si los puntos se acercan a la línea de tendencia podemos asumir “normalidad”. Siguiendo esta tendencia, de las gráficas podemos concluir que la muestra se comporta como una distribución de datos normales. Para comprobar esto se generó un gráfico de normalidad para cada proyecto, auxiliándonos de Microsoft Excel (Ver Figura 3.13 y Figura 3.13).

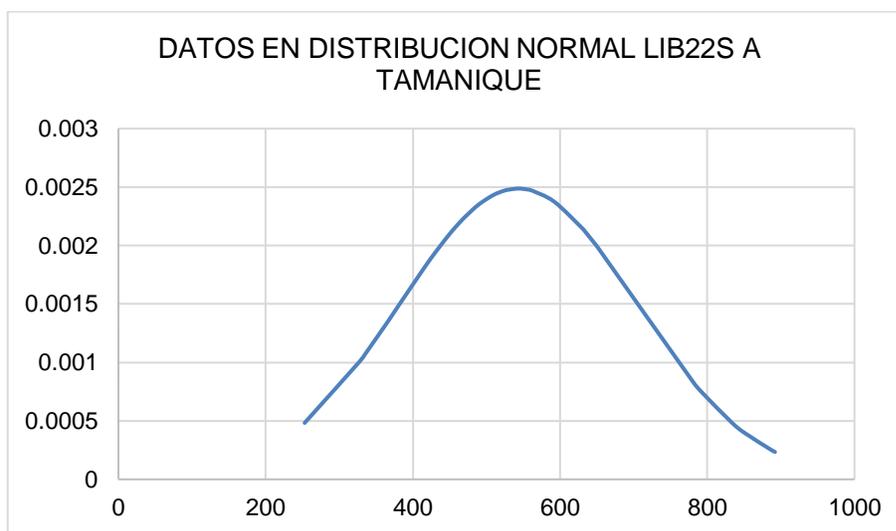


Figura 3.12 Grafico de datos normalizados muestra LIB22S

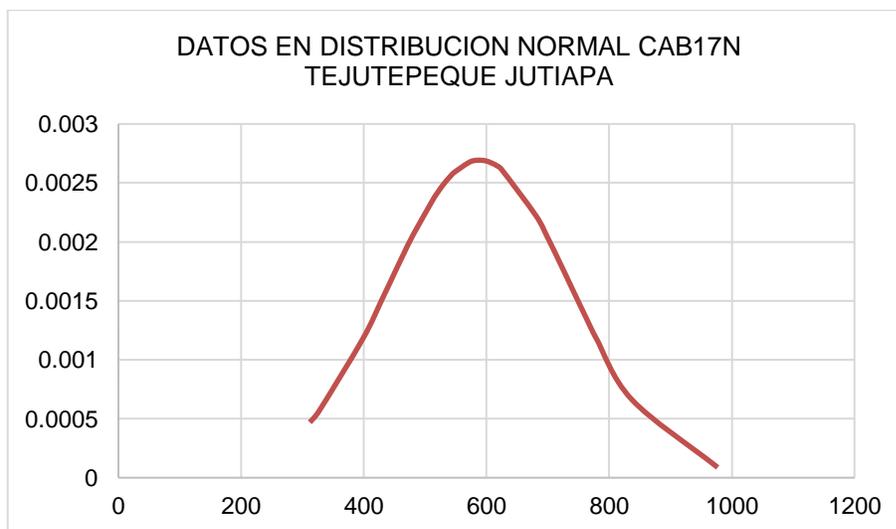


Figura 3.13 Grafica de datos normalizados muestra CAB17N

3.2.3.3 Comprobación de normalidad de datos por coeficiente de curtosis y asimetría

Para efectos prácticos se usó la aplicación que posee por defecto Microsoft Excel en la pestaña Datos, para obtener los parámetros generales de un análisis descriptivo. Ver Figura 3.14

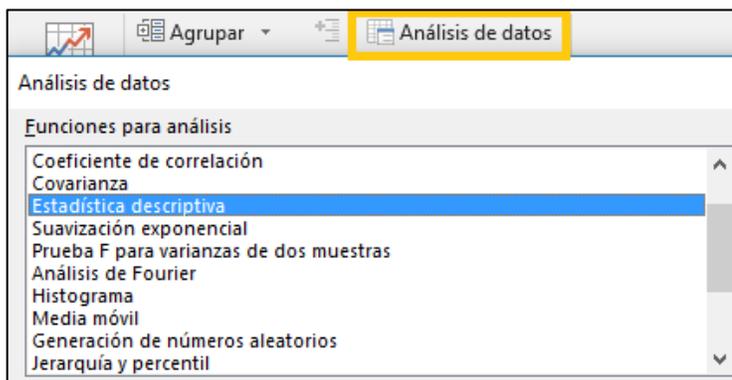


Figura 3.14 Herramienta de Microsoft Office Excel para análisis estadístico de datos.

Al tener estos datos se generó con Excel un nuevo resumen de datos para mostrar los datos estadísticos siguientes:

LIB22S a Tamanique	
Media	543.405405
Error típico	26.3724325
Mediana	517
Moda	548
Desviación estándar	160.417244
Varianza de la muestra	25733.6922
Curtosis	0.03773383
Coeficiente de asimetría	0.72798993
Rango	639
Mínimo	253
Máximo	892
Suma	20106

Cuenta	37
Mayor (1)	892
Menor (1)	253
Nivel de confianza (95.0%)	53.4857721
CAB17N Tejutepeque Jutiapa	
Media	588.909091
Error típico	25.7884886
Mediana	572
Moda	515
Desviación estándar	148.143588
Varianza de la muestra	21946.5227
Curtosis	0.18207061
Coefficiente de asimetría	0.38559939
Rango	665
Mínimo	312
Máximo	977
Suma	19434
Cuenta	33
Mayor (1)	977
Menor (1)	312
Nivel de confianza (95.0%)	52.5294323

Tabla 3.6 Resultados de datos obtenidos por la herramienta Análisis de datos

De los cuadros se analizó el valor del coeficiente de Curtosis y el de Asimetría cuyos parámetros deben encontrarse en un intervalo de $[-2, 2]$.

Al leer la Tabla 3.6 en la que se muestra el resumen del análisis estadístico para cada serie de datos, se pone en evidencia que los coeficientes están dentro del intervalo $[-2, 2]$, para las dos series de datos.

3.2.3.4 Determinación del intervalo de confianza

Finalmente, de los datos obtenidos y del análisis realizado podemos razonar lo siguiente: Como los datos muestran normalidad se puede afirmar que la tendencia de los resultados generados por el FWD es a la media de cada una de las muestras, sin embargo, puede haber incertidumbre, por lo que es conveniente reducir la muestra a un intervalo de confianza con el 95% de confiabilidad.

Las muestras se redujeron de 37 datos a 11 para la vía LIB22S y de 33 datos a 4 para la vía CAB17N Los puntos que se utilizaran son los que se muestran en la Tabla 3.7:

PROYECTO 1 "Tramo de Int. LIB 22S a Tamanique"	PROYECTO 2 "Tramo de Tejutepeque a Jutiapa"
543.4054 ± 53.4858	588.90 ± 52.53

Tabla 3.7 Intervalo de Confiabilidad al 95 % para muestras analizadas.

Para el proyecto 1 "Tramo de Int. LIB 22S a Tamanique" se utilizan los siguientes datos (VerTabla 3.8):

Propiedades				
Tipo	Espesor (cm)	MR		Poisson
		(psi)	(kPa)	
Concreto Asfáltico	5	45000	310264.20	0.35
Base Granular	20	42205	290993.35	0.4
Subrasante mejorada	30	17380	119830.93	0.4

1 psi = 6894.76 Pa

PROYECTO 1: TRAMO DE INT. LIB 22S A TAMANIQUE								
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	CARGA FWD (kN)	CARGA FWD (lb)	PRESIÓN LLANTA (SI)	PRESIÓN LLANTA (kPa)	DEFLEXIÓN EN EL PLATO (mm)
5956	Int. LIB22S - Tamanique	2+000	2+250	37.3	8385.37	76.52	527.60	0.541
5958	Int. LIB22S - Tamanique	2+500	2+750	37.6	8452.82	77.14	531.84	0.525
5959	Int. LIB22S - Tamanique	2+750	3+000	37.6	8452.82	77.14	531.84	0.548
5961	Int. LIB22S - Tamanique	3+250	3+500	37.7	8475.30	77.34	533.26	0.507
5965	Int. LIB22S - Tamanique	4+250	4+500	37.4	8407.85	76.73	529.01	0.561
5966	Int. LIB22S - Tamanique	4+500	4+750	37.7	8475.30	77.34	533.26	0.528
5967	Int. LIB22S - Tamanique	4+750	5+000	37.5	8430.34	76.93	530.43	0.548
5968	Int. LIB22S - Tamanique	5+000	5+250	37.6	8452.82	77.14	531.84	0.517
5974	Int. LIB22S - Tamanique	6+500	6+750	37.4	8407.85	76.73	529.01	0.557
5977	Int. LIB22S - Tamanique	7+250	7+500	38	8542.74	77.96	537.50	0.493
5981	Int. LIB22S - Tamanique	8+250	8+500	37.8	8497.78	77.55	534.67	0.592

Tabla 3.8 Datos para proyecto 1 "Tramo de Int. LIB 22S a Tamanique"

”

Para el proyecto 2 "Tramo de Tejutepeque a Jutiapa" se utilizan los siguientes datos (VerTabla 3.9):

Propiedades				
Tipo	Espesor (cm)	MR		Poisson
		(psi)	(kPa)	
Concreto Asfáltico	5.25	45000	310264.20	0.35
Base Granular	25	42205	290993.35	0.4
Sub-base Granular	40	20048	138226.15	0.4
Subrasante	-	11153	76897.26	0.4

1 psi = 6894.76 Pa

PROYECTO 2: TRAMO DE TEJUTEPEQUE A JUTIAPA								
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	CARGA FWD (kN)	CARGA FWD (lb)	PRESIÓN LLANTA (SI)	PRESIÓN LLANTA (kPa)	DEFLEXIÓN EN EL PLATO (mm)
10900	Tejutepeque - Jutiapa	3+000	3+250	37.7	8475.30	77.34	533.26	0.542
10901	Tejutepeque - Jutiapa	3+250	3+500	38	8542.74	77.96	537.50	0.585
10907	Tejutepeque - Jutiapa	4+750	5+000	37.9	8520.26	77.75	536.09	0.547
10914	Tejutepeque - Jutiapa	6+500	6+750	37.4	8407.85	76.73	529.01	0.572

Tabla 3.9 Datos para proyecto 2 "Tramo de Tejutepeque a Jutiapa"

3.2.3.5 La posición de cada uno de los puntos de medición

La definición de puntos de medición se refiere a las coordenadas en “x, y, z”, donde se desea obtener los valores de esfuerzo, deformación y deflexión. Los softwares a utilizar trabajan con el siguiente esquema de coordenadas (Ver Figura 3.15):¹³

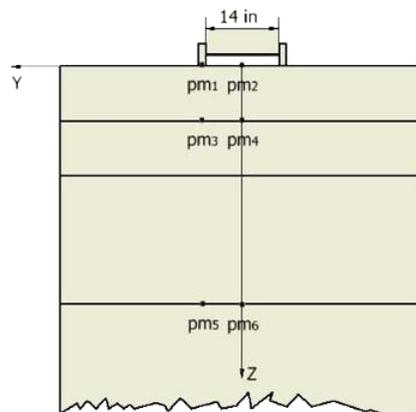


Figura 3.15 Eje de referencia para coordenadas de puntos de ensayo, PITRA PAVE

Los ensayos realizados por el Ministerio de Obras Públicas se ubicaron en el eje del carril (Ver Figura 3.16), correspondiendo a las coordenadas (0, 0, 0).



Figura 3.16 Ubicación al eje del carril, ensayo FWD.

¹³ Manual PITRA PAVE

Como ejemplo del uso de cada Software se realizara la modelación de dos tramos de la Carretera LIB16S y un tramo de la Carretera CAB17N, utilizando los datos mostrados en la Tabla 3.10, Tabla 3.11, Tabla 3.12 y Tabla 3.13.

Propiedades - Carretera LIB16S				
Tipo	Espesor (cm)	MR		Poisson
		(psi)	(kPa)	
Concreto Asfáltico	5	45000	310264.20	0.35
Base Granular	20	42205	290993.35	0.4
Subrasante mejorada	30	17380	119830.93	0.4

Tabla 3.10 Propiedades de Carretera LIB16S

PROYECTO 1: TRAMO DE INT. LIB 22S A TAMANIQUE								
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	CARGA FWD (kN)	CARGA FWD (lb)	PRESIÓN LLANTA (SI)	PRESIÓN LLANTA (kPa)	DEFLEXIÓN EN EL PLATO (mm)
5977	Int. LIB22S - Tamanique	7+250	7+500	38	8542.74	77.96	537.50	0.493
5956	Int. LIB22S - Tamanique	2+000	2+250	37.3	8385.37	76.52	527.60	0.541

Tabla 3.11 Datos a utilizar para la modelación de la carretera LIB16S

Propiedades - Carretera CAB17N				
Tipo	Espesor (cm)	MR		Poisson
		(psi)	(kPa)	
Concreto Asfáltico	5.25	45000	310264.20	0.35
Base Granular	25	42205	290993.35	0.4
Sub-base Granular	40	20048	138226.15	0.4
Subrasante	-	11153	76897.26	0.4

Tabla 3.12 Propiedades Carretera CAB17N

PROYECTO 2: TRAMO DE TEJUTEPEQUE A JUTIAPA								
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	CARGA FWD (kN)	CARGA FWD (lb)	PRESIÓN LLANTA (SI)	PRESIÓN LLANTA (kPa)	DEFLEXIÓN EN EL PLATO (mm)
10900	Tejutepeque - Jutiapa	3+000	3+250	37.7	8475.30	77.34	533.26	0.542

Tabla 3.13 Datos a utilizar para la modelación de la carretera CAB17N

3.3 MODELACIÓN CON BISAR 3.0

Bisar 3.0 es un software creado por Shell para poder conocer a partir de los datos de diseño los esfuerzos, deformaciones y deflexiones a los cuales se encuentra sometido debido a las cargas que soportara. VerFigura 3.17



Figura 3.17 Interfaz de Oracle VM. Software para virtualizar sistemas operativos

Para poder realizar la modelación en el software Bisar 3.0 es necesario poder generar un ambiente virtual en el que la estructura de Bisar 3.0 (DOS BOX) pueda funcionar. Un sistema operativo que permite este entorno es Windows XP, como se sabe que en la actualidad es un software obsoleto usaremos un software más que nos permita simular Windows XP en cualquiera de los Windows actuales. Para el presente ejemplo se realizará en Windows 10 pero se puede reproducir en sus otras versiones (Vista, 7, 8 y 8.1).

Usaremos el software Virtual Box Administrator de Oracle VM para virtualizar el sistema operativo en nuestro ordenador. Ver Figura 3.18



Figura 3.18 Sistema Operativo Virtualizado

Como ejemplo de uso del Software se modelarán los estacionamientos con el ID 5977 y 5956 de la vía LIB16S y el estacionamiento con el ID 10900 de la vía CAB17N. Estos se muestran en: Tabla 3.10, Tabla 3.11, Tabla 3.12, Tabla 3.13

3.3.1 Creación del Proyecto

Una vez se ingresa a un sistema operativo que sea capaz de generar el ambiente necesario para Bisar 3.0 se procede a pulsar doble clic sobre el icono del software y así comenzar a utilizarlo. Figura 3.19



Figura 3.19 Inicializando el software Bisar 3.0

Para crear un proyecto nuevo, daremos click en el botón project en la barra de herramientas que Bisar 3.0 muestra por defecto, luego en el botón “new”.

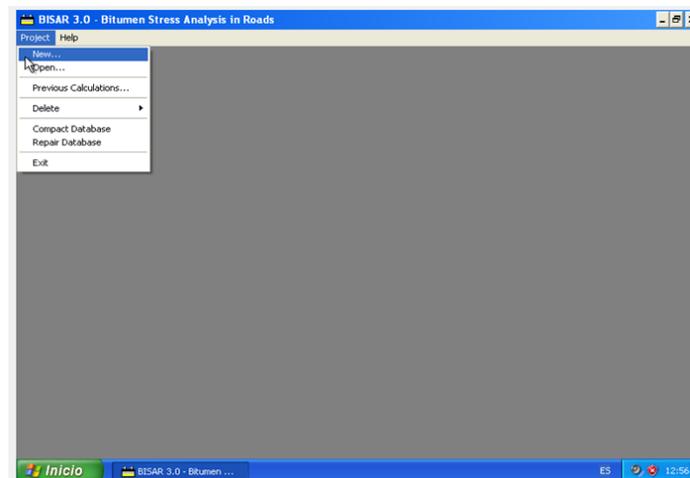


Figura 3.20 Comenzando un nuevo proyecto en Bisar 3.0

Como se ve en la Figura 3.20. A continuación, se despliega una ventana que contiene 3 hojas en las cuales ingresaremos la información de entrada necesaria para que Bisar 3.0 pueda realizar el análisis multicapa.

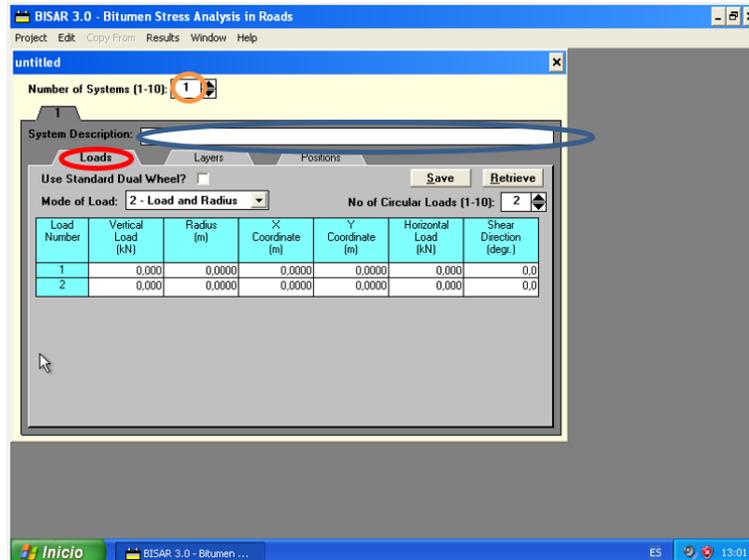


Figura 3.21 Primera hoja, información relativa a las cargas.

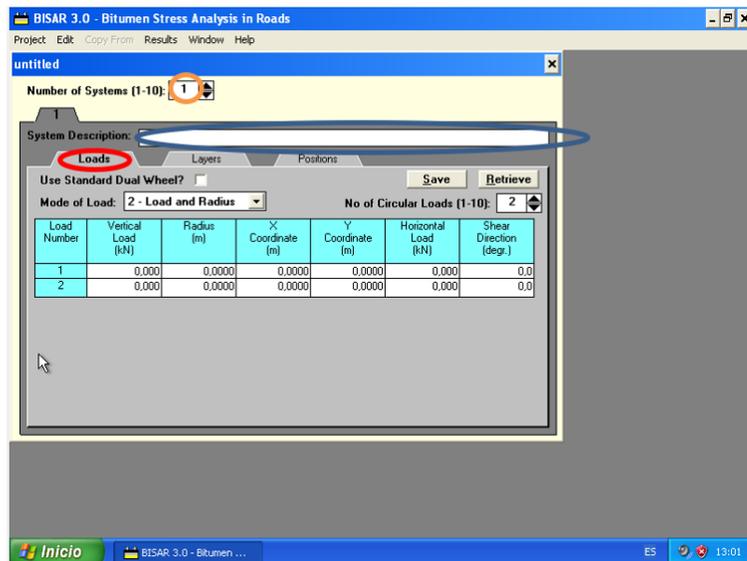


Figura 3.22 Primera hoja, información relativa a las cargas.

En pantalla se nos muestra un campo en blanco para poder rellenar con el nombre del proyecto, además de que cuantos sistemas quieren ser generados en el mismo proyecto (Esto es por si se quieren analizar numerosas

combinaciones de vehículos y cargas. Bisar 3.0 permite hasta 10 en el mismo proyecto).

3.3.2 Establecer cargas a aplicar

En la primera hoja se solicita la información de las cargas a aplicar, el radio de la llanta, las coordenadas de la carga (por si nos interesa conocer la influencia en un punto alejado), carga horizontal por si tenemos un cuerpo que esté produciendo un empuje lateral a la estructura de pavimento y el ángulo en el que se produce el esfuerzo cortante como se muestra en la Figura 3.22. (Estos dos últimos puede que no aparezcan en una vía común. Para efectos prácticos calcularemos sin incluir dichos parámetros).

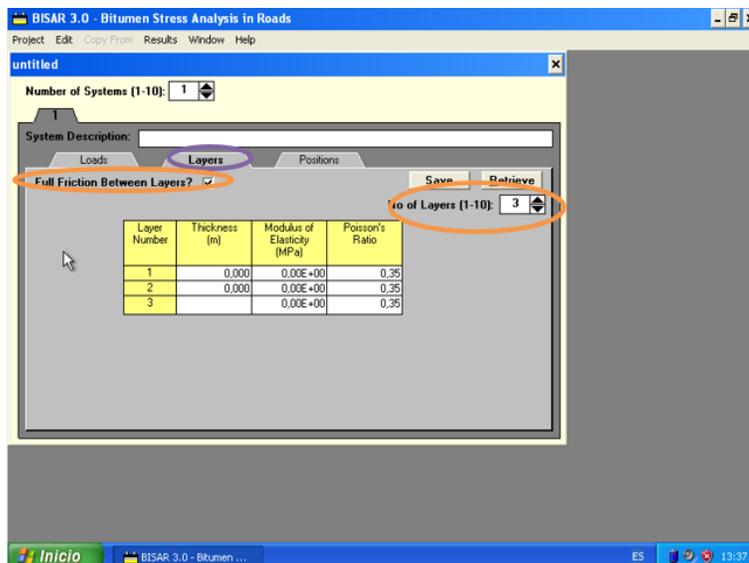


Figura 3.23 Hoja dos, información sobre las capas que componen la estructura de pavimento

3.3.3 Estructura del Pavimento

En la segunda hoja se coloca la información de las capas que componen la estructura del pavimento. Por defecto está marcada la opción de considerar que hay fricción entre cada una de las capas del pavimento, así como también la posibilidad de cambiar el número de capas que componen el pavimento. Bisar 3.0 permite realizar un análisis que va desde 1 hasta 10 capas. La última capa siempre poseerá un espesor infinito por tratarse de la subrasante. Como se ve en la Figura 3.23 y para la ubicación de los cargares se muestran en la Figura 3.24

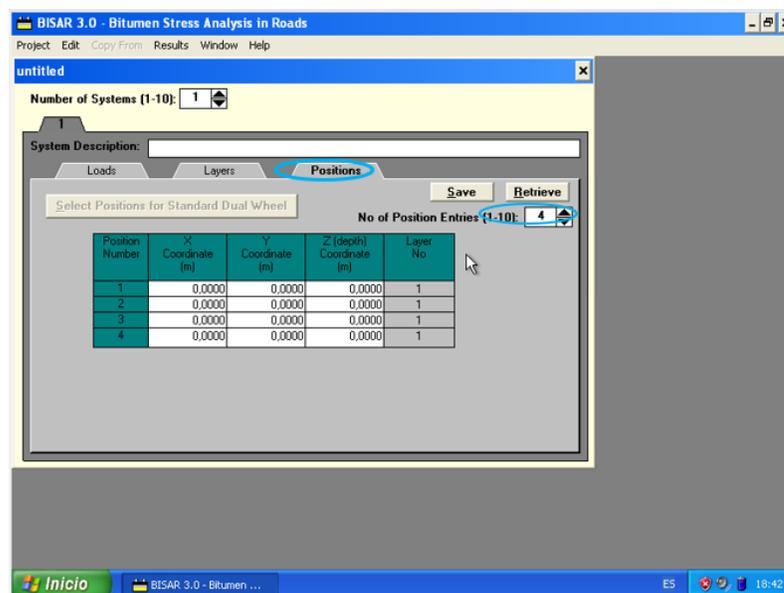


Figura 3.24 Hoja tres, información de ubicación de las llantas del vehículo.

Para efectos prácticos utilizaremos los siguientes datos para realizar el análisis de multicapa elástica de un diseño de pavimento existente.

Cargas

Carga Vertical (Vertical Load)	38 kN
Radio de la Llanta	0.15 m
Coordenada en X de la carga	0.0
Coordenada en Y de la carga	0.0
Carga Horizontal	0.0
Dirección del Esfuerzo Cortante	0°

Tabla 3.14 Información relativa a las cargas

Capas

Numero de Capa	Espesor (m)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Relación de Poisson
1	0.05	3.1E+02	0.35
2	0.2	2.91E+02	0.4
3	0.3	1.20E+02	0.4
4		7.70+01	0.4

Tabla 3.15 información Relativa a las Capas

En la hoja de posición todos los valores serán cero debido a que utilizamos un Deflectómetro de Impacto y su celda de carga impacta solo un punto, y las llantas del mismo dispositivo no producen influencia por lo que se puede tomar como el origen de coordenadas el punto donde la celda de impacto transmite la fuerza.

3.3.4 Definición de Puntos de Respuesta y Datos de Salida

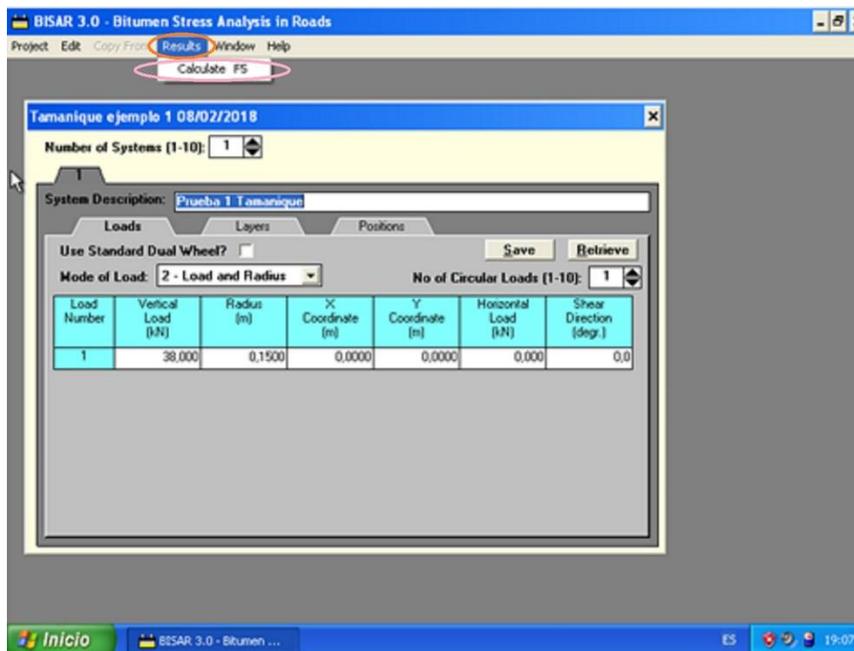


Figura 3.25 Opción para realizar el análisis de datos.

Una vez que todos los datos se insertan en los diferentes campos se elige la opción Calcular que se encuentra en la barra de herramientas en el menú "Results" o también es posible utilizar como atajo del teclado F5 para que Bisar 3.0 comience a realizar el análisis multicapa elástica en la estructura que se ha modelado. Ver Figura 3.25

Una vez desplegado el cuadro de diálogo de los Datos Calculados se elige la opción "Block Table" (Ver Figura 3.26) para obtener una lista detallada de los resultados.

Aquí podremos leer los resultados del análisis multicapa elástica distribuidos por columnas además de poder tener a la vista los datos de entrada.

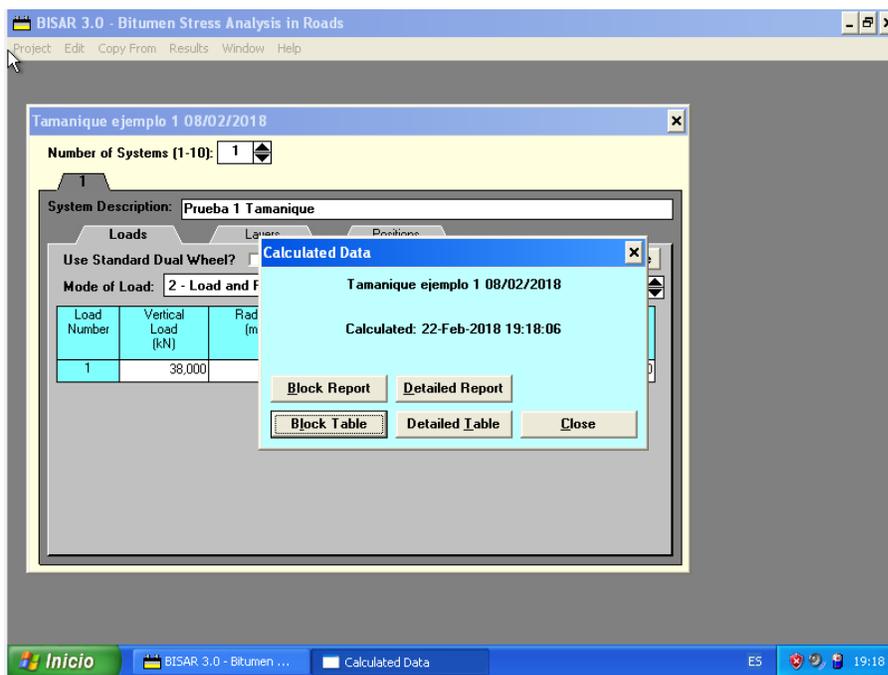


Figura 3.26 Cuadro de Dialogo para elegir la manera de presentar los datos

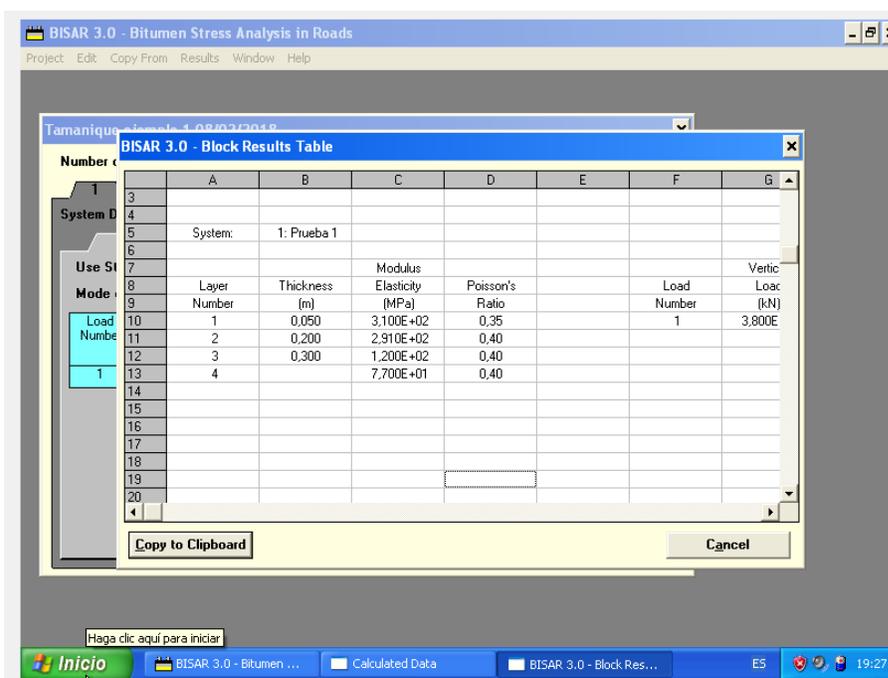


Figura 3.27 Cuadro de Resultados

BISR 3.0 - Bitumen Stress Analysis in Roads

Tamaniqu... 1.08.00.0304.8

BISR 3.0 - Block Results Table

Number	A	B	C	D	E	F	G
11	2	0,200	2,910E+02	0,40			
12	3	0,300	1,200E+02	0,40			
13	4		7,700E+01	0,40			
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22	Position	Layer	X-Coordinate	Y-Coordinate	Depth	Stress	Stress
23	Number	Number	(m)	(m)	(m)	XX (MPa)	YY (MPa)
24	1	1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-5,425E-01	-5,425E
25	2	1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-5,425E-01	-5,425E
26	3	1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-5,425E-01	-5,425E
27	4	1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-5,425E-01	-5,425E

Copy to Clipboard Cancel

Inicio BISR 3.0 - Bitumen ... Calculated Data BISR 3.0 - Block Res... ES 19:30

Figura 3.28 Tabla de Resultados 1

BISR 3.0 - Bitumen Stress Analysis in Roads

Tamaniqu... 1.08.00.0304.8

BISR 3.0 - Block Results Table

Number	F	G	H	I	J	K	L
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21	Stress	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displace
22	XX (MPa)	YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX (µm)	YY (µm)	ZZ (µm)	UX (µm)
23							
24	-5,425E-01	-5,425E-01	-5,376E-01	-5,306E+02	-5,306E+02	-5,091E+02	0,000E
25	-5,425E-01	-5,425E-01	-5,376E-01	-5,306E+02	-5,306E+02	-5,091E+02	0,000E
26	-5,425E-01	-5,425E-01	-5,376E-01	-5,306E+02	-5,306E+02	-5,091E+02	0,000E
27	-5,425E-01	-5,425E-01	-5,376E-01	-5,306E+02	-5,306E+02	-5,091E+02	0,000E

Copy to Clipboard Cancel

Inicio BISR 3.0 - Bitumen ... Calculated Data BISR 3.0 - Block Res... ES 19:32

Figura 3.29 Tabla de Resultados 2

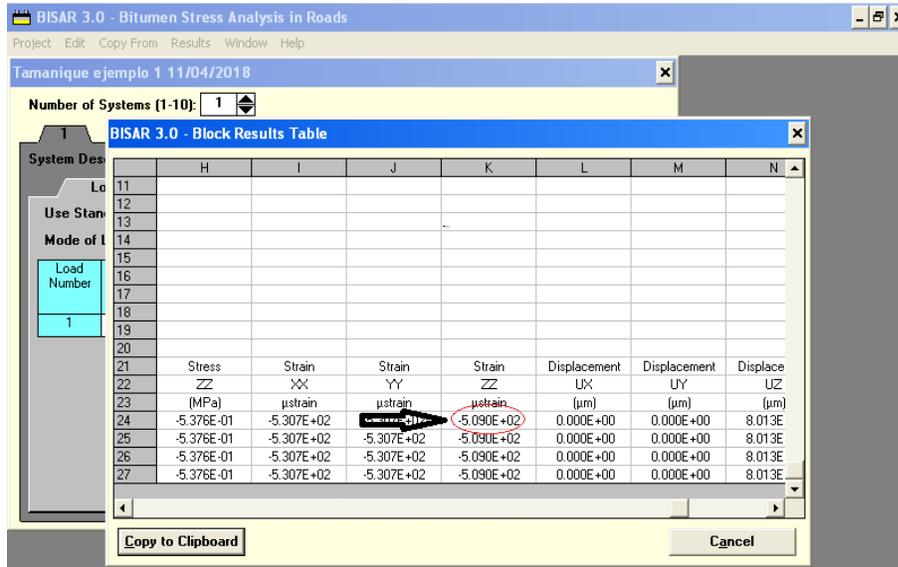


Figura 3.30 Tabla de Resultados 3

En la Figura 3.27, Figura 3.28, Figura 3.29, Figura 3.30 se presenta la interfaz gráfica de respuesta.

De la misma manera se generó los resultados para los datos de las vías LIB16S y CAB17N como se muestran a continuación en la Figura 3.31 y Figura 3.32.

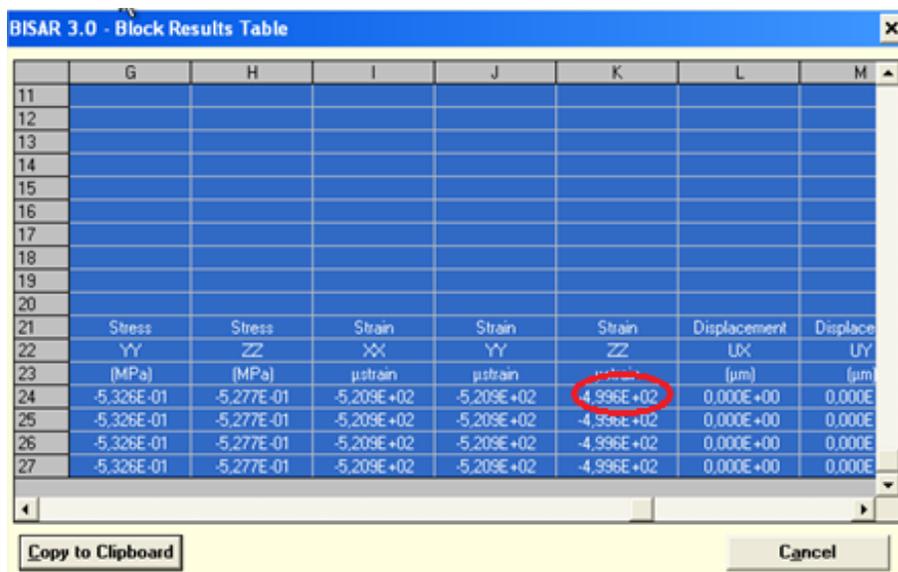


Figura 3.31 Tabla de Resultados ID5956

	H	I	J	K	L	M	N
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displace
22	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
23	(MPa)	μ strain	μ strain	μ strain	(μ m)	(μ m)	(μ m)
24	-5,333E-01	-4,549E+02	-4,549E+02	-5,821E+02	0,000E+00	0,000E+00	7,174E
25	-5,333E-01	-4,549E+02	-4,549E+02	-5,821E+02	0,000E+00	0,000E+00	7,174E
26	-5,333E-01	-4,549E+02	-4,549E+02	-5,821E+02	0,000E+00	0,000E+00	7,174E
27	-5,333E-01	-4,549E+02	-4,549E+02	-5,821E+02	0,000E+00	0,000E+00	7,174E

Figura 3.32 Tabla de Resultados ID10900

Por la lógica de programación con la cual opera Bizar 3.0 no es posible exportar los archivos a otro documento pero si es posible copiar los resultados obtenidos y pegarlos en un procesador de texto u hoja de cálculo según le convenga al usuario.

3.4 MODELACIÓN CON 3D MOVE

3D-Move Analysis es un software que proporciona la respuesta del pavimento, al aplicar diferentes y complejas distribuciones de esfuerzos de contacto inducidas por el tráfico, velocidad del vehículo y caracterización del material viscoelástico para las capas de pavimento. Como ejemplo de uso del Software se modelarán los estacionamientos con el ID 5977 y 5956 de la vía LIB16S y el estacionamiento con el ID 10900 de la vía CAB17N. Ver Tabla 3.10, Tabla 3.11, Tabla 3.12, Tabla 3.13

3.4.1 Creación del Proyecto

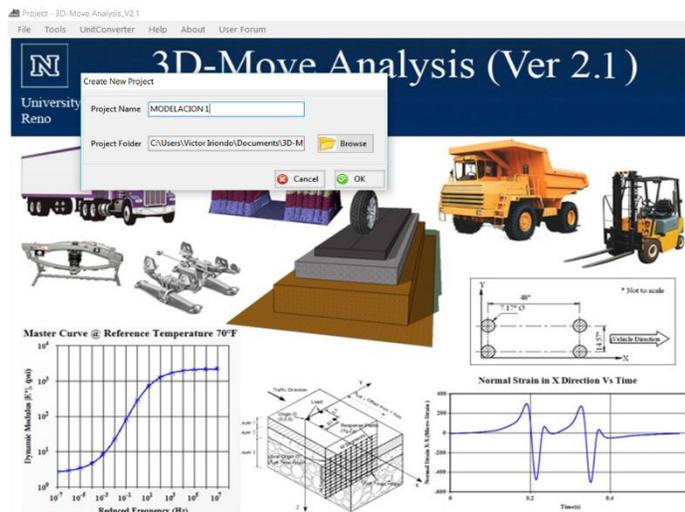


Figura 3.33 Pantalla de Inicio 3D Move

.En este módulo es donde se inicia con la modelación. Es aquí donde se debe crear un nuevo proyecto, esto se hace iniciando el programa y en el menú FILE se debe seleccionar la opción NEW, dicha opción desplegará el cuadro de diálogo que permite nombrar el proyecto o modelación a ejecutar. (Ver Figura 3.33)

Descripción de la Interfaz

- 1- Project Name es donde se debe nombrar el proyecto a modelar
- 2- Project Folder define la ubicación en el disco (C:) donde se guardará el proyecto

3.4.1.1 Selección de Unidades

Creado el proyecto y seleccionada su ubicación dentro la PC, se deben seleccionar las unidades con las cuales se trabajará, para hacer esto en el menú

TOOLS se elige la opción UNITS donde están las opciones de usar unidades inglesas o del sistema internacional. (Ver Figura 3.34)

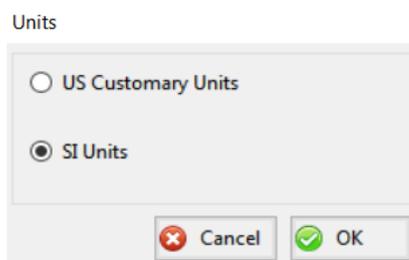


Figura 3.34 Elección de Sistema de Unidades

3.4.1.2 Descripciones Generales del Proyecto

Esta ventana representa la interfaz de introducción de datos correspondiente a la localización, identificación, descripción de estacionamiento, fecha de construcción de la vía, estacionamiento de inicio y estacionamiento final del tramo en análisis. (Figura 3.35)

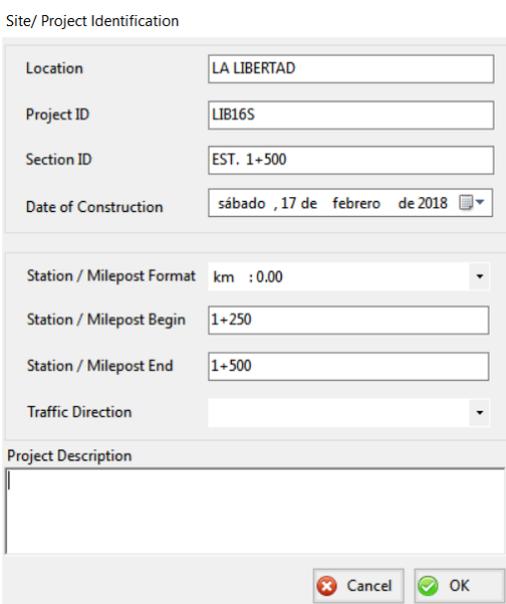


Figura 3.35 Información del Proyecto

Descripción de interfaz

- 1- Location, localización del proyecto
- 2- Project ID, identificación del proyecto
- 3- Section ID, estacionamiento de análisis
- 4- Date of Construction, fecha de construcción de la vía
- 5- Station/ Milepost Format, formato de estacionamientos (km, miles, feet)
- 6- Station/ Milepost Begin, estacionamiento de inicio
- 7- Station/ Milepost End, estacionamiento final
- 8- Traffic Direction, dirección del tráfico
- 9- Project Description, descripción adicional del proyecto

Los campos indicados deben ser llenados con información precisa y veracidad del proyecto o ejercicio a realizar para mantener un orden en el trabajo a realizar.

3.4.1.3 Selección de Tipo de Análisis

En este módulo se debe definir si el análisis será estático o dinámico. Se considerará un análisis dinámico si las cargas(tráfico) aplicadas al pavimento estarán en movimiento, para lo cual se deberá definir la velocidad del tráfico, de ser considerado estático las cargas aplicadas estarán sin ningún tipo de movimiento. (Ver Figura 3.36)

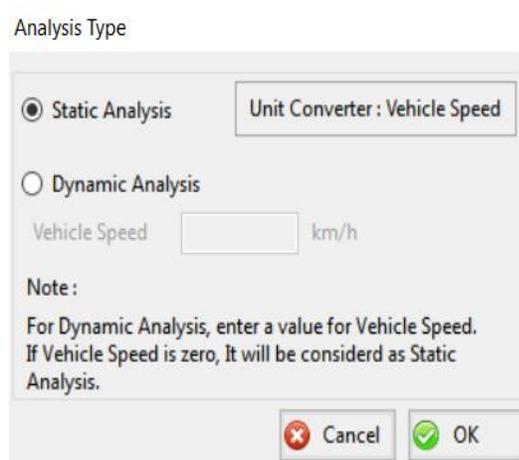


Figura 3.36 Selección de Tipo de Análisis

Descripción de interfaz

1. Static Analysis, opción a seleccionar si el análisis será estático
2. Dynamic Analysis, se escoge esta opción si el análisis será dinámico
3. Vehicle Speed, en esta opción se selecciona la velocidad del tráfico y se activa al definir el análisis como dinámico.

3.4.2 Establecer cargas a aplicar

Una de las entradas de datos principales para el análisis en 3D-Move es el establecer las cargas aplicadas en el pavimento, por ello este paso es de los más importantes en el resultado del análisis.

3.4.2.1 Configuración del eje y Carga

Para la distribución de la fuerza de contacto en el pavimento. Es habitual el asumir distribuciones simples, por ejemplo, áreas cargadas circulares o elípticas con fuerza vertical uniforme, 3D MOVE brinda la posibilidad de elegir varios tipos

de distribuciones de carga y para hacer más sencillo la selección, cuenta con 6 configuraciones según el caso que se desee analizar. (Ver Figura 3.37)

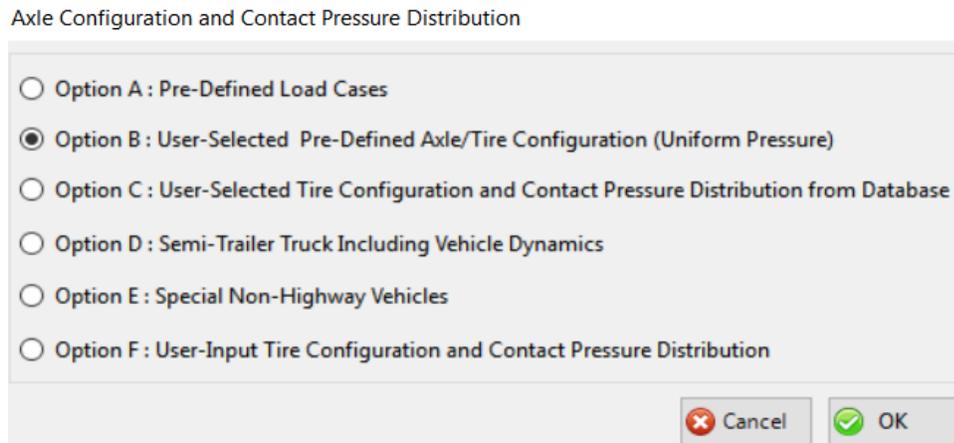


Figura 3.37 Definiendo el tipo de Caso de Carga

Descripción de interfaz:

1. Option A: Pre-Defined Load Cases, proporciona 9 tipos predefinidos de carga en el programa.
2. Option B: User-Selected Pre-Defined Axle/Tire Configuration (Uniform Pressure), bajo esta opción el usuario ingresa la configuración del eje/neumático
3. Option C: User-Selected Tire Configuration and Contact Pressure Distribution from Database, en esta opción el usuario puede seleccionar la configuración de la llanta, pero la distribución de la carga es definida a través de una base de datos externa.
4. Option D: Semi-Trailer Truck Including Vehicle Dynamics, calcula inicialmente la distribución de carga en varios neumáticos de un

semirremolque con 18 ruedas durante el tráfico normal de la carretera y durante el frenado

5. Option E: Special Non-Highway Vehicles, sirve para crear distribuciones uniformes de tensiones de contacto para vehículos "que no sean de carretera." Como, por ejemplo, camiones usados en minería.
6. Option F: User-Input Tire Configuration and Contact Pressure Distribution, permite definir cualquier distribución de presión de contacto, el programa puede manejar cualquier área cargada irregular con distribución de presión de contacto uniforme / no uniforme.

La opción a seleccionar según nuestro tipo de análisis debe ser la opción B, en esta opción podemos seleccionar una presión uniforme, esto es importante ya que con ello se simulará la carga del FWD. (Ver Figura 3.38)

Option B : User-Selected Pre-Defined Axle/Tire Configuration (Uniform Pressure)

Reference Title for Axle

Tire Pressure kPa Tire Load kN

Geometry of Loaded Area

Circle 

Ellipse

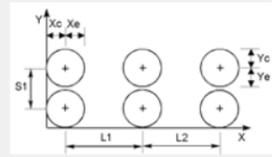
Rectangle

Note:

$$R = \sqrt{\frac{\text{Tire Load}}{\pi \times \text{Tire Pressure}}}$$

Calculated R m

Axle Spacing

L1 m 

L2 m

S1 m

Xc = 0.150 m Yc = 0.150 m
Xe = 0.150 m Ye = 0.150 m

Friction Coefficient

Rolling Friction Coefficient

Bracking Friction Coefficient

Note:
Default for Friction Coefficient is zero.

Note:

- As many as, six Single Loaded Areas can be specified
- A Single Tire can be represented by using S1 = L1 = L2 = 0
- A Single Axle Dual Tire can be represented by L1 = L2 = 0 and S1 ≠ 0
- A Tandem Axle Dual Tire can be represented by L2 = 0 and S1 ≠ 0, L1 ≠ 0
- L1 > Xc+Xe, L2 > Xc+Xe, and S1 > Yc+Ye.

Figura 3.38 Descripción General de Interfaz

Descripción de interfaz:

1. Reference Title for Axle, aquí se puede nombrar el tipo de eje a modelar
2. Tire Pressure, es donde se selecciona la presión de la llanta
3. Tire Load, es este cuadro se ingresa el valor de la carga del FWD.
4. Geometry of Loaded Area, tipo de area de contacto de la carga con el pavimento, se debe elegir circular
5. Axle Spacing, espaciamento entre eje para simular el tipo de carga de FWD debe introducirse L1=0, L2=0, S1=0

3.4.3 Estructura del pavimento

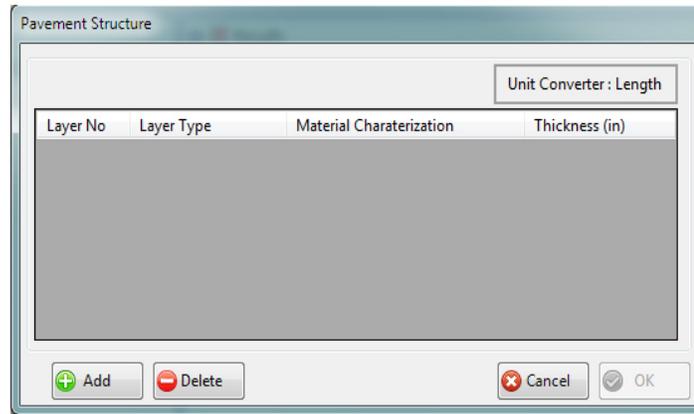


Figura 3.39 Datos Propios de la Estructura de Pavimento

Definidas las cargas es necesario introducir los datos propios de la estructura. Esto se debe seleccionar en la opción de Pavement Structure generando la aparición de la siguiente ventana (Ver Figura 3.39):

Descripción de Interfaz:

1. ADD, sirve para agregar tantas capas de pavimento como sea necesario.
Al dar hacer clic en ADD cuatro veces, se ha creado una estructura de pavimento típica formada por carpeta, base, subbase y subrasante
2. DELETE brinda la opción de eliminar las capas creadas
3. Layer No indica el número de capa
4. Layer Type es para seleccionar el tipo de capa ya sea mezcla asfáltica, base, subbase o subrasante.
5. Thickness es donde se define el espesor de cada capa.
6. Una vez que se hace clic en Aceptar, todas estas capas aparecerán debajo de Propiedades de la capa de pavimento en la ventana principal.

Pavement Structure

Unit Converter : Length

Layer No	Layer Type	Material Charaterization	Thickness (m)
1	Asphalt	Linear Elastic	0.05
2	Base	Linear Elastic	0.2
3	Subgrade	Linear Elastic	0.3
4	Subgrade	Linear Elastic	0

Note :
 -Layer No.1 represents the top/surface layer
 -For semi infinite depth, enter zero for last layer.

+ Add - Delete ✖ Cancel ✔ OK

Figura 3.40 Ingresando Características y Numero de Capas

Definido el tipo de estructura, se procede a introducir los datos característicos para cada una de las capas. (Ver Figura 3.40, Figura 3.41, Figura 3.42 y Figura 3.43)

Pavement Layer Properties - Layer 1

Layer Thickness m

Linear Elastic Material Properties

Elastic Modulus, E kPa

Damping Ratio %

Poisson's Ratio

Constant Poisson's Ratio

Poisson's Ratio from Model [Click to see the Poisson's Ratio Model](#)

Parameter a Parameter b

Calculated Poisson's Ratio from Model

Note :
 a and b are constants. Typical Values : a = -1.63 and b = 3.84E-6

Layer Temperature °C

✖ Cancel ✔ OK

Figura 3.41 Ingresando propiedades de cada capa

Descripción de Interfaz

1. Layer Thickness, espesor carpeta asfáltica.
2. Elastic Modulus, módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica.
7. Poisson Ratio, razón de Poisson carpeta asfáltica.

Pavement Layer Properties - Layer 2

Layer 2 Thickness m

Material

Standard Material Type

Range of E value is between 265448 - 289580.
Typical Value of E is 275790

Elastic Modulus, E kPa

CBR

R Value

Poisson's Ratio

Damping Ratio %

Unit Weight kN/m³

Depth to Ground Water Table m
(Measured from the pavement surface)

Depth to Bed Rock m
(Measured from the last layer surface)

Figura 3.42 Capa numero 2

Descripción de Interfaz

1. Thickness, espesor de la Base
2. Elastic Modulus, módulo de Elasticidad Base
3. CBR de la base
4. Poisson Ratio, razón de Poisson base.

Pavement Layer Properties - Layer 3

Layer 3 Thickness m

Material

Standard Material Type ▾

Range of E value is between 265448 - 289580.
Typical Value of E is 275790

Elastic Modulus, E kPa

CBR

R Value

Poisson's Ratio

Damping Ratio %

Unit Weight kN/m³

Depth to Ground Water Table m
(Measured from the pavement surface)

Depth to Bed Rock m
(Measured from the last layer surface)

Figura 3.43 Propiedades Capa 3

Descripción de Interfaz

3. Thickness, espesor SubRasante
4. Elastic Modulus, módulo de Elasticidad SubRasante
5. CBR de la SubRasante
6. Poisson Ratio Razón de Poisson SubRasante.

3.4.4 Definición de Puntos de Respuesta y Datos de Salida

El ultimo modulo en el que se ingresan datos es donde se define la posición de los puntos donde se desea conocer la respuesta del pavimento a la aplicación de las cargas, estos punto se pueden ubicar en diferentes coordenadas X,Y,Z en cualquiera de las capas previamente creadas. (Ver Figura 3.44)

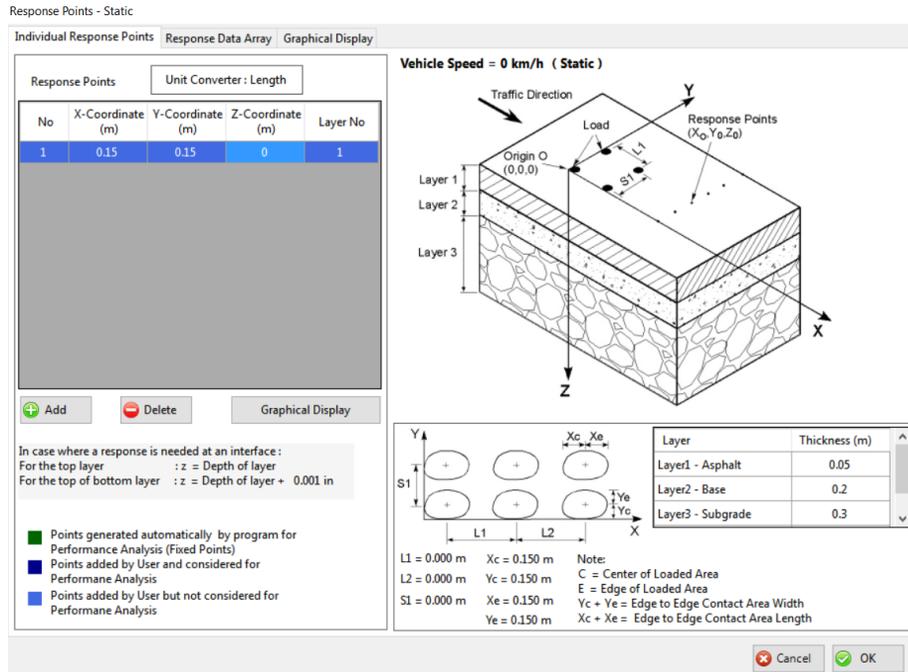


Figura 3.44 Ubicación de Cargas

Descripción de Interfaz

1. Response Points, punto donde se presenta la respuesta a la carga
2. No, numero del punto de respuesta
3. X Coordinate, coordenada en el eje X
4. Y Coordinate, coordenada en el eje Y
5. Z Coordinate, coordenada en el eje Z
6. Layer No, numero de capa donde se ubica el punto

3.4.4.1 Datos de Salida

Para los datos de salida se puede elegir que el programa solo arroje al final del análisis los datos que nos interesan, ya sean esfuerzos, deformaciones o ambos.

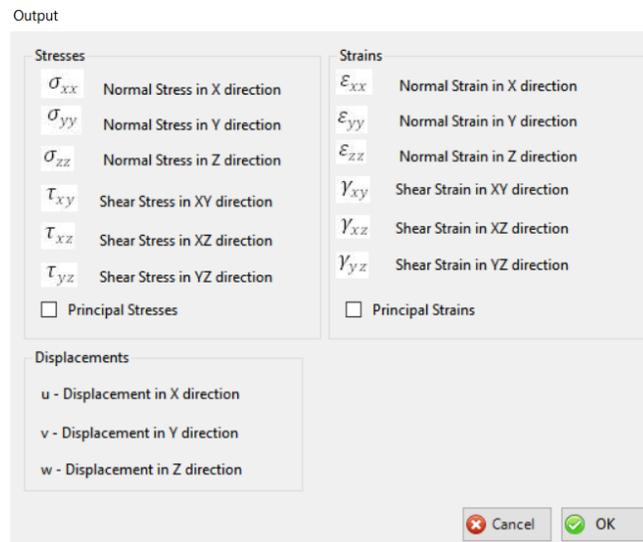


Figura 3.45 Datos de Salida

Descripción de Interfaz

1. Principal Stresses, esfuerzos principales
2. Principal Strains, deformaciones principales

Para mostrar los datos de salida en una tabla de Excel se debe seleccionar esta opción una vez terminado el análisis. (Ver Figura 3.45 y Figura 3.46)

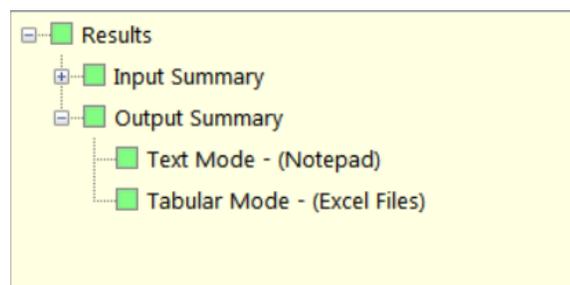


Figura 3.46 Formas de Solicitar los datos de Salida

Descripción de Interfaz

- 1. Text Mode, muestra los datos de salida en un archivo de notas con formato TXT.
- 2. Tabular Mode, muestra los datos de salida en un archivo de Excel. Se selecciona esta opción ya que es una manera más legible de leer los datos que hacerlo con el formato TXT.

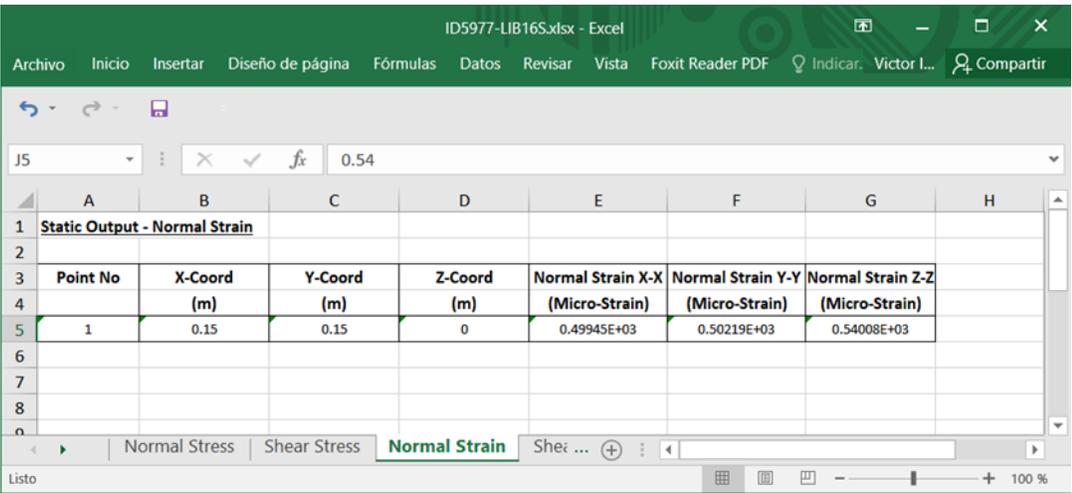


Figura 3.47 Datos de salida de 3D MOVE

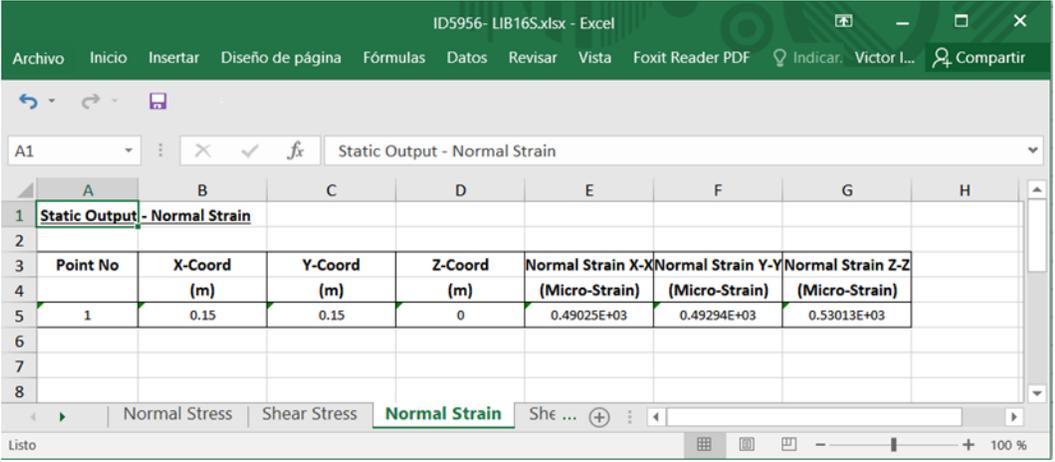


Figura 3.48 Datos de salida de 3D MOVE

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.45226E+03	0.45487E+03	0.58245E+03

Figura 3.49 Datos de salida de 3D MOVE

El archivo de Excel arrojado por 3D Move contiene todos los datos seleccionados en la opción Datos de Salida, en ese archivo se debe busca la pestaña titulada Normal Strain y posteriormente la columna Normal Strain Z-Z que es donde se muestra la deformación en micrómetros de la iteración realizada en el eje Z, dando como resultado 540 micrómetros para el punto con ID5977 de la carretera LIB16S. Estos se muestran en el Anexo 2.

3.5 MODELACIÓN CON PITRA-PAVE

PITRA-PAVE es un software para el análisis mecánico de pavimentos flexibles; utiliza como base teoría de multicapa elástica. Como ejemplo utilizaremos dos tramos de la carretera LIB16S y un tramo de la carretera CAB17N con datos proporcionados en la Tabla 3.10, Tabla 3.11, Tabla 3.12, Tabla 3.13

Para el tramo con identificación 5977 el uso del programa se puede resumir en los siguientes pasos:

3.5.1 Crear y definir proyecto

La ventana de inicio fundamentalmente es la misma sin importar el sistema operativo que se utilice (Windows, Linux o Mac OS). Ver Figura 3.50

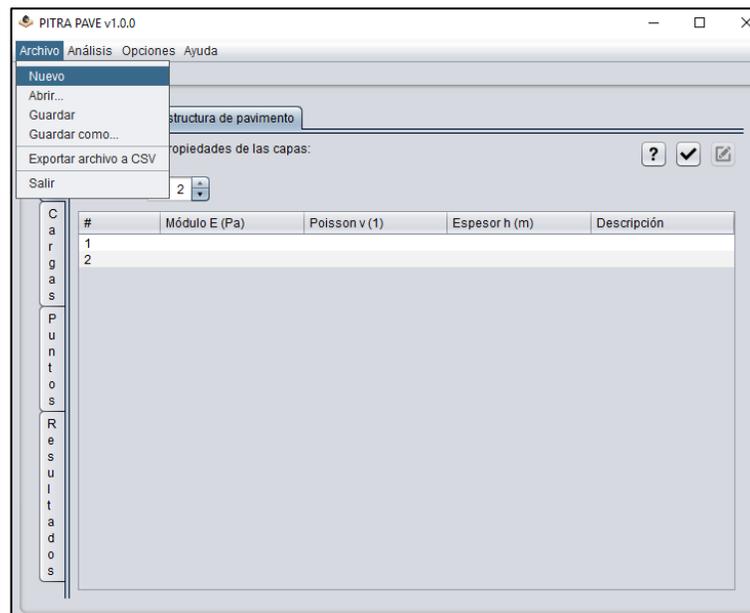


Figura 3.50 Ventana de Inicio PITRA-PAVE

El programa permite escoger entre el Sistema de unidades Internacional o el Sistema Ingles. Por defecto PITRA PAVE abre un archivo en unidades del Sistema Internacional, como se muestra en la Figura 3.51.

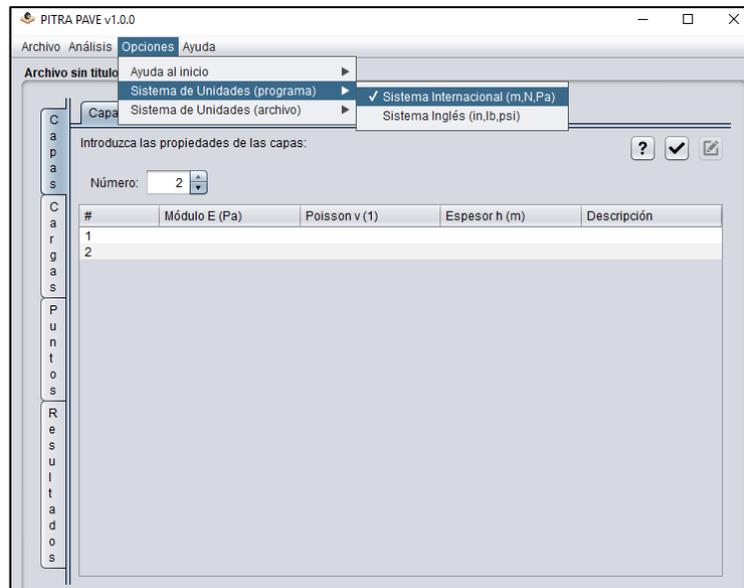


Figura 3.51 Sistema de Unidades - PITRA PAVE

Sistema de unidades (programa): Permite configurar las preferencias del software en cuanto al sistema de unidades predeterminado.

Sistema de unidades (archivo): Permite configurar el sistema de unidades del archivo actual.

3.5.2 Establecer cargas a aplicar

En lo que respecta a las cargas, se debe definir una sola carga igual a la establecida para el ensayo FWD (38,000 N). La posición del centro de carga circular se introduce en coordenadas cartesianas "X" y "Y".

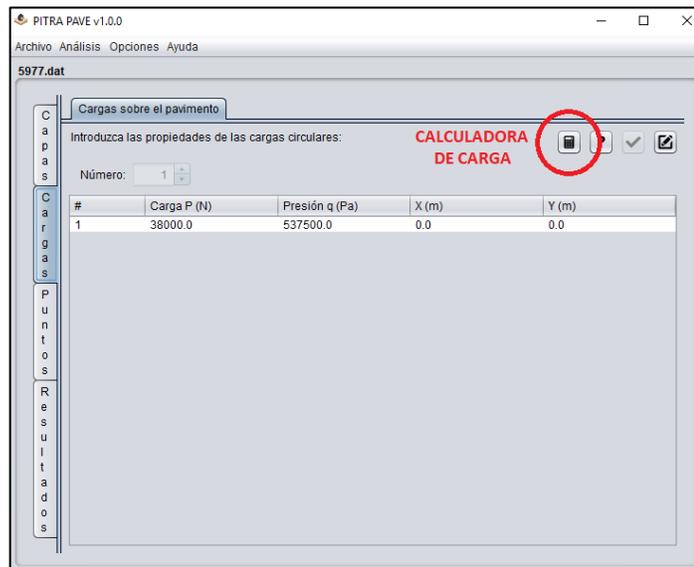


Figura 3.52 Establecer Cargas a utilizar por el Programa, PITRA PAVE

Si se conoce el radio de carga, en nuestro caso el radio de la placa de carga del FWD, se puede utilizar la “Calculadora de carga” del programa para convertir entre carga, radio y presión asociado a los datos de entrada conocidos. Ver Figura 3.52 y Figura 3.53

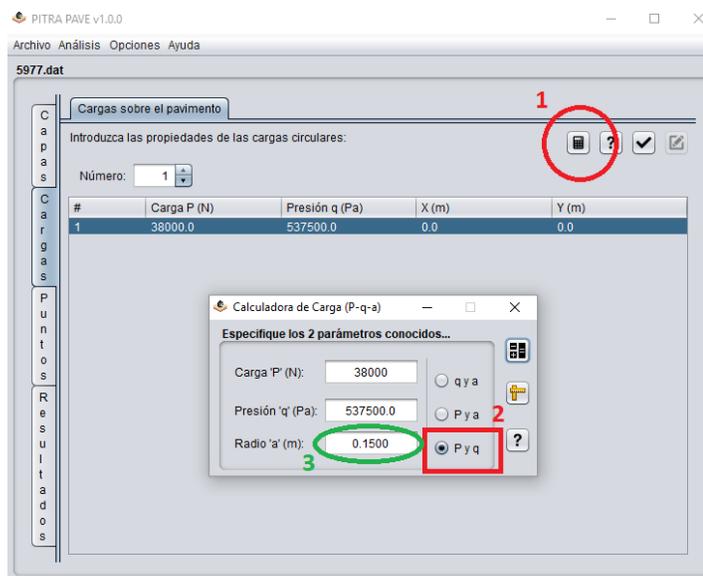


Figura 3.53 Verificación de radio de carga igual al radio de la Placa de Carga del FWD (0.15m)

3.5.3 Definir propiedades de cada capa

Este paso se podría hacer antes o después de definir las cargas. Una vez escogidas las unidades, se introducen los datos de entrada para cada capa. (Ver Figura 3.54), datos a utilizar se definen en la sección 3.2.1 (Ver la tTabla 3.10, Tabla 3.11, Tabla 3.12, Tabla 3.13) Como se ve en la Figura 3.54

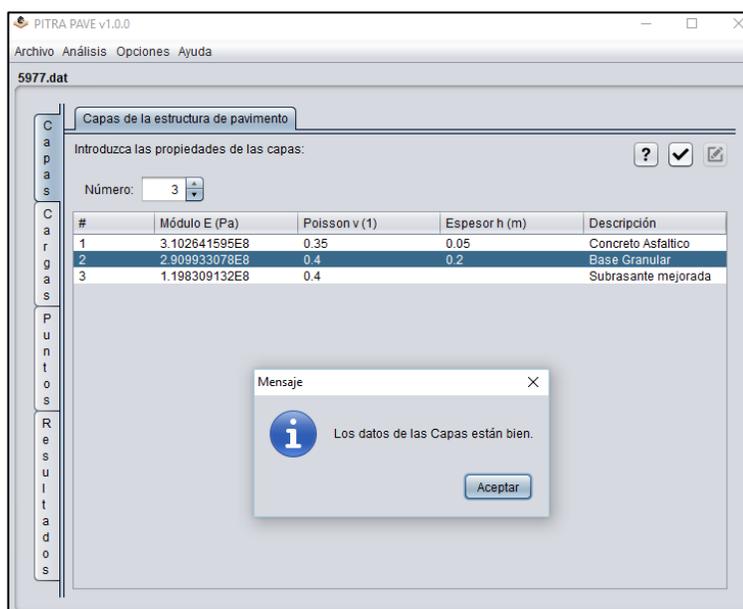


Figura 3.54 Propiedades de cada capa del pavimento. PITRA PAVE

3.5.4 Definir puntos de medición

Los puntos pueden ser, de acuerdo a la ubicación de las cargas. En nuestro caso el FWD mide la deflexión sobre la superficie del pavimento. En coordenadas ("x", "y", "z") igual a (0.0, 0.0, 0.0). Ver Figura 3.55

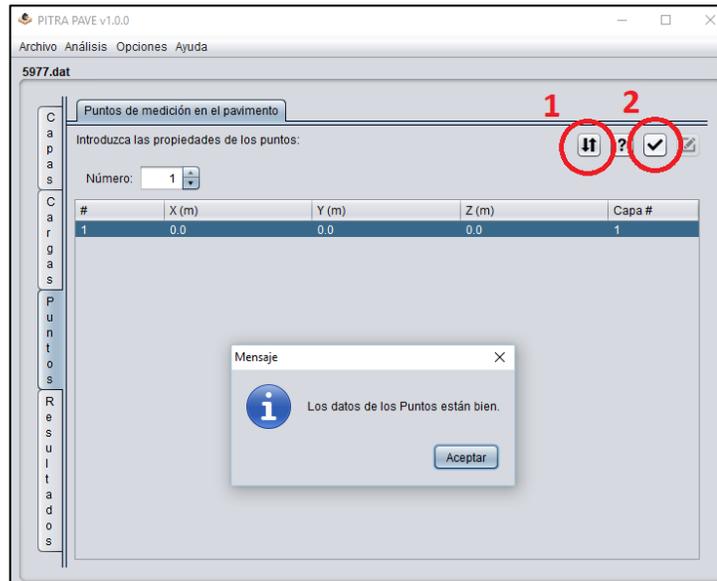


Figura 3.55 Asignar puntos de Medición del Pavimento

1. Asignar capa # a puntos.
2. Revisar Puntos.

3.5.5 Datos de salida

Los resultados se obtienen de forma automática al presionar el botón “Calcular”.

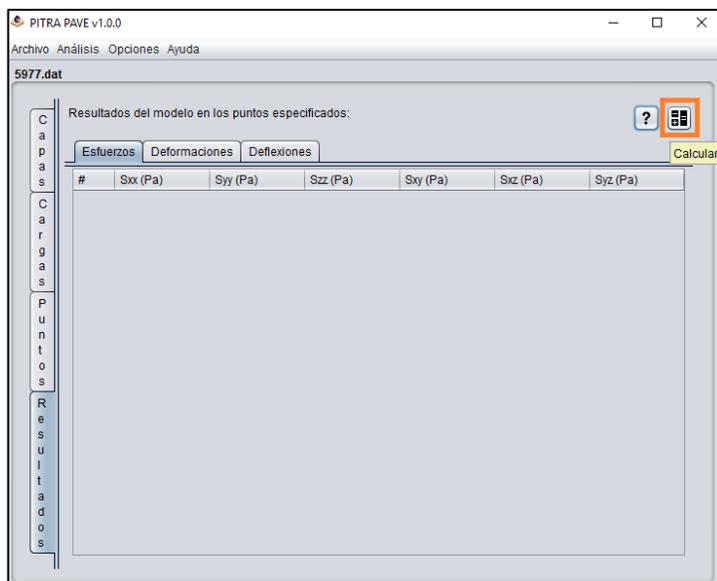
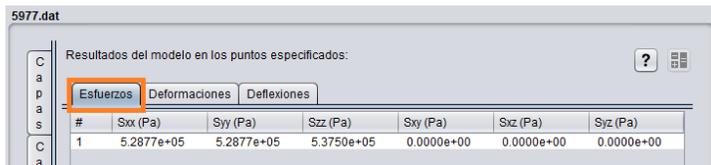


Figura 3.56 Calcular Datos de salida PITRA PAVE

Los resultados se presentan en 3 pestañas, como se muestra a continuación (Ver Figura 3.57, Figura 3.58, Figura 3.59):



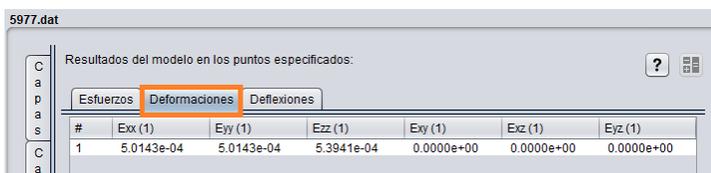
5977.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

#	Sxx (Pa)	Syy (Pa)	Szz (Pa)	Sxy (Pa)	Sxz (Pa)	Syz (Pa)
1	5.2877e+05	5.2877e+05	5.3750e+05	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Figura 3.57 Pestaña Esfuerzos



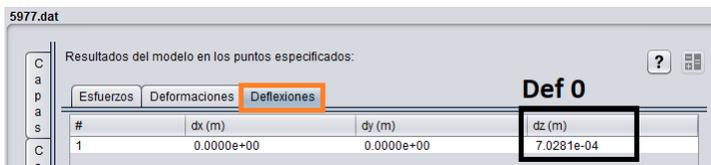
5977.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	5.0143e-04	5.0143e-04	5.3941e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Figura 3.58 Pestaña Deformaciones



5977.dat

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

Def 0

#	dx (m)	dy (m)	dz (m)
1	0.0000e+00	0.0000e+00	7.0281e-04

Figura 3.59 Pestaña Deflexiones

PITRA PAVE tiene entre sus herramientas, la opción de exportar los resultados a Microsoft Excel (Ver Figura 3.60).

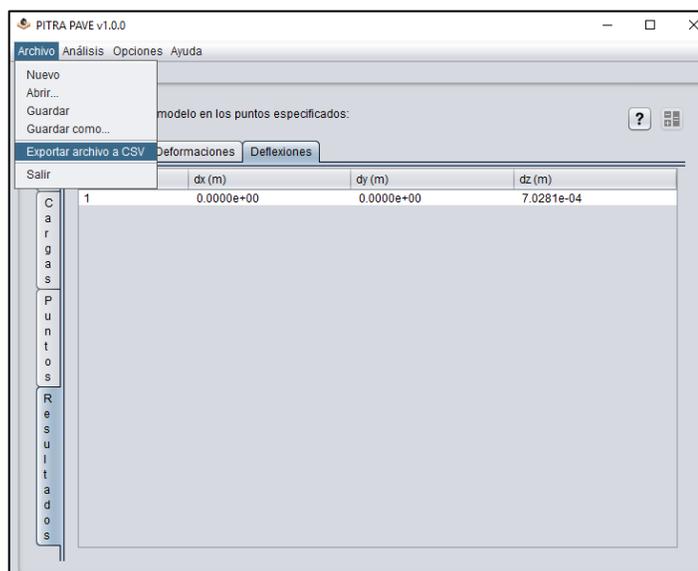


Figura 3.60 Exportar resultados a Microsoft Excel, PITRA PAVE

A continuación se muestran los resultados exportados en Microsoft Excel (Ver Figura 3.61, Figura 3.62, Figura 3.63.)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	,PITRA PAVE								
2	,version 1.0.0								
4	,Sistema Multicapa								
5	,Numero de Capas:,3								
6	,Numero de Cargas:,1								
7	,Numero de Puntos:,1								
9	,Preferencias								
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal								
11	,Union entre Capas:,Ligadas								
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical								
13	,Puntos:,General								
15	,Capas								
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo								
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asfaltico,Elastica								
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica								
19	3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,,Elastica								
21	,Cargas								
22	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),								
23	1,3.8000e+04,5.3750e+05,0.0000e+00,0.0000e+00								
25	,Puntos								
26	ID,X (m),Y (m),Z (m)								
27	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00								
29	,Resultados								
30	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1),Eyy (1),Ezz (1),Exy (1),Exz (1),Eyz (1),Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)								
31	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 7.0281e-04, 5.0143e-04, 5.0143e-04, 5.3941e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.2877e+05, 5.2877e+05, 5.3750e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00								
32									
33									

Figura 3.61 Datos de respuesta exportados a Excel

El valor “dz (m)” es la deflexión en z en el punto con coordenadas (0,0,0), este será el valor a comparar contra el ensayo FWD en el centro del plato de carga.

Se realizó el mismo procedimiento para el tramo 5956 de la carretera LIB16S y para el tramo 10900 de la carretera CAB17N, obteniendo las siguientes respuestas:

ID	Modulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor (m)	Descripcion	Tipo
17	1,3.1026e+08	3,5000e-01	5,0000e-02	Concreto Asfaltico	Elastica
18	2,2.9099e+08	4,0000e-01	2,0000e-01	Base Granular	Elastica
19	3,1.1983e+08	4,0000e-01	1,2340e+03		Elastica

ID	Carga (N)	Presion (Pa)	X (m)	Y (m)
23	1,3.7300e+04	5,2760e+05	0,0000e+00	0,0000e+00

ID	dx (m)	dy (m)	dz (m)	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)	Sxx (Pa)	Syy (Pa)	Szz (Pa)	Sxy (Pa)	Sxz (Pa)	Syz (Pa)
30	1,0.0000e+00	0,0000e+00	6,8986e-04	4,9219e-04	4,9219e-04	5,2948e-04	0,0000e+00	0,0000e+00	0,0000e+00	5,1903e+05	5,1903e+05	5,2760e+05	0,0000e+00	0,0000e+00	0,0000e+00

Figura 3.62 Tabla de resultados exportados a hoja de calculo ID5956

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

ID	Modulo E (Pa)	Poisson v	Espesor (m)	Descripcion	Tipo
16	1.3.1026e+08	3.5000e-01	5.2500e-02	Concreto Asfáltico	Elastica
17	2.2.9099e+08	4.0000e-01	2.5000e-01	Base Granular	Elastica
18	3.1.3823e+08	4.0000e-01	4.0000e-01	Sub-base Granular	Elastica
19	4.7.6897e+07	4.0000e-01	1.2340e+03	Subrasante	Elastica

ID	Carga (N)	Presion (Pa)	X (m)	Y (m)
24	1.3.7700e+04	5.3326e+05	0.0000e+00	0.0000e+00

ID	X (m)	Y (m)	Z (m)
28	1.0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

ID	dx (m)	dy (m)	dz (m)	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)	Sxx (Pa)	Syy (Pa)	Szz (Pa)	Sxy (Pa)	Sxz (Pa)	Syz (Pa)
31	1.0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	7.1726e-04	4.5453e-04	4.5453e-04	5.8140e-04	0.0000e+00							

Figura 3.63 Tabla de resultados exportados a hoja de calculo ID10900

3.6 MODELACIÓN CON WINDEPAV

WINDEPAV es una interface para el sistema operativo Windows del software predecesor denominado DEPAV , el cual fue desarrollado por la Universidad de El Cauca para el Ministerio de Transporte de Colombia durante la Investigación Nacional de Pavimentos de Colombia (INPACO) en 1994. El programa original fue creado por los Profesores Alfonso Murgueitio Valencia, Carlos Alberto Benavides y Efrain Solano Fajardo, es una interfase en MS-DOS del programa francés Alizé

Para realizar la modelación con Windepav utilizaremos de referencia los datos que se muestran en la Tabla 3.10, Tabla 3.11, Tabla 3.12, Tabla 3.13.

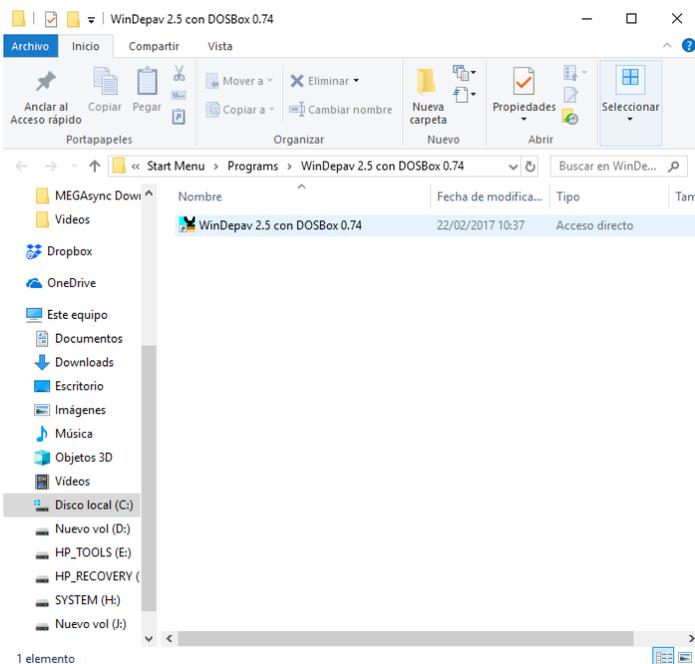


Figura 3.64 Icono para inicializar la aplicación

Para iniciar la aplicación basta con dar doble click sobre el icono para ingresar en él y posteriormente se mostrará la siguiente pantalla de inicio. Ver Figura 3.64

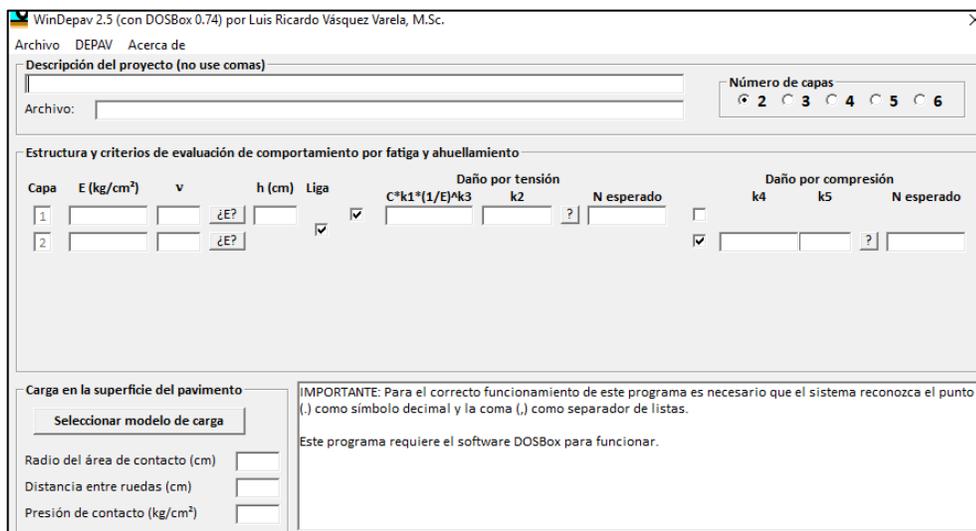


Figura 3.65 Pantalla inicial de Windepav

3.6.1 Creación del Proyecto

La ventana de inicio en Windepav nos permite crear directamente un proyecto nuevo o nos permite ingresar al menú “archivo” que está en la barra de tareas para usar las opciones (Ver Figura 3.65):

- Abrir: Esta permite ingresar a los archivos almacenados e iniciar un proyecto guardado con anterioridad.
- Grabar: Permite almacenar en la memoria el proyecto que se estaba trabajando para poder ser revisado o utilizado posteriormente.
- Salir: En esta opción finalizamos la aplicación.

La pantalla de inicio es muy intuitiva lo que nos permite rellenar los campos con facilidad. Dentro de estos campos esta la opción para modificar el número de capas que se utilizaran en el proyecto. Windepav permite que usemos estructuras compuestas de 2 a 6 capas.

3.6.2 Definición de las Cargas aplicadas.

“Seleccionar modelo de carga” el cual nos permitirá obtener el tipo de configuración deseada las cuales varían entre vehículos con un solo eje y hasta aquellos que ocupan ejes con cargas dobles. (Ver Figura 3.66)

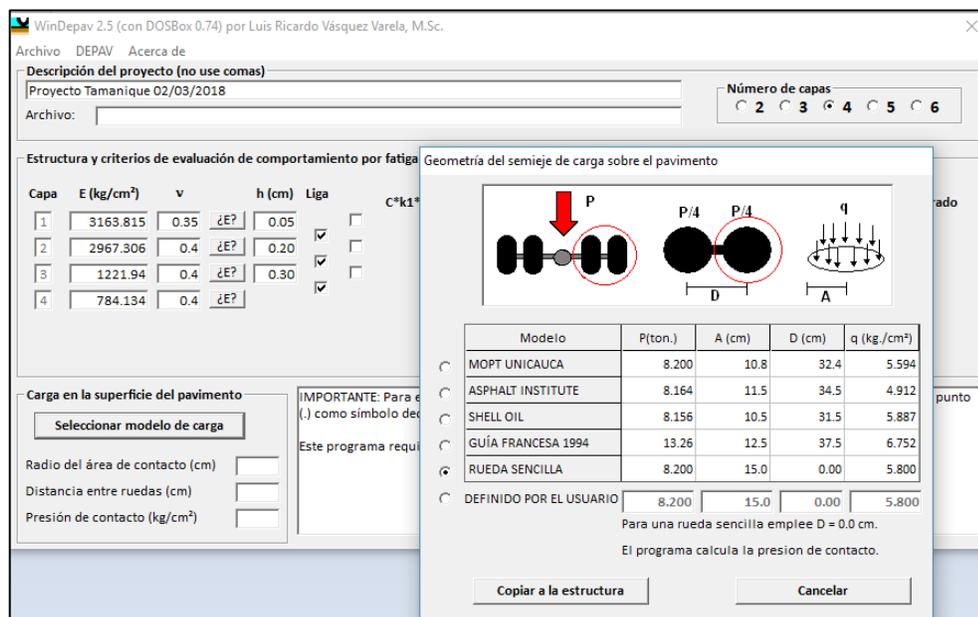


Figura 3.66 Elección de modelo de carga

En el caso particular de FWD se opta por la opción “DEFINIDO POR EL USUARIO” se utiliza el valor de $D=0$ porque solo hay un punto de impacto y $A=15$ cm debido a que ese es el radio del plato.

Para efectos prácticos utilizaremos los siguientes datos para realizar el análisis de multicapa elástica de un diseño de pavimento existente. (Ver Tabla 3.16 y Tabla 3.17)

Cargas

Carga Vertical (Vertical Load)	38 kN
Radio de la Llanta	0.15 m
Coordenada en X de la carga	0.0
Coordenada en Y de la carga	0.0
Carga Horizontal	0.0
Dirección del Esfuerzo Cortante	0°

Tabla 3.16 Información relativa a las cargas

Capas

Numero de Capa	Espesor (m)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Relación de Poisson
1	0.05	3.1E+02	0.35
2	0.2	2.91E+02	0.4
3	0.3	1.20E+02	0.4
4		7.70+01	0.4

Tabla 3.17 Información relativa a las capas.

En la hoja de posición todos los valores serán cero debido a que utilizamos un Deflectómetro de Impacto y su celda de carga impacta solo un punto, y las llantas del mismo dispositivo no producen influencia por lo que se puede tomar como el origen de coordenadas el punto donde la celda de impacto transmite la fuerza.

3.6.3 Estructura del Pavimento

Windepav también permite desplegar una calculadora para determinar el valor del módulo de Elasticidad en base a fórmulas de varias teorías. (Ver Figura 3.67)

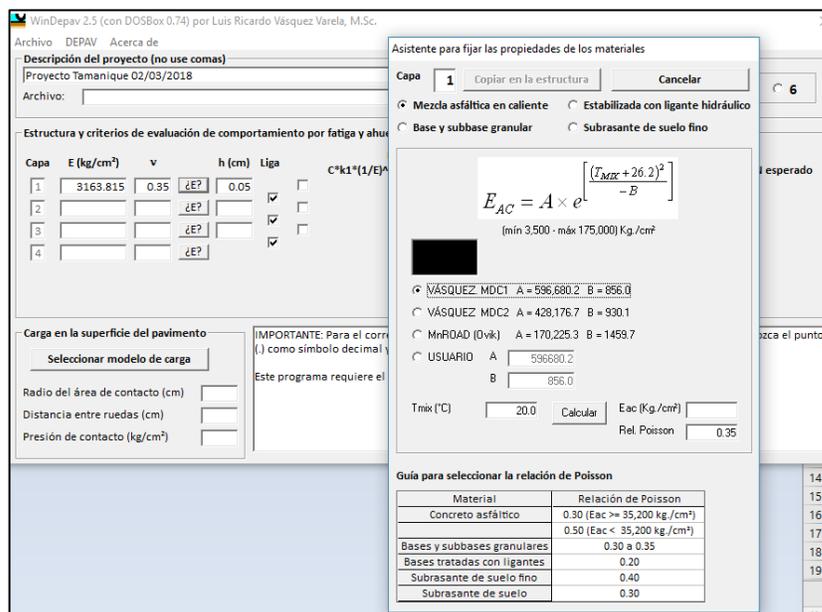


Figura 3.67 Calculadora Modulo de Elasticidad

3.6.4 Definición de Puntos de Respuesta y Datos de Salida.

Una vez que todos los datos se insertan en los diferentes campos se elige la opción Calcular que se encuentra en la barra de herramientas en el menú "DEPAV" o también es para que Windepav comience a realizar el análisis multicapa elástica en la estructura que se ha modelado. Una vez desplegado el cuadro de dialogo de los Datos Calculados se elige la opción "Ver resultados" para obtener una lista detallada de los resultados. (Ver Figura 3.68)

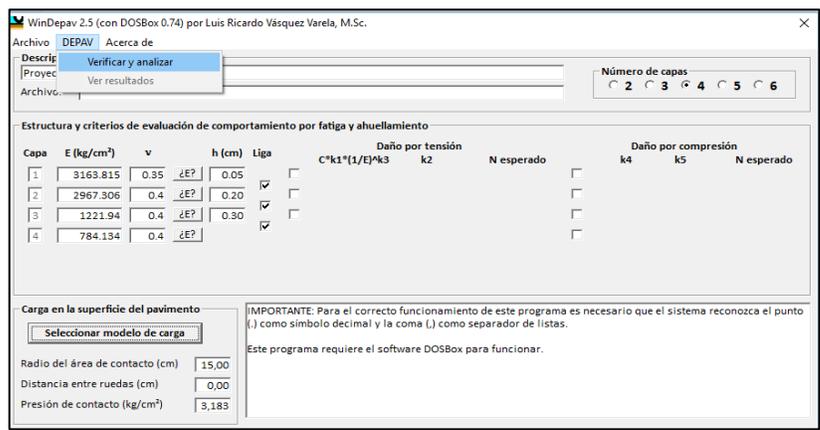


Figura 3.68 Botón para Calcular y Analizar

Ahí podemos leer los resultados obtenidos tanto en los esfuerzos, las deformaciones y los desplazamientos.

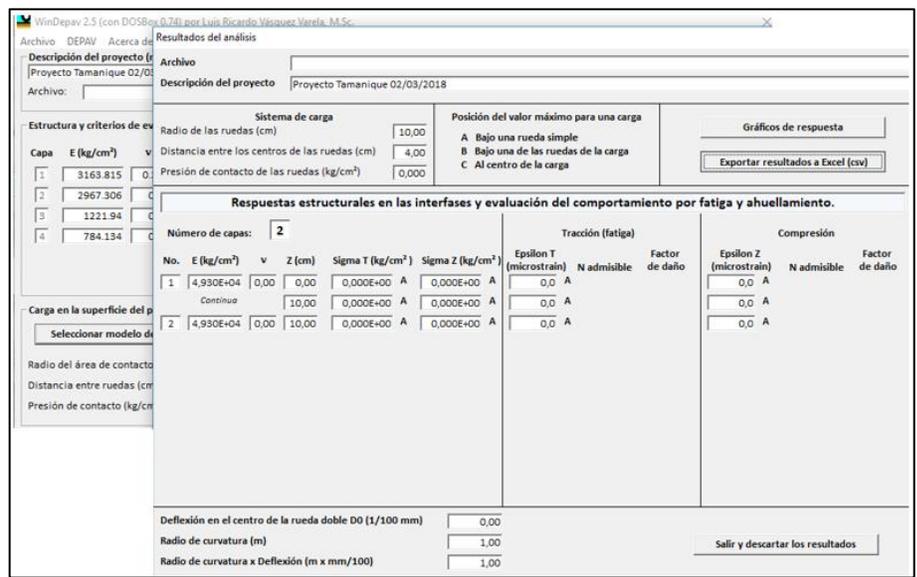


Figura 3.69 Resultados en pantalla

Además, que Windepav permite que podamos exportar la información a un archivo de Excel o imprimirlo directamente desde nuestro ordenador. Si se decide exportar el archivo a Excel se generará un archivo CSV similar al de la figura Figura 3.69 dando una hoja como la mostrada en la Figura 3.70

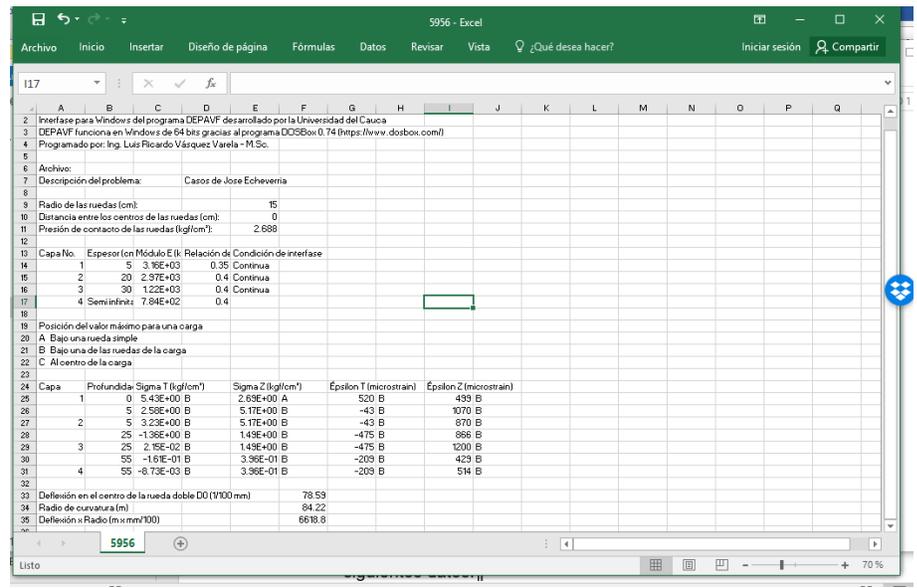


Figura 3.70 Archivos de respuesta exportados a Excel

De la misma manera se presentan los datos analizados para las vías LIB16S y CAB17N Con ID 5956 y ID 10900 respectivamente- (Ver Figura 3.71 y Figura 3.72)

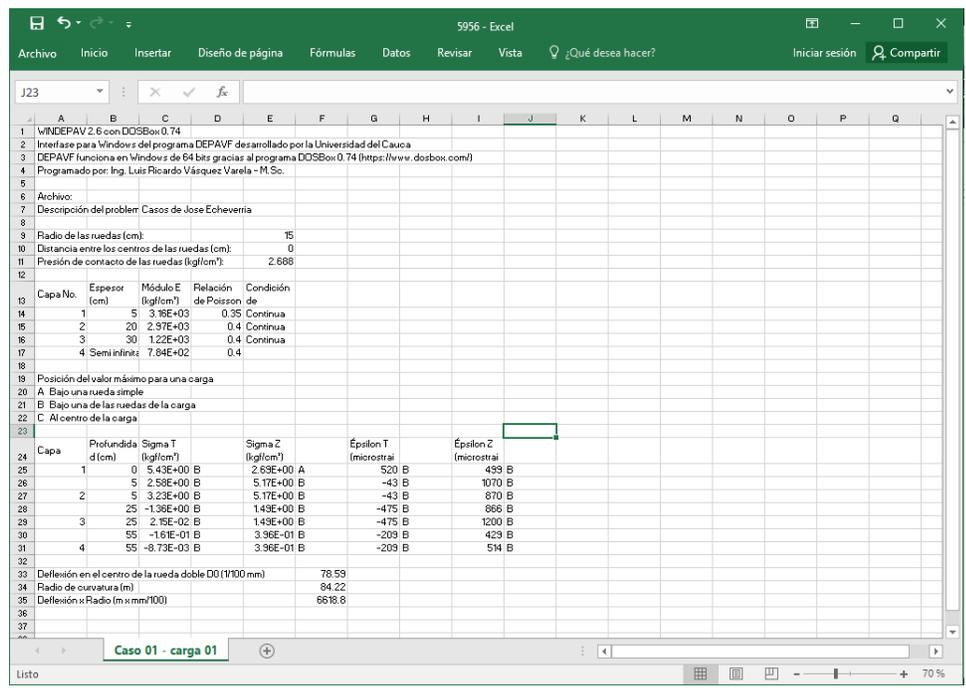


Figura 3.71 Tabla de resultados exportados a Excel ID5956

10900 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

J8

1 WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74
 2 Interfaz para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca
 3 DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (<https://www.dosbox.com/>)
 4 Programado por: Ing. Luis Ricardo Vázquez Varela - M.Sc.
 5
 6 Archivo:
 7 Descripción del problema: Casos de Jose Echeverría
 8
 9 Radio de las ruedas (cm): 15
 10 Distancia entre los centros de las ruedas (cm): 0
 11 Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm²): 2.716
 12
 13 Capa No. Espesor (cm) Módulo E (kgf/cm²) Relación de Poisson Condición de interfase
 14 1 5.2 3.16E+03 0.35 Continua
 15 2 25 2.97E+03 0.4 Continua
 16 3 40 1.41E+03 0.4 Continua
 17 4 Semi infinit 7.84E+02 0.4
 18
 19 Posición del valor máximo para una carga
 20 A. Bajo una rueda simple
 21 B. Bajo una de las ruedas de la carga
 22 C. Al centro de la carga
 23
 24 Capa Profundidad (cm) Sigma T (kgf/cm²) Sigma Z (kgf/cm²) Épsilon T (microstrain) Épsilon Z (microstrain)
 25 1 0 5.13E+00 B 2.71E+00 A 454 B 582 B
 26 5.2 2.36E+00 B 5.23E+00 B -95.7 B 1130 B
 27 2 5.2 3.02E+00 B 5.23E+00 B -95.7 B 961 B
 28 30.2 -8.85E-01 B 1.19E+00 B -339 B 840 B
 29 3 30.2 -4.14E-03 B 1.19E+00 B -339 B 846 B
 30 70.2 -1.48E-01 B 2.49E-01 B -133 B 259 B
 31 4 70.2 -7.82E-03 B 2.49E-01 B -133 B 326 B
 32
 33 Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (W100 mm) 71.66
 34 Radio de curvatura (m) 91.32
 35 Deflexión x Radio (m x mm/100) 6643.6
 36

10900

Listo 60%

Figura 3.72 Tabla de resultados exportados a Excel ID10900

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4. CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo de la investigación está dirigido a obtener, con los parámetros de diseño de las carreteras LIB16S y CAB17N, la respuesta de los modelos analíticos aplicando los softwares BISAR 3.0, 3D MOVE, WinDEPAV y PITRA PAVE.

Todo esto con el fin de obtener una comparativa de la respuesta del pavimento a la aplicación de cargas por medio del ensayo de FWD y la obtenida mediante la modelación con los software mencionados.

4.1 EVALUACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE LOS SOFTWARE

Se efectuó una evaluación de las características de uso para los cuatro (4) software, en las cuales se calificaron los aspectos más relevantes al momento de realizar la modelación con cada uno de ellos.

El método de evaluación se basó en asignar un puntaje a cada uno de los aspectos que fueron considerados importantes a la hora de utilizar cada software, la suma global de dicho puntaje se utilizó para poder calcular la eficiencia final de cada uno.

De esta forma se puede conocer de manera objetiva las situaciones experimentadas al utilizar cada uno de los software. Los aspectos principales sobre los que se llevó a cabo la comparación y evaluación son: funcionalidad, eficiencia y compatibilidad.

En la Tabla 4.1 se muestra la evaluación comparativa de las características de los diferentes software, los resultados finales denotan que PITRA PAVE es el software con el porcentaje de eficiencia más alta según el análisis descrito.

SISTEMA DE EVALUACION			TABLA DE EVALUACION DE CARACTERISTICAS DE LOS SOFTWARES			
	ÓPTIMO	2 puntos	DEFLEXIÓN EN BISAR 3.0	DEFLEXIÓN EN 3D MOVE	DEFLEXIÓN EN WinDEPAV	DEFLEXIÓN EN PITRA PAVE
	TOLERABLE	1 puntos				
	DEFICIENTE	0 puntos				
ASPECTOS A EVALUAR						
Velocidad de respuesta						
Facilidad de Uso						
Sistema de Unidades						
Recursos consumidos						
Compatibilidad con Windows 10						
Precisión						
Exportar datos de Salida						
Errores, cierres repentinos y fallos						
Evaluación de varios puntos de forma simultanea						
Eficiencia (En base a 18 puntos)			12 Puntos	14 Puntos	13 Puntos	16 Puntos
% de Eficiencia			67 %	78 %	72 %	89 %

Tabla 4.1 Evaluación de características de los software

4.2 ANÁLISIS DE MODELACIÓN

Al realizar la modelación con la muestra de datos reducida de los proyectos en estudio, se obtuvieron las deformaciones por medio de cada uno de los software, estos datos permiten realizar una comparativa individual con los datos registrados por el FWD.

4.2.1 ANÁLISIS DE MODELACIÓN CON BISAR 3.0

Bisar 3.0 es uno de los softwares más cercanos a los resultados arrojados por el FWD. La particularidad de este Software es que sus respuestas a la Deflexión son las más bajas de los datos registrados por los Softwares. La Tabla 4.2 y la Tabla 4.3 muestran el resultado de todas las modelaciones realizadas para la vía LIB16S tramo de LIB22S a Tamanique y para la vía CAB17N tramo de Tejutepeque a Jutiapa respectivamente.

PROYECTO 1: TRAMO DE INT. LIB 22S A TAMANIQUE					
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	DEFLEXIÓN EN EL PLATO FWD (mm)	DEFLEXIÓN EN BISAR 3.0 (mm)
5956	Int. LIB22S - Tamanique	2+000	2+250	0.541	0.505
5958	Int. LIB22S - Tamanique	2+500	2+750	0.525	0.505
5959	Int. LIB22S - Tamanique	2+750	3+000	0.548	0.504
5961	Int. LIB22S - Tamanique	3+250	3+500	0.507	0.504
5965	Int. LIB22S - Tamanique	4+250	4+500	0.561	0.531
5966	Int. LIB22S - Tamanique	4+500	4+750	0.528	0.501
5967	Int. LIB22S - Tamanique	4+750	5+000	0.548	0.502
5968	Int. LIB22S - Tamanique	5+000	5+250	0.517	0.504
5974	Int. LIB22S - Tamanique	6+500	6+750	0.557	0.501
5977	Int. LIB22S - Tamanique	7+250	7+500	0.493	0.509
5981	Int. LIB22S - Tamanique	8+250	8+500	0.592	0.506

Tabla 4.2 Tabla comparativa FWD vs BISAR 3.0 de la Vía LIB16S

PROYECTO 2: TRAMO DE TEJUTEPEQUE A JUTIAPA					
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	DEFLEXIÓN EN EL PLATO FWD (mm)	DEFLEXIÓN EN BISAR 3.0 (mm)
10900	Tejutepeque - Jutiapa	3+000	3+250	0.542	0.582
10901	Tejutepeque - Jutiapa	3+250	3+500	0.585	0.587
10907	Tejutepeque - Jutiapa	4+750	5+000	0.547	0.582
10914	Tejutepeque - Jutiapa	6+500	6+750	0.572	0.578

Tabla 4.3 Tabla comparativa FWD vs BISAR 3.0 de la Vía CAB17N

La Figura 4.1 muestra de forma gráfica los datos obtenidos para la vía LIB 16S, se puede observar que se generó una línea de tendencia (continua y color negro) para indicar la orientación de los datos. Los resultados obtenidos por BISAR 3.0 se encuentran por debajo de los datos registrados por el FWD y muestra una considerable cercanía con aproximadamente 0.09 mm de desviación máxima.

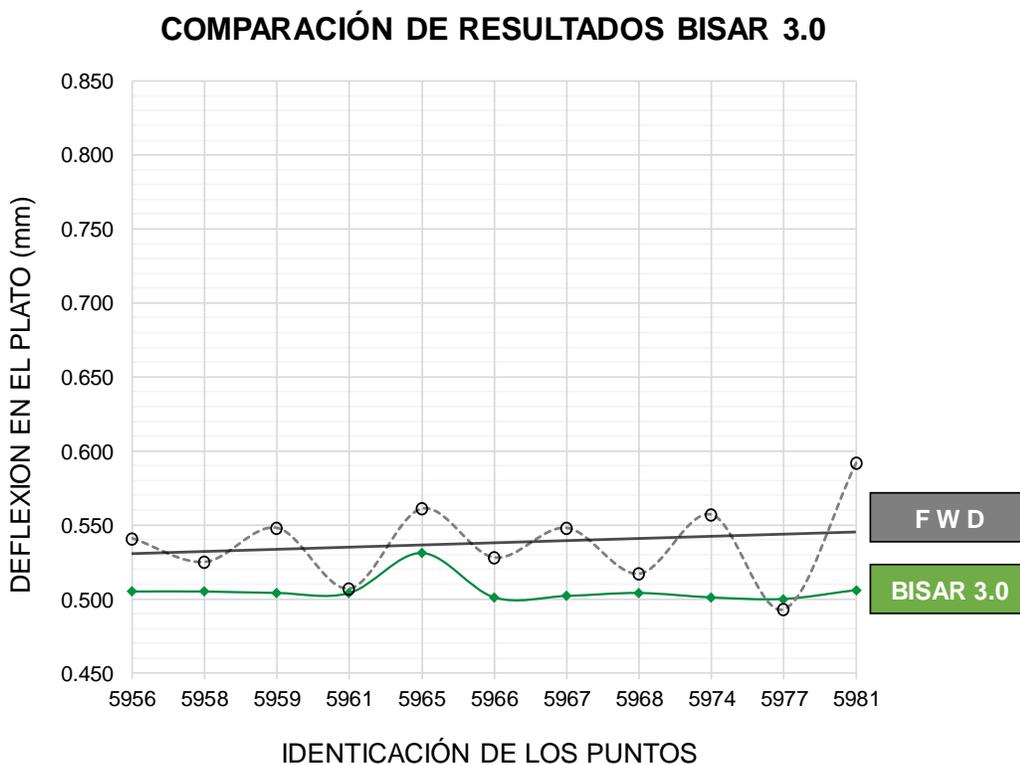


Figura 4.1 Comparación de resultados BISAR 3.0 vs FWD LIB22S

La Figura 4.2 Comparación de resultados BISAR 3.0 vs FWD CAB17N muestra de forma gráfica los datos obtenidos para la vía CAB17N, se puede observar que se generó una línea de tendencia (continua y color negro) para indicar la orientación de los datos. Los resultados obtenidos por BISAR 3.0 se encuentran sobre datos registrados por el FWD y tienen aproximadamente 0.04 mm de desviación máxima.

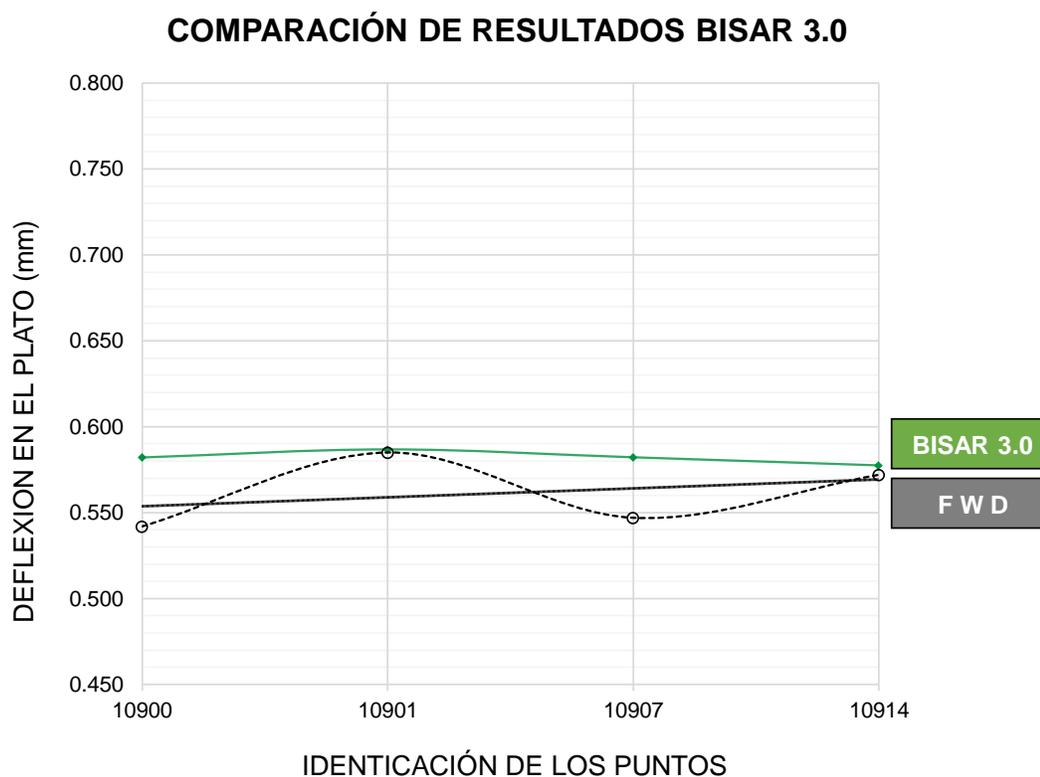


Figura 4.2 Comparación de resultados BISAR 3.0 vs FWD CAB17N

4.2.2 ANÁLISIS DE MODELACIÓN CON 3D MOVE

De los cuatro software estudiados, 3D MOVE es uno de los dos (2) con la mayor cercanía de datos comparado con los resultados del FWD, al igual que BISAR 3.0.

La Tabla 4.4 y Tabla 4.5 muestran el resultado de todas las modelaciones realizadas para la vía LIB16S tramo de LIB22S a Tamanique y para la vía CAB17N tramo de Tejutepeque a Jutiapa respectivamente.

PROYECTO 1: TRAMO DE INT. LIB 22S A TAMANIQUE					
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	DEFLEXIÓN EN EL PLATO FWD (mm)	DEFLEXIÓN EN 3D MOVE (mm)
5956	Int. LIB22S - Tamanique	2+000	2+250	0.541	0.530
5958	Int. LIB22S - Tamanique	2+500	2+750	0.525	0.534
5959	Int. LIB22S - Tamanique	2+750	3+000	0.548	0.537
5961	Int. LIB22S - Tamanique	3+250	3+500	0.507	0.536
5965	Int. LIB22S - Tamanique	4+250	4+500	0.561	0.532
5966	Int. LIB22S - Tamanique	4+500	4+750	0.528	0.536
5967	Int. LIB22S - Tamanique	4+750	5+000	0.548	0.533
5968	Int. LIB22S - Tamanique	5+000	5+250	0.517	0.534
5974	Int. LIB22S - Tamanique	6+500	6+750	0.557	0.532
5977	Int. LIB22S - Tamanique	7+250	7+500	0.493	0.540
5981	Int. LIB22S - Tamanique	8+250	8+500	0.592	0.537

Tabla 4.4 Tabla comparativa FWD vs 3D MOVE de la Vía LIB16S

PROYECTO 2: TRAMO DE TEJUTEPEQUE A JUTIAPA					
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	DEFLEXIÓN EN EL PLATO FWD (mm)	DEFLEXIÓN EN 3D MOVE (mm)
10900	Tejutepeque - Jutiapa	3+000	3+250	0.542	0.582
10901	Tejutepeque - Jutiapa	3+250	3+500	0.585	0.587
10907	Tejutepeque - Jutiapa	4+750	5+000	0.547	0.585
10914	Tejutepeque - Jutiapa	6+500	6+750	0.572	0.578

Tabla 4.5 Tabla comparativa FWD vs 3D MOVE de la Vía CAB17N

La Figura 4.3 muestra de forma gráfica la comparación de los datos del FWD contra los generados en 3D MOVE para la vía LIB 16S. Se ilustra la cercanía que poseen los resultados los cuales coinciden en más de un punto con la línea de tendencia mostrada para los datos registrados por el FWD con aproximadamente 0.05 mm de desviación máxima.

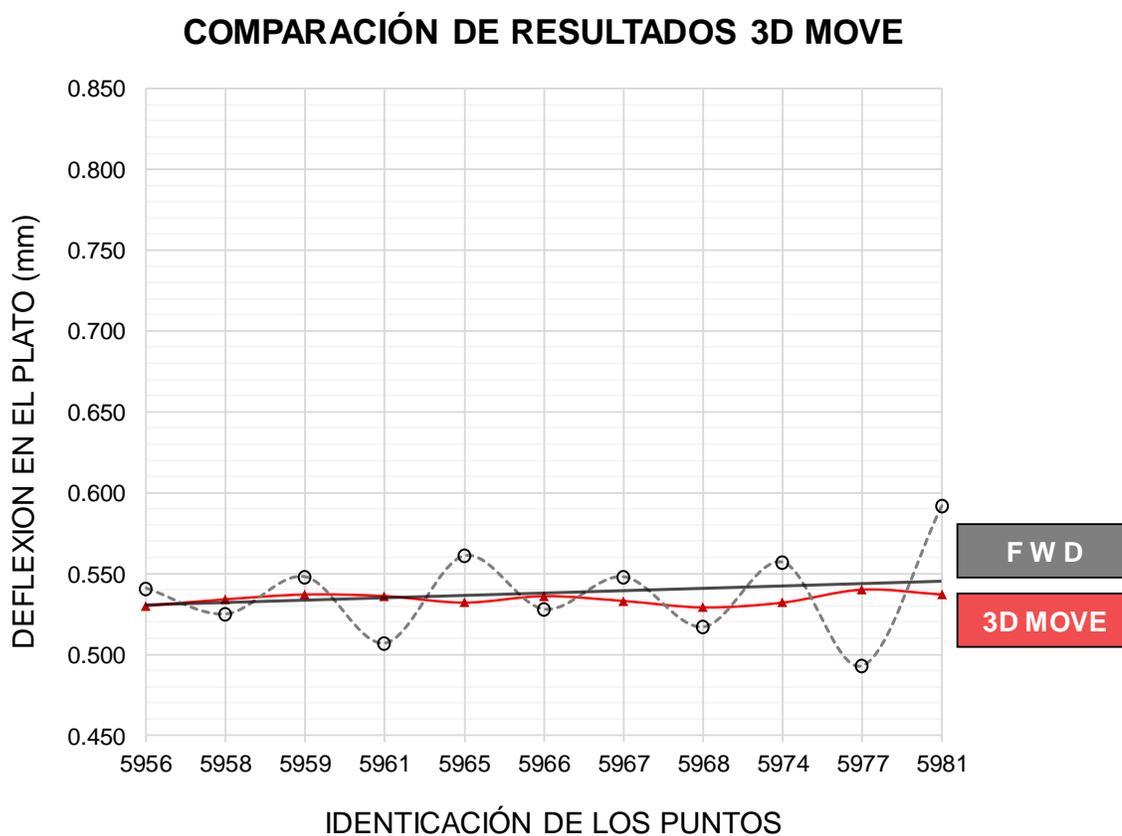


Figura 4.3 Comparación de resultados 3D MOVE vs FWD LIB22S

La Figura 4.4 Comparación de resultados 3D MOVE vs FWD CAB17N muestra de forma gráfica la comparación de los datos del FWD contra los generados en 3D MOVE para la vía CAB 17N, se generó una línea de tendencia (continua y color negro) para indicar la orientación de los datos. Se tienen aproximadamente 0.04 mm de desviación máxima.

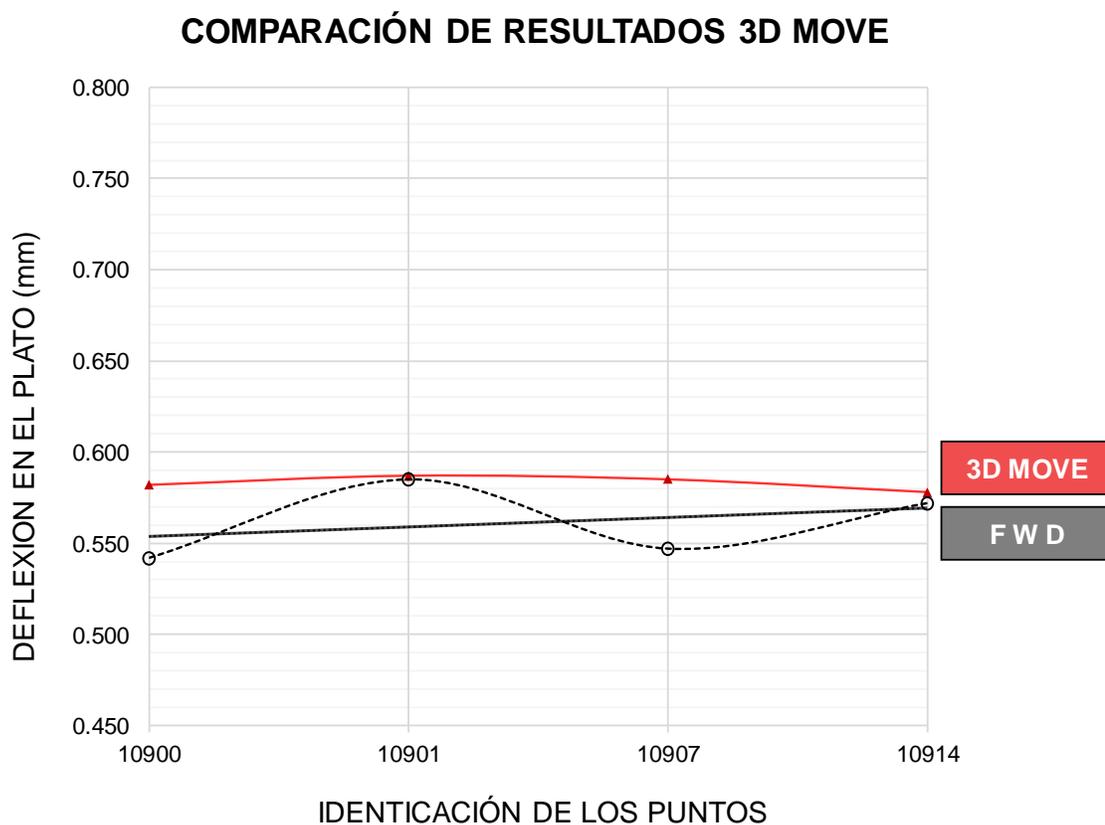


Figura 4.4 Comparación de resultados 3D MOVE vs FWD CAB17N

4.2.3 ANÁLISIS DE MODELACIÓN CON PITRA PAVE

A continuación, se presentan los datos generados por el software PITRA PAVE que a pesar de ser el mejor evaluado en cuanto a los aspectos generales mencionados en el apartado 4.1, es uno de los softwares cuyos resultados no tocan la línea de tendencia trazada con los datos obtenidos por el ensayo FWD. La Tabla 4.6 y la Tabla 4.7 muestran el resultado de todas las modelaciones realizadas para la vía LIB16S tramo de LIB22S a Tamanique y para la vía CAB17N tramo de Tejutepeque a Jutiapa respectivamente.

PROYECTO 1: TRAMO DE INT. LIB 22S A TAMANIQUE					
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	DEFLEXIÓN EN EL PLATO FWD (mm)	DEFLEXIÓN EN PITRA PAVE (mm)
5956	Int. LIB22S - Tamanique	2+000	2+250	0.541	0.690
5958	Int. LIB22S - Tamanique	2+500	2+750	0.525	0.695
5959	Int. LIB22S - Tamanique	2+750	3+000	0.548	0.695
5961	Int. LIB22S - Tamanique	3+250	3+500	0.507	0.697
5965	Int. LIB22S - Tamanique	4+250	4+500	0.561	0.692
5966	Int. LIB22S - Tamanique	4+500	4+750	0.528	0.697
5967	Int. LIB22S - Tamanique	4+750	5+000	0.548	0.694
5968	Int. LIB22S - Tamanique	5+000	5+250	0.517	0.695
5974	Int. LIB22S - Tamanique	6+500	6+750	0.557	0.692
5977	Int. LIB22S - Tamanique	7+250	7+500	0.493	0.703
5981	Int. LIB22S - Tamanique	8+250	8+500	0.592	0.699

Tabla 4.6 Tabla Comparativa FWD vs PITRA PAVE Vía LIB22S

PROYECTO 2: TRAMO DE TEJUTEPEQUE A JUTIAPA					
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	DEFLEXIÓN EN EL PLATO FWD (mm)	DEFLEXIÓN EN PITRA PAVE (mm)
10900	Tejutepeque - Jutiapa	3+000	3+250	0.542	0.717
10901	Tejutepeque - Jutiapa	3+250	3+500	0.585	0.723
10907	Tejutepeque - Jutiapa	4+750	5+000	0.547	0.721
10914	Tejutepeque - Jutiapa	6+500	6+750	0.572	0.715

Tabla 4.7 Tabla comparativa FWD vs PITRA PAVE de la Vía CAB17N

La Figura 4.5 muestra de forma gráfica la comparación de los datos del FWD contra los generados en PITRA PAVE para la vía LIB 16S, se aprecia como la respuesta del software es mayor a la obtenida por el ensayo FWD con aproximadamente 0.21 mm de desviación máxima.

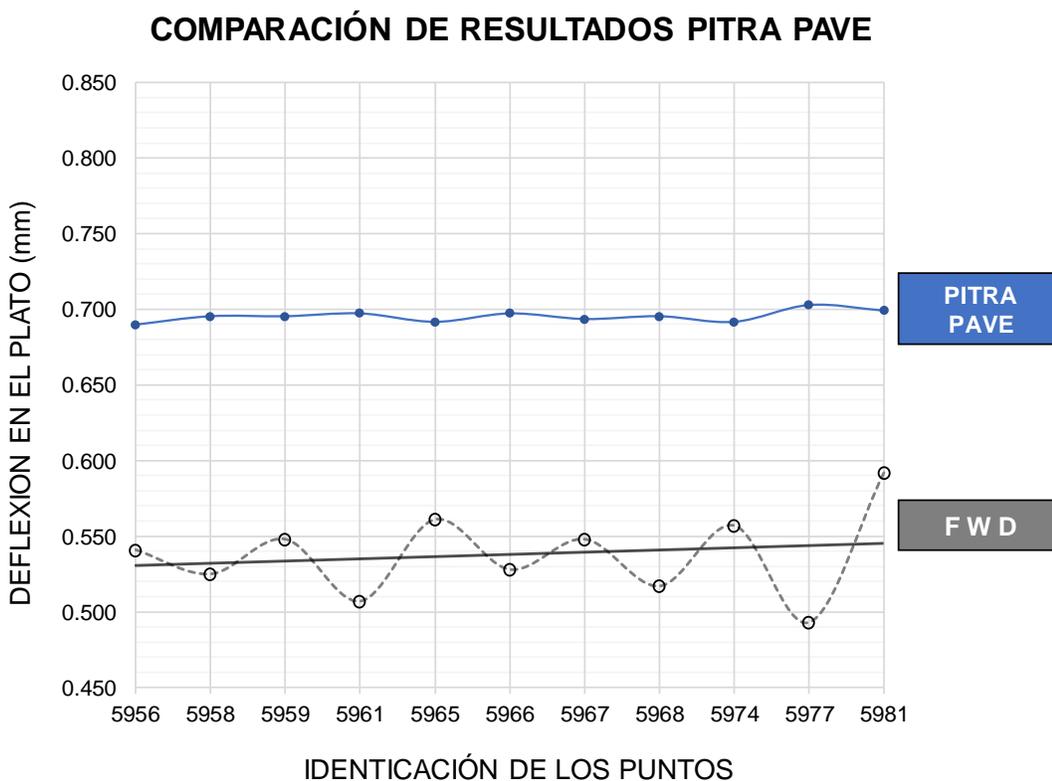


Figura 4.5 Comparación de resultados PITRA PAVE vs FWD

La Figura 4.6 muestra se forma gráfica la comparación de los datos del FWD contra los generados en PITRA PAVE para la vía CAB 17N, se generó una línea de tendencia (continua y color negro) para indicar la orientación de los datos. Se tienen aproximadamente 0.18 mm de desviación máxima.

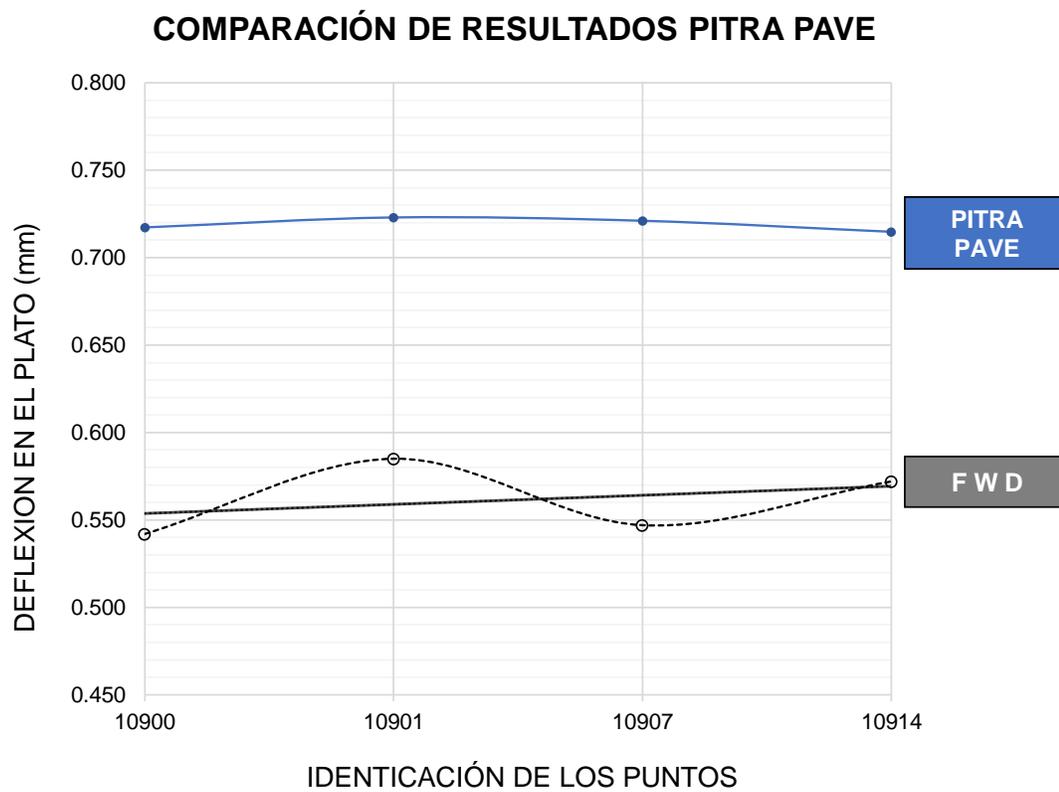


Figura 4.6 Comparación de resultados PITRA PAVE vs FWD CAB17N

4.2.4 ANÁLISIS DE MODELACIÓN CON WIN DEPAV

Este software comparte una característica muy particular con uno de sus homólogos, PITRA PAVE, sus resultados que son considerablemente más altos que los arrojados por el FWD lo catalogan como el software con la mayor desviación respecto a los datos que se tiene como modelo de comparación.

La Tabla 4.8y Tabla 4.9muestran el resultado de todas las modelaciones realizadas para la vía LIB16S tramo de LIB22S a Tamanique y para la vía CAB17N tramo de Tejutepeque a Jutiapa respectivamente.

PROYECTO 1: TRAMO DE INT. LIB 22S A TAMANIQUE					
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	DEFLEXIÓN EN EL PLATO FWD (mm)	DEFLEXIÓN EN WINDEPAV (mm)
5956	Int. LIB22S - Tamanique	2+000	2+250	0.541	0.631
5958	Int. LIB22S - Tamanique	2+500	2+750	0.525	0.637
5959	Int. LIB22S - Tamanique	2+750	3+000	0.548	0.625
5961	Int. LIB22S - Tamanique	3+250	3+500	0.507	0.655
5965	Int. LIB22S - Tamanique	4+250	4+500	0.561	0.639
5966	Int. LIB22S - Tamanique	4+500	4+750	0.528	0.648
5967	Int. LIB22S - Tamanique	4+750	5+000	0.548	0.621
5968	Int. LIB22S - Tamanique	5+000	5+250	0.517	0.622
5974	Int. LIB22S - Tamanique	6+500	6+750	0.557	0.627
5977	Int. LIB22S - Tamanique	7+250	7+500	0.493	0.642
5981	Int. LIB22S - Tamanique	8+250	8+500	0.592	0.629

Tabla 4.8 Tabla comparativa FWD vs WinDEPAV de la Vía LIB16S

PROYECTO 2: TRAMO DE TEJUTEPEQUE A JUTIAPA					
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	DEFLEXIÓN EN EL PLATO FWD (mm)	DEFLEXIÓN EN WINDEPAV (mm)
10900	Tejutepeque - Jutiapa	3+000	3+250	0.542	0.717
10901	Tejutepeque - Jutiapa	3+250	3+500	0.585	0.722
10907	Tejutepeque - Jutiapa	4+750	5+000	0.547	0.720
10914	Tejutepeque - Jutiapa	6+500	6+750	0.572	0.711

Tabla 4.9 Tabla comparativa FWD vs WinDEPAV de la Vía CAB17N

En la Figura 4.7 es posible apreciar la dispersión que existe entre los resultados generados por WinDEPAV al ser comparados con los datos obtenidos en el ensayo del FWD. A pesar de tener aproximadamente 0.31 mm de desviación máxima mantiene una forma muy similar a la de los otros software.

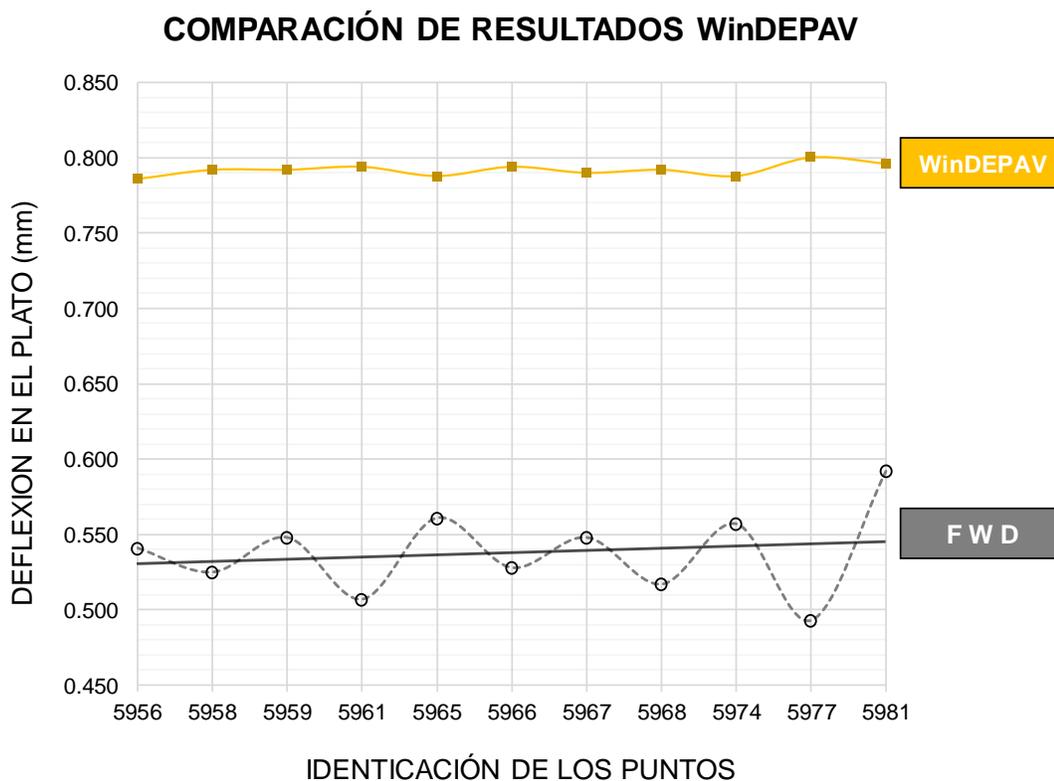


Figura 4.7 Comparación de resultados WINDEPAV vs FWD

La Figura 4.8 muestra de forma gráfica los resultados obtenidos para la vía CAB17N, se puede observar que se generó una línea de tendencia (continua y color negro) para indicar la orientación de los datos. Los resultados obtenidos por WinDEPAV se encuentran sobre los datos registrados por el FWD y tienen aproximadamente 0.17 mm de desviación máxima.

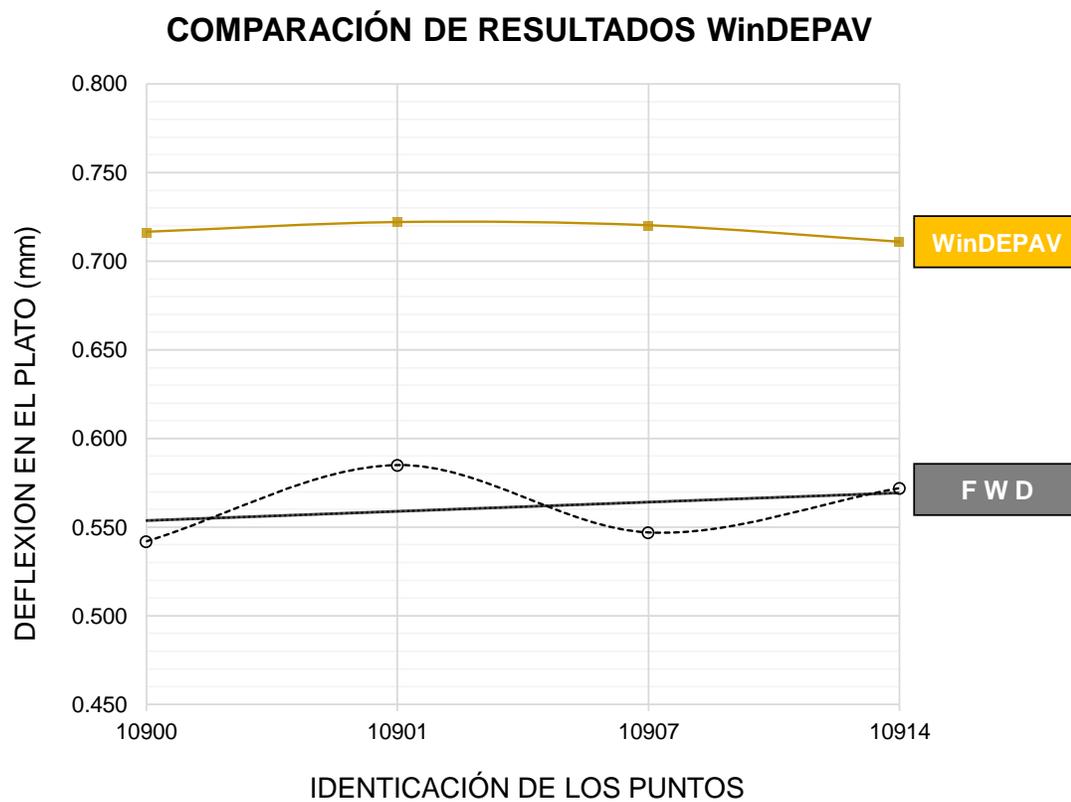


Figura 4.8 Comparación de resultados WinDEPAV vs FWD CAB17N

4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS SOFTWARE VS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL ENSAYO FWD

Se presenta de manera resumida todos los datos obtenidos de modelar con los cuatro (4) software los diseños de las vías estudiadas, a la vez se muestra a manera de comparación los resultados emitidos por el Deflectómetro de Impacto FWD (Ver Figura 4.9 y Figura 4.10).

PROYECTO 1: TRAMO DE INT. LIB 22S A TAMANIQUE									
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	CARGA FWD (kN)	DEFLEXIÓN EN EL PLATO FWD (mm)	DEFLEXIÓN EN BISAR 3.0 (mm)	DEFLEXIÓN EN 3D MOVE (mm)	DEFLEXIÓN EN PITRA PAVE (mm)	DEFLEXIÓN EN WINDEPAV (mm)
5956	Int. LIB22S - Tamanique	2+000	2+250	37.3	0.541	0.505	0.530	0.690	0.631
5958	Int. LIB22S - Tamanique	2+500	2+750	37.6	0.525	0.505	0.534	0.695	0.637
5959	Int. LIB22S - Tamanique	2+750	3+000	37.6	0.548	0.504	0.537	0.695	0.625
5961	Int. LIB22S - Tamanique	3+250	3+500	37.7	0.507	0.504	0.536	0.697	0.655
5965	Int. LIB22S - Tamanique	4+250	4+500	37.4	0.561	0.531	0.532	0.692	0.639
5966	Int. LIB22S - Tamanique	4+500	4+750	37.7	0.528	0.501	0.536	0.697	0.648
5967	Int. LIB22S - Tamanique	4+750	5+000	37.5	0.548	0.502	0.533	0.694	0.621
5968	Int. LIB22S - Tamanique	5+000	5+250	37.6	0.517	0.504	0.534	0.695	0.622
5974	Int. LIB22S - Tamanique	6+500	6+750	37.4	0.557	0.501	0.532	0.692	0.627
5977	Int. LIB22S - Tamanique	7+250	7+500	38	0.493	0.509	0.540	0.703	0.642
5981	Int. LIB22S - Tamanique	8+250	8+500	37.8	0.592	0.506	0.537	0.699	0.629

Figura 4.9 Tabla Resumen Resultados para vía LIB 22 S

PROYECTO 2: TRAMO DE TEJUTEPEQUE A JUTIAPA									
ID	TRAMO	Km INICIO	Km FINAL	CARGA FWD (kN)	DEFLEXIÓN EN EL PLATO FWD (mm)	DEFLEXIÓN EN BISAR 3.0 (mm)	DEFLEXIÓN EN 3D MOVE (mm)	DEFLEXIÓN EN PITRA PAVE (mm)	DEFLEXIÓN EN WINDEPAV (mm)
10900	Tejutepeque - Jutiapa	3+000	3+250	37.7	0.542	0.582	0.582	0.717	0.717
10901	Tejutepeque - Jutiapa	3+250	3+500	38	0.585	0.587	0.587	0.723	0.722
10907	Tejutepeque - Jutiapa	4+750	5+000	37.9	0.547	0.582	0.585	0.721	0.720
10914	Tejutepeque - Jutiapa	6+500	6+750	37.4	0.572	0.578	0.578	0.715	0.711

Figura 4.10 Tabla Resumen Resultados para vía CAB17N

La Figura 4.11 muestra de forma gráfica la comparación de los datos del FWD contra los generados por la modelación con los softwares mencionados para la vía LIB 16S. La gráfica se construyó al plotear el ID de cada punto con la correspondiente deflexión.

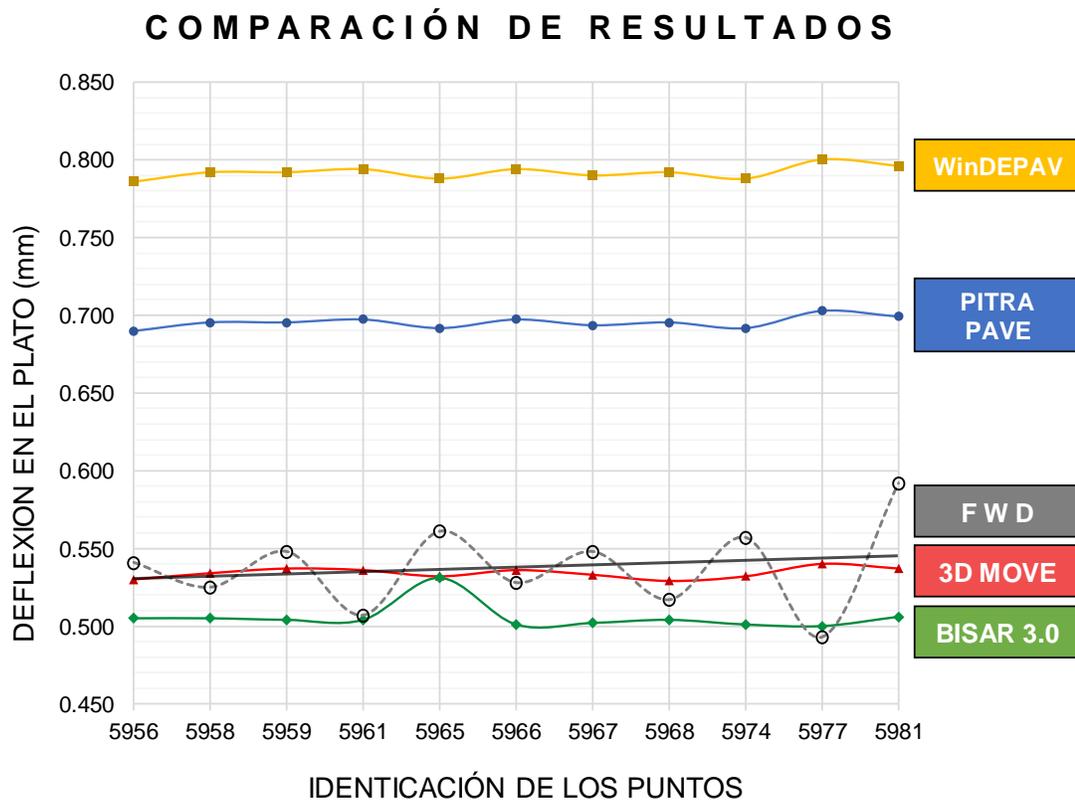


Figura 4.11 Análisis y comparación de datos vía LIB22S

En la Figura 4.11 y Figura 4.12 se muestra a manera de resumen la gráfica con las respuestas superpuestas generadas por cada uno de los software y a la vez se puede apreciar el comportamiento de estos frente a los datos generados por el FWD para cada una de las dos vías analizadas.

DESVIACIÓN RESPECTO A PUNTOS DEL FWD				
ID	DEFLEXIÓN EN BISSAR 3.0 (mm)	DEFLEXIÓN EN 3D MOVE (mm)	DEFLEXIÓN EN PITRA PAVE (mm)	DEFLEXIÓN EN WINDEPAV (mm)
5956	-0.04	-0.01	0.15	0.24
5958	-0.02	0.01	0.17	0.27
5959	-0.04	-0.01	0.15	0.24
5961	0.00	0.03	0.19	0.29
5965	-0.03	-0.03	0.13	0.23
5966	-0.03	0.01	0.17	0.27
5967	-0.05	-0.02	0.15	0.24
5968	-0.01	0.02	0.18	0.28
5974	-0.06	-0.03	0.13	0.23
5977	0.02	0.05	0.21	0.31
5981	-0.09	-0.05	0.11	0.20

Tabla 4.10 Comparación de Desviaciones en los resultados de la modelación comparados con el FWD vía LIB16S.

La Tabla 4.10 muestra las desviaciones de los resultados de deflexión obtenidos por cada software para la vía LIB 16S comparados con los resultados del ensayo FWD. Se resalta en amarillo los datos de desviación máxima registrados

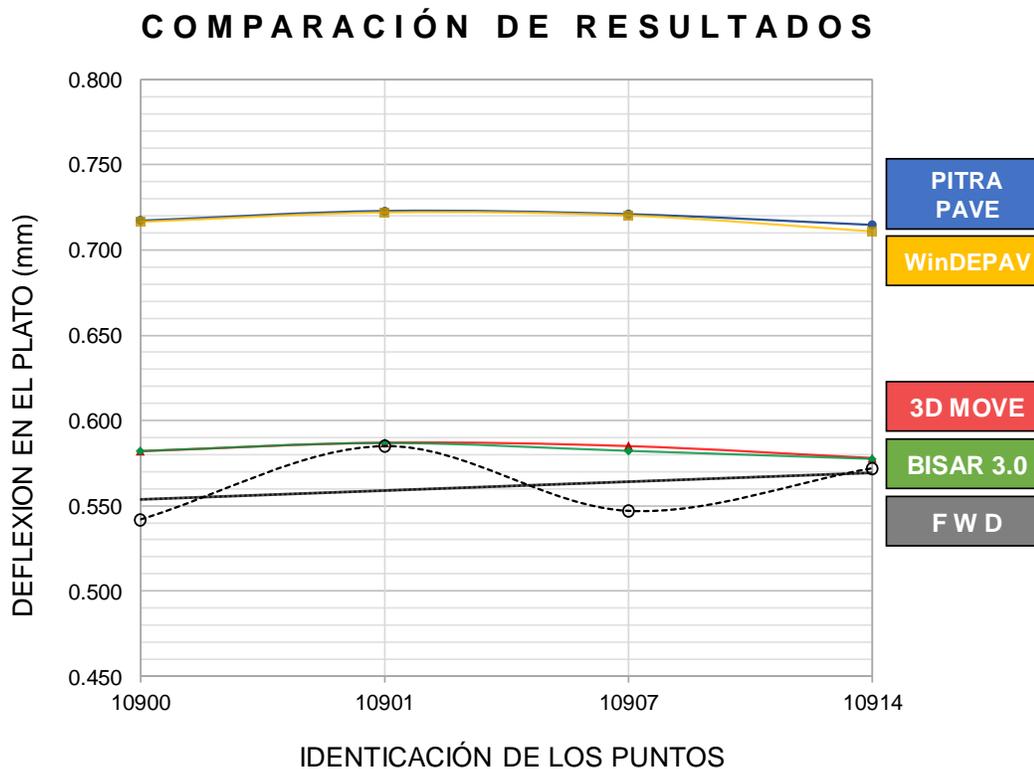


Figura 4.12 Análisis y comparación de datos vía CAB17N

La Figura 4.12 muestra de forma gráfica la comparación de los datos del FWD contra los generados por la modelación con los softwares mencionados para la vía CAB17N. La gráfica se construyó al plotear el ID de cada punto con la correspondiente deflexión.

DESVIACIÓN ORDENADA				
ID	DEFLEXIÓN EN BISAR 3.0 (mm)	DEFLEXIÓN EN 3D MOVE (mm)	DEFLEXIÓN EN PITRA PAVE (mm)	DEFLEXIÓN EN WINDEPAV (mm)
10900	0.04	0.04	0.18	0.17
10901	0.04	0.04	0.17	0.17
10907	0.01	0.00	0.14	0.14
10914	0.00	-0.10	0.14	0.14

Tabla 4.11 Comparación de Desviaciones en los resultados de la modelación comparados con el FWD vía CAB17N.

La Tabla 4.11 muestra las desviaciones de los resultados de deflexión obtenidos por cada software para la vía CAB17N comparados con los resultados del ensayo FWD. Se resalta en amarillo los datos de desviación máxima registrados.

4.4 CONCLUSIONES

- Fue posible realizar la modelación del Pavimento utilizando los datos de diseño de cada estructura, obteniendo así los modelos analíticos de respuesta.
- Los software permiten determinar la Distribución de esfuerzos y las deformaciones en las estructuras de pavimento evaluadas. Sin embargo, no se tomaron en cuenta en el análisis por no tener un valor equivalente comparables con los resultados obtenidos por el ensayo FWD.
- Los análisis realizados por los software y las consultas a los autores de los mismos confirman que es posible comparar el valor de la deflexión con la información que se conoce de la deflexión del plato de carga del ensayo FWD, ubicando la carga en el centro del carril.
- El software más cercano a los resultados del FWD es el 3D MOVE, el cual arroja resultados que varían hasta en cuatro milésimas de milímetros.
- Todos los software poseen una interfaz intuitiva, siendo efectivos para realizar cálculos que tomarían mucho tiempo realizar sin ayuda de un computador.

- Es imposible asegurar un correcto proceso constructivo o garantizar la uniformidad de la vía.

- Los datos obtenidos a través del ensayo FWD por medio del Ministerio de Obras Públicas (MOP) representan la Deflexión registrada en la capa superficial de la estructura del pavimento, únicos datos comparables a los obtenidos por los modelos analíticos generados por los software (aunque los software permiten calcular la deflexión a cualquier profundidad dentro de la estructura de pavimento).

4.5 RECOMENDACIONES

- Para futuros investigadores, realizar la prueba FWD simultánea a la modelación lo más próximo a la fecha en que se inaugure la vía, esto garantizara el uso de los datos de diseño para obtener respuestas representativas de las modelaciones con software.

- Es viable desarrollar investigaciones en El Salvador donde se dé continuidad al estudio del tema de pavimentos con el fin de desarrollar el método mecanicista empírico y así desligarse poco a poco de la metodología actual utilizada (AASHTO 93). Ya que el método mecanicista permite una aproximación mayor que los métodos empíricos

- Debido a la complejidad de los ensayos y la poca disponibilidad de equipo se utilizaron correlaciones para obtener los datos usados en la presente investigación. Se recomienda para investigaciones relacionadas realizar los respectivos ensayos de laboratorio para respaldar los datos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

VASQUES VARELA, LUIS RICARDO. "*Método empírico - Mecanicístico de Diseño de Pavimentos Flexibles*". Manizales 2002.

REYES, FREDY L. "*Diseño de pavimentos por métodos racionales*". Tomo I. Universidad de Los Andes. Bogotá 1999.

HENRY A. VERGARA B, *Diseño Directo de Pavimentos Flexibles*, ECI.

WESTERGAARD, H.M., *Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis*, Highway Research Board, Washington, DC, Vol. 7(No.2), pp. 25-35. (1926)

WESTERGAARD, H.M., *Analysis of Stresses in Concrete Pavement Due to Variations of Temperature*, Proceedings, Highway Research Board, Vol. 6, pp. 201-215. (1926)

REYES, FREDY L. "*Diseño de pavimentos por métodos racionales*". Tomo I. Universidad de Los Andes. Bogotá 1999

HOGG, A.H.A. *Equilibrium of a thin slab on an elastic foundation of finite depth*. Philosophical Magazine, Vol. 35 (243), 1944.

PABLO DEL AGUILA RODRÍGUEZ, *Determinación del Módulo Resiliente del Suelo de Fundación Mediante Método Mecanístico-Empiricista. Método Hogg Simplificado. (2007).*

DONALD M. BURMISTER, *The general theory of stresses and displacements in layered soil systems, Journal of Applied Physics (1945).*

JOSÉ MANUEL LIZÁRRAGA LÓPEZ, *Diseño y Construcción de Pavimentos Flexibles Aplicando Geomallas de Polipropileno como Sistema de Reforzamiento Estructural, (2013).*

YODER, E.J., WITZACK, M.W, *Principles of Pavement Design. Second Edition. Jhon Wiley & Sons, Inc., 1975.*

AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993 - American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.

Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures, NCHRP, 2004.

Manual Centroamericano para el Diseño de Pavimentos, SIECA, 2002.

ASTM D 4695-03, "*Guía estándar para medidas generales de deflexión del pavimento*".

Flexible Pavement Design Manual – Office of Design, Pavement Management Section Tallahassee, Florida.

AASHTO T 274, "*Módulo Resiliente de Suelos de Subrasante*".

AASHTO T 193-99, "*Método de Prueba para la Relación de Soporte California*".

Métodos De Ensayo Para La Determinación De Las Principales Propiedades Dinámicas De Los Suelos De El Salvador

Pulido Gutiérrez Humberto, De la Vara Salazar Román, (2004); "*Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*", 1º edición, Mc. Graw-Hill, México

BISAR 3.0 - *User Manual*

Bitumen Business Group, 1998

3D MOVE - *User Manual*

The University of Nevada, Reno (UNR), 2013

PROGRAMA DEPAV

Instituto de Vías de la Universidad del Cauca, 1994

PITRA PAVE 1.0.0 - *Software de multicapa elástica*

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la
Universidad de Costa Rica, 2015

Información entregada por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2018.

Anexo II. Especificaciones Técnicas (CONDICIONES TÉCNICAS)

Proyecto de Tejutepeque a Jutiapa

Especificaciones Técnicas (Original firmado y sellado)

Proyecto de LIB22S a TAMANIQUE

**MODELACIÓN MULTICAPA ELÁSTICA DE
PAVIMENTOS FLEXIBLES EN EL SALVADOR
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SOFTWARE**



ANEXO 1

DEFLECTOMETRÍA

TABLA 2

ID	TramoDe	TramoA	Tramo	District	Depto	Numero	Direccion	Tipo	KmInicio	KmFinal	Ancho	Lane	HomizAncho	HomizTipo	HomDeAncho	HomDeTipo	DerVia	DerViaMt
5948	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	0.00	0.25	3.80	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
5949	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	0.25	0.50	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5950	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	0.50	0.75	2.90	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5951	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	0.75	1.00	3.50	3	0.00	N	0.00	N	Construccion	150
5952	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	1.00	1.25	2.90	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5953	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	1.25	1.50	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5954	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	1.50	1.75	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5955	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	1.75	2.00	3.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5956	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	2.00	2.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5957	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	2.25	2.50	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5958	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	2.50	2.75	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5959	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	2.75	3.00	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5960	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	3.00	3.25	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5961	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	3.25	3.50	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5962	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	3.50	3.75	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5963	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	3.75	4.00	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5964	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	4.00	4.25	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5965	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	4.25	4.50	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5966	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	4.50	4.75	2.90	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5967	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	4.75	5.00	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5968	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	5.00	5.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5969	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	5.25	5.50	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5970	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	5.50	5.75	2.90	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5971	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	5.75	6.00	2.90	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5972	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	6.00	6.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5973	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	6.25	6.50	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5974	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	6.50	6.75	2.70	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5975	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	6.75	7.00	2.90	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5976	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	7.00	7.25	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5977	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	7.25	7.50	2.90	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5978	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	7.50	7.75	2.90	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5979	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	7.75	8.00	2.90	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5980	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	8.00	8.25	2.90	3	0.00	N	0.00	N	Libre	0
5981	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	8.25	8.50	2.80	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
5982	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	8.50	8.75	2.90	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
5983	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	8.75	9.00	2.70	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
5984	Int LIB22S	Tamanique	Int. LIB22S - Tamanique	5	LIB	16	S	Flexible	9.00	9.25	2.10	3	0.00	N	0.00	N	Construccion	500

TABLA 3

ID	TramoDe	TramoA	Tramo	District	Depto	Numero	Direccion	Tipo	KmInicio	KmFinal	Ancho	Lane	HomizAnc ho	HomizTipo	HomDeAnc ho	HomDeTip o	DerVia	DerViaMt
10888	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	0.00	0.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Construccion	50
10889	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	0.25	0.50	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10890	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	0.50	0.75	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10891	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	0.75	1.00	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10892	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	1.00	1.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10893	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	1.25	1.50	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	400
10894	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	1.50	1.75	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	400
10895	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	1.75	2.00	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	400
10896	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	2.00	2.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	400
10897	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	2.25	2.50	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10898	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	2.50	2.75	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10899	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	2.75	3.00	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10900	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	3.00	3.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10901	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	3.25	3.50	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10902	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	3.50	3.75	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10903	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	3.75	4.00	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10904	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	4.00	4.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	300
10905	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	4.25	4.50	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	300
10906	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	4.50	4.75	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10907	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	4.75	5.00	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10908	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	5.00	5.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10909	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	5.25	5.50	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	500
10910	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	5.50	5.75	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	400
10911	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	5.75	6.00	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	400
10912	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	6.00	6.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	400
10913	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	6.25	6.50	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	300
10914	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	6.50	6.75	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	200
10915	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	6.75	7.00	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	200
10916	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	7.00	7.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	250
10917	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	7.25	7.50	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Cerca	250
10918	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	7.50	7.75	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Construccion	50
10919	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Flexible	7.75	8.00	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Construccion	420
10920	Tejutepeque	Jutiapa	Tejutepeque - Jutiapa	9	CAB	17	N	Rigido	8.00	8.25	3.00	3	0.00	N	0.00	N	Construccion	500



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Ciudad Universitaria 24 de noviembre de 2017.

Ing. Miguel Ángel Martínez
Director de Planificación de la Obra Publica
Viceministerio de Obras Publicas
Presente.

Referente a: MOP-VMOP-DPOP-SAOPIV-1432/2017

Respetable Ingeniero Martínez.
Reciba un cordial saludo deseándole éxitos en el desarrollo de su gestión.

El motivo de la presente es para hacer constar que los Brs. Carlos Mauricio Chávez Avilés, José Orlando Echeverría Chávez y Víctor Hugō Iriondo Tobar, son egresados de la carrera de Ingeniería Civil, actualmente desarrollando su trabajo de Graduación denominado "Modelación de Pavimentos Flexibles en El Salvador Mediante la Aplicación de Software", dicha investigación pretende comparar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones obtenidos mediante la modelación de diferentes vías de pavimento Flexible de El Salvador base a su diseño final y los resultados proporcionados por el Deflectometro de Impacto .

Por tanto, como parte vital de la investigación se solicita los diseños finales de las vias consideradas las cuales son:

- 1.- Ruta LIB22S, tramo LIB16S-Tamanique, La Libertad
- 2.- Ruta CAB17N, Tramo Tejutepeque-Jutiapa, Cabañas

Sin otro particular que agradecer su atención, me suscribo.

Atentamente

"Hacia la libertad por la Cultura"

Ing. Jorge Oswaldo Rivera Flores
Director de Escuela de Ingeniería Civil



Ref. S/N
MOP-VMOP-DPOP-SAOPIV-1432/2017
San Salvador, 22 de noviembre de 2017

Asunto: Respuesta a solicitud de información.

Señor
José Orlando Echeverría Chávez
Estudiante egresado de Ingeniería Civil
Universidad de El Salvador
Presente

Señor Echeverría:

En atención a nota sin número de referencia, remitida a esta Dirección, en la cual el Ing. Jorge Oswaldo Rivera Flores, hace constar que los Bachilleres Carlos Chávez y José Echeverría, son egresados de la carrera de Ingeniería Civil, quienes están desarrollando el trabajo de graduación denominado "Modelación de Pavimentos Flexibles en El Salvador Mediante la Aplicación de Software", investigación que pretende comparar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones obtenidos mediante la modelación de diferentes vías de pavimento flexible en El Salvador y los resultados proporcionados por el Deflectómetro de Impacto.

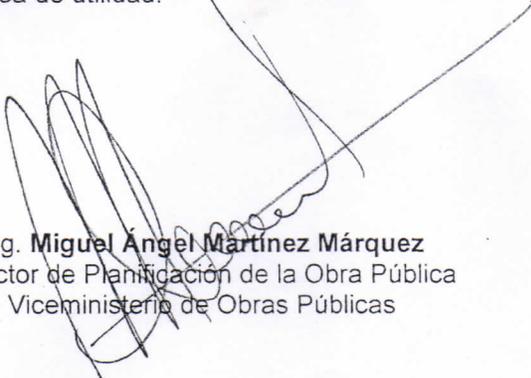
En ese sentido, se remite en formato digital, información parcial inicial y disponible en esta Dirección de las rutas "LIB22S, Tramo LIB16S – Tamanique", La Libertad y "CAB17N, Tramo Tejutepeque – Jutiapa", Cabañas, que se detalla a continuación:

1. Inventario de daños, Deflectometría y de Geometría.
2. Secciones típicas y Especificaciones para las capas de pavimento

Es importante aclarar, que la información se entrega para efectos del estudio mencionado (fines académicos), esperando que le sea de utilidad.

Cordialmente.




Ing. Miguel Ángel Martínez Márquez
Director de Planificación de la Obra Pública
Viceministerio de Obras Públicas

Anexo: CD

C.C. Ing. Tony Walter Sandoval / Director General VMOP / MOPTVDU
Ing. Dionicio Alberto Ramírez / Subdirector de Administración de Obras de Paso y de Inventarios Viales / DPOP
Ing. Jorge Oswaldo Rivera / Director Escuela de Ingeniería Civil-UES
Ing. Gilberto Efraín Lima / Técnico Depto. Inventarios Viales / SAOPIV / DPOP



Plantel La Lechuza, km 5 ½ Alameda Manuel Enrique Araujo, contiguo al
Centro Internacional de Ferias y Convenciones – CIFCO, San Salvador
Teléfonos: 2528-3016, 2528-3018.
Correo electrónico: miguel.martinez@mop.gob.sv

**MODELACIÓN MULTICAPA ELÁSTICA DE
PAVIMENTOS FLEXIBLES EN EL SALVADOR
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SOFTWARE**



ANEXO 2

MEMORIA DE CÁLCULOS

**Respuestas obtenidas por
el Software**

BISAR 3.0

**PROYECTO LIB16S
TRAMO DE INT. LIB22S A TAMANIQUE**

- **Respuestas obtenidas por el Programa BISAR 3.0**
 - **Tramo con identificación 5956**

The screenshot shows the BISAR 3.0 software interface. A window titled 'BISAR 3.0 - Block Results Table' is open, displaying a table of results for system 1. The table has columns labeled G through M and rows numbered 11 through 27. The data is organized into sections for Stress (YY, ZZ) and Strain (XX, YY, ZZ), followed by Displacement (UX, UY). The values are in scientific notation, with stress in MPa and strain in microstrain.

	G	H	I	J	K	L	M
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displace
22	YY	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY
23	(MPa)	(MPa)	μstrain	μstrain	μstrain	(μm)	(μm)
24	-5.326E-01	-5.277E-01	-5.209E+02	-5.209E+02	-4.996E+02	0.000E+00	0.000E
25	-5.326E-01	-5.277E-01	-5.209E+02	-5.209E+02	-4.996E+02	0.000E+00	0.000E
26	-5.326E-01	-5.277E-01	-5.209E+02	-5.209E+02	-4.996E+02	0.000E+00	0.000E
27	-5.326E-01	-5.277E-01	-5.209E+02	-5.209E+02	-4.996E+02	0.000E+00	0.000E

Buttons for 'Copy to Clipboard' and 'Cancel' are visible at the bottom of the table window.

- **Tramo con identificación 5958**

The screenshot shows the BISAR 3.0 software interface. The main window displays the project name 'LIB22S5958' and the number of systems as '1'. A 'Block Results Table' is open, showing data for system '1' across load numbers 11 to 27. The table columns are labeled H, I, J, K, L, M, and N. The data rows show stress values in MPa and displacement values in micrometers (μm).

Load Number	H	I	J	K	L	M	N
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displacement
22	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
23	(MPa)	μstrain	μstrain	μstrain	(μm)	(μm)	(μm)
24	-5.319E-01	-5.251E+02	-5.251E+02	-5.036E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.929E
25	-5.319E-01	-5.251E+02	-5.251E+02	-5.036E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.929E
26	-5.319E-01	-5.251E+02	-5.251E+02	-5.036E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.929E
27	-5.319E-01	-5.251E+02	-5.251E+02	-5.036E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.929E

- **Tramo con identificación 5959**

The screenshot shows the BISR 3.0 software interface. A window titled 'BISR 3.0 - Block Results Table' is open, displaying a table of calculated data for project LIB22S5959. The table has columns labeled H, I, J, K, L, M, and N, and rows numbered 11 through 27. The data is as follows:

	H	I	J	K	L	M	N
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displacement
22	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
23	[MPa]	μstrain	μstrain	μstrain	(μm)	(μm)	(μm)
24	-5.319E-01	-5.251E+02	-5.251E+02	-5.036E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.929E
25	-5.319E-01	-5.251E+02	-5.251E+02	-5.036E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.929E
26	-5.319E-01	-5.251E+02	-5.251E+02	-5.036E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.929E
27	-5.319E-01	-5.251E+02	-5.251E+02	-5.036E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.929E

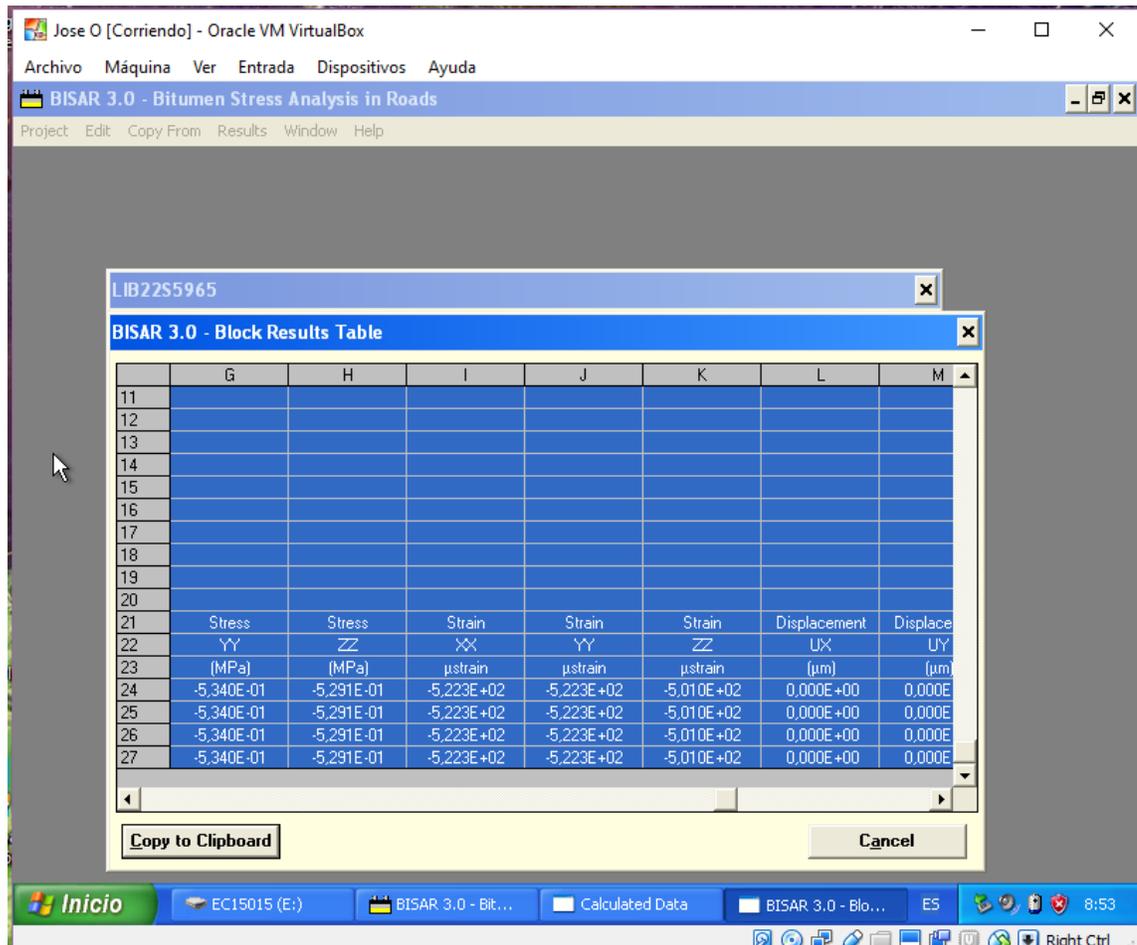
- **Tramo con identificación 5961**

The screenshot shows the BISAR 3.0 software interface. A window titled 'LIB22S5961' displays a 'Block Results Table'. The table has columns labeled H through N and rows numbered 11 through 27. The data is as follows:

	H	I	J	K	L	M	N
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displacement
22	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
23	(MPa)	μstrain	μstrain	μstrain	(μm)	(μm)	(μm)
24	-5,333E-01	-5,265E+02	-5,265E+02	-5,050E+02	0,000E+00	0,000E+00	7,950E
25	-5,333E-01	-5,265E+02	-5,265E+02	-5,050E+02	0,000E+00	0,000E+00	7,950E
26	-5,333E-01	-5,265E+02	-5,265E+02	-5,050E+02	0,000E+00	0,000E+00	7,950E
27	-5,333E-01	-5,265E+02	-5,265E+02	-5,050E+02	0,000E+00	0,000E+00	7,950E

Buttons for 'Copy to Clipboard' and 'Cancel' are visible at the bottom of the table window. The Windows taskbar at the bottom shows the system tray with the time 8:57 and the 'Right Ctrl' indicator.

- **Tramo con identificación 5965**



- **Tramo con identificación 5966**

The screenshot shows the BISAR 3.0 software interface. The main window is titled 'LIB22S5966' and has a 'Number of Systems (1-10): 1' dropdown menu. A 'BISAR 3.0 - Block Results Table' dialog box is open, displaying a table with the following data:

	H	I	J	K	L	M	N
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displacement
22	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
23	(MPa)	μstrain	μstrain	μstrain	(μm)	(μm)	(μm)
24	-5.333E-01	-5.265E+02	-5.265E+02	-5.050E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.950E
25	-5.333E-01	-5.265E+02	-5.265E+02	-5.050E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.950E
26	-5.333E-01	-5.265E+02	-5.265E+02	-5.050E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.950E
27	-5.333E-01	-5.265E+02	-5.265E+02	-5.050E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.950E

The dialog box also includes a 'Copy to Clipboard' button and a 'Cancel' button. The background window shows the 'System Des' and 'Load Number' (1) settings.

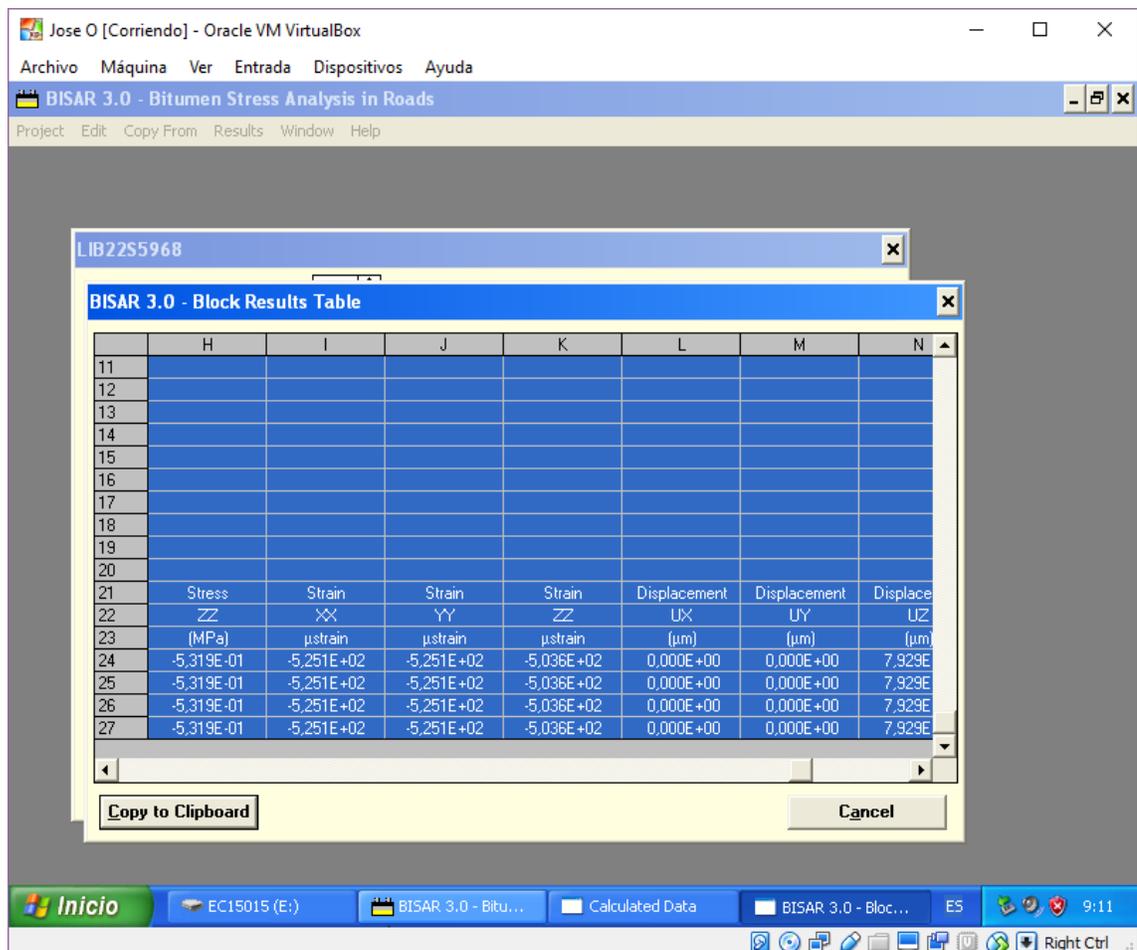
- **Tramo con identificación 5967**

The screenshot shows the BISAR 3.0 software interface. A window titled 'LIB22S5967' is open, displaying a 'Block Results Table'. The table has 8 columns labeled H through N and 27 rows. The data is as follows:

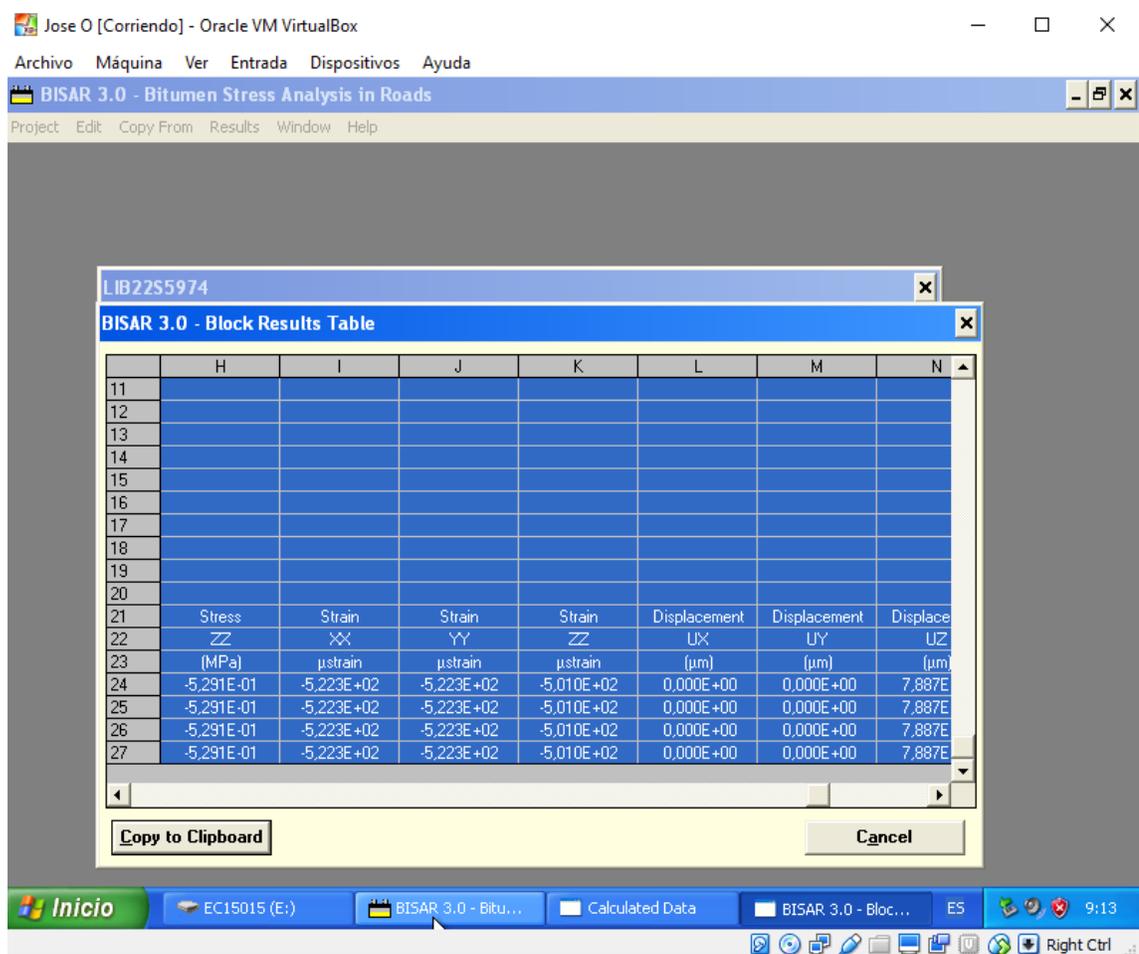
	H	I	J	K	L	M	N
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displacement
22	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
23	(MPa)	μstrain	μstrain	μstrain	(μm)	(μm)	(μm)
24	-5.305E-01	-5.237E+02	-5.237E+02	-5.023E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.908E
25	-5.305E-01	-5.237E+02	-5.237E+02	-5.023E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.908E
26	-5.305E-01	-5.237E+02	-5.237E+02	-5.023E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.908E
27	-5.305E-01	-5.237E+02	-5.237E+02	-5.023E+02	0.000E+00	0.000E+00	7.908E

Buttons at the bottom of the table window include 'Copy to Clipboard' and 'Cancel'. The Windows taskbar at the bottom shows the 'Inicio' button, several open applications, and the system clock at 9:05.

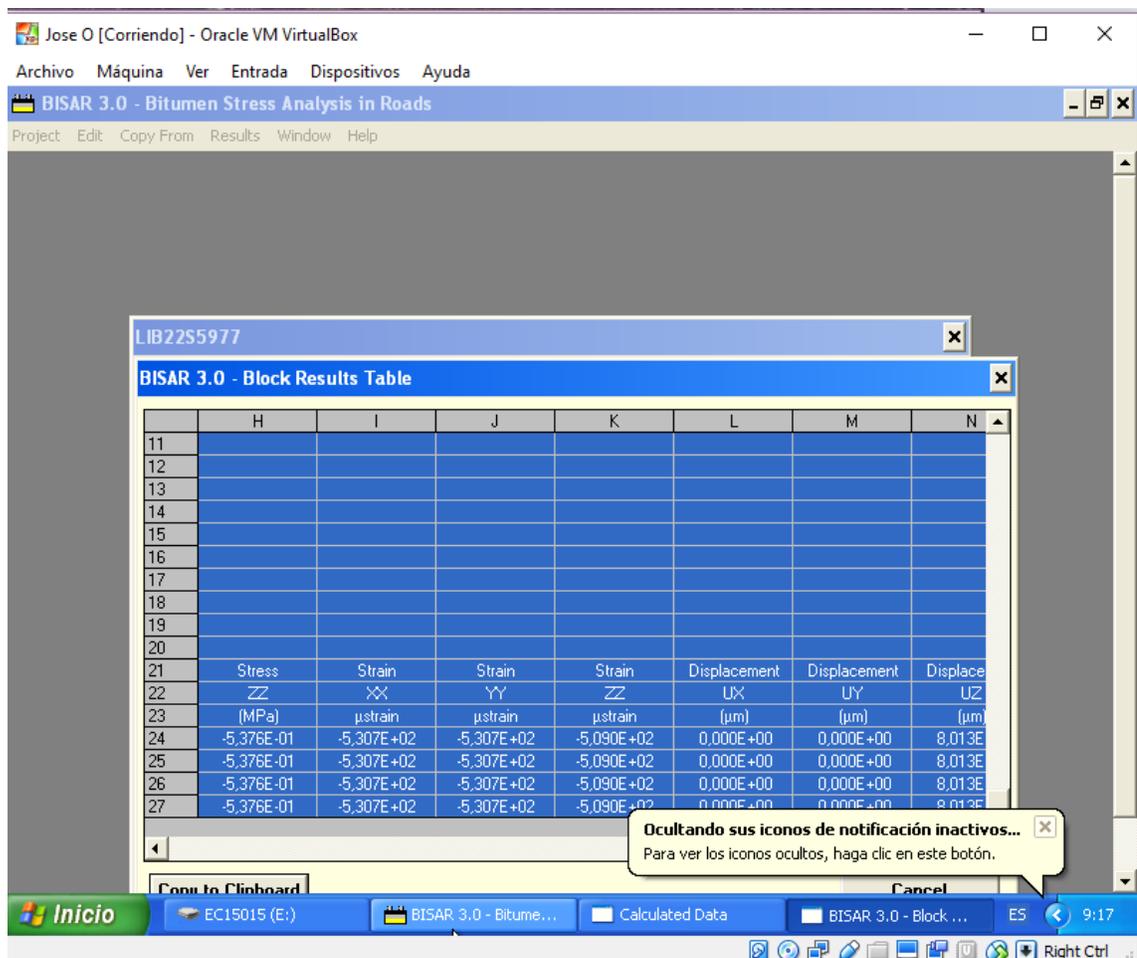
- **Tramo con identificación 5968**



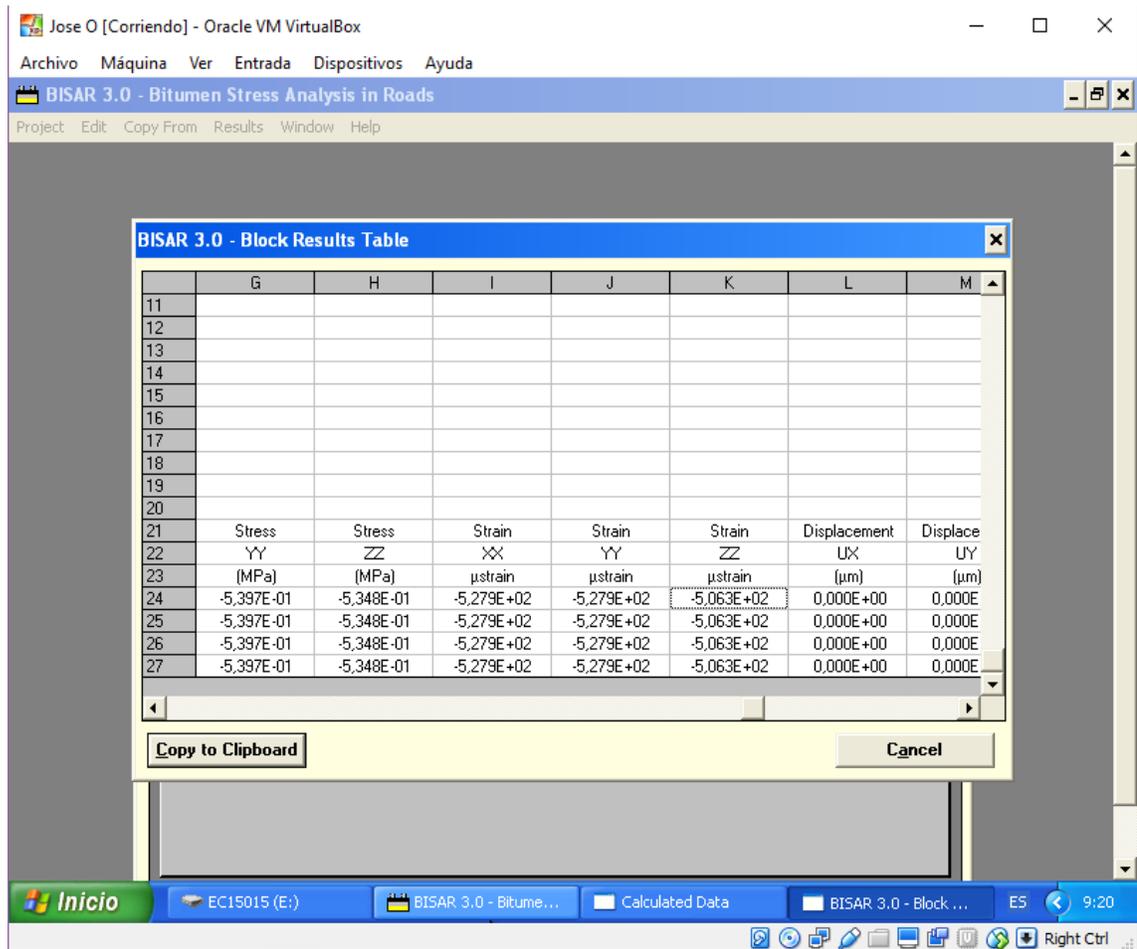
- **Tramo con identificación 5974**



- **Tramo con identificación 5977**



- **Tramo con identificación 5981**

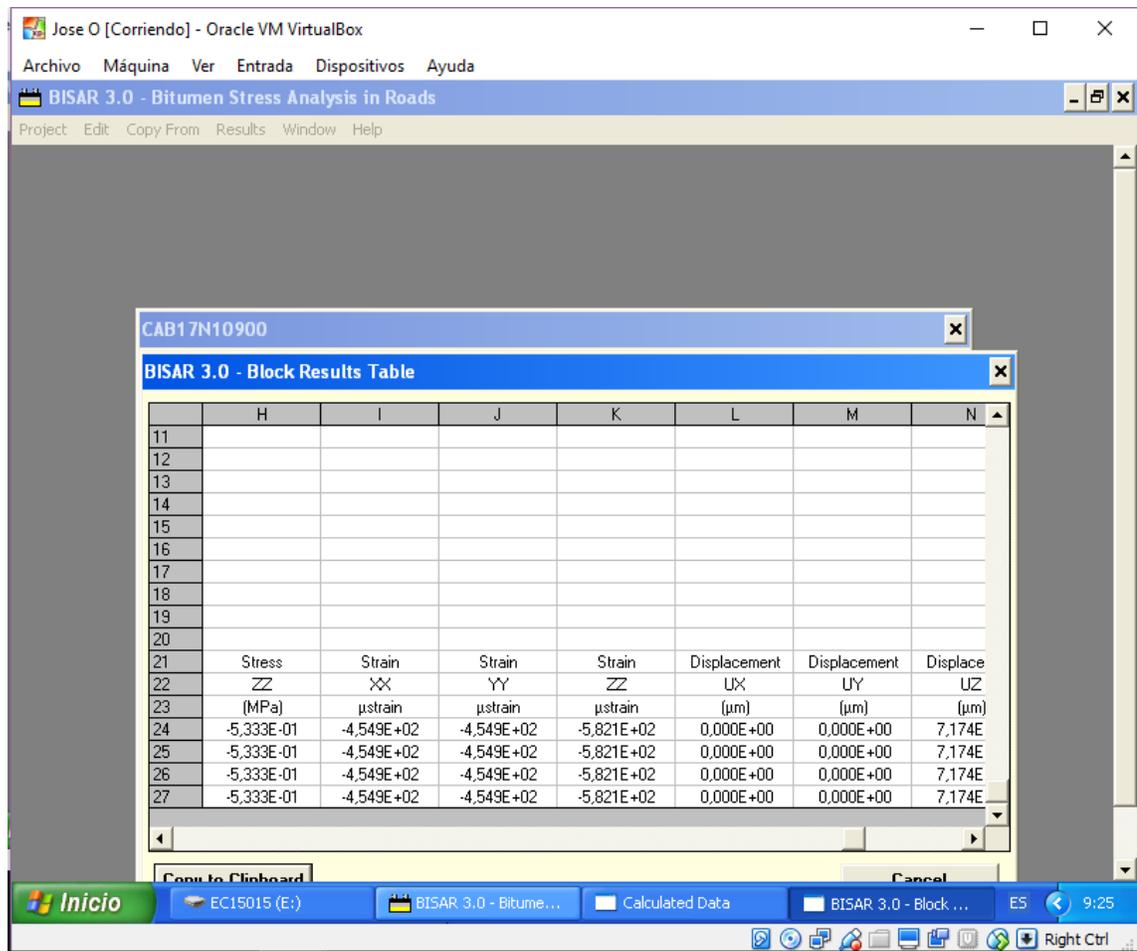


**Respuestas obtenidas por
el Software**

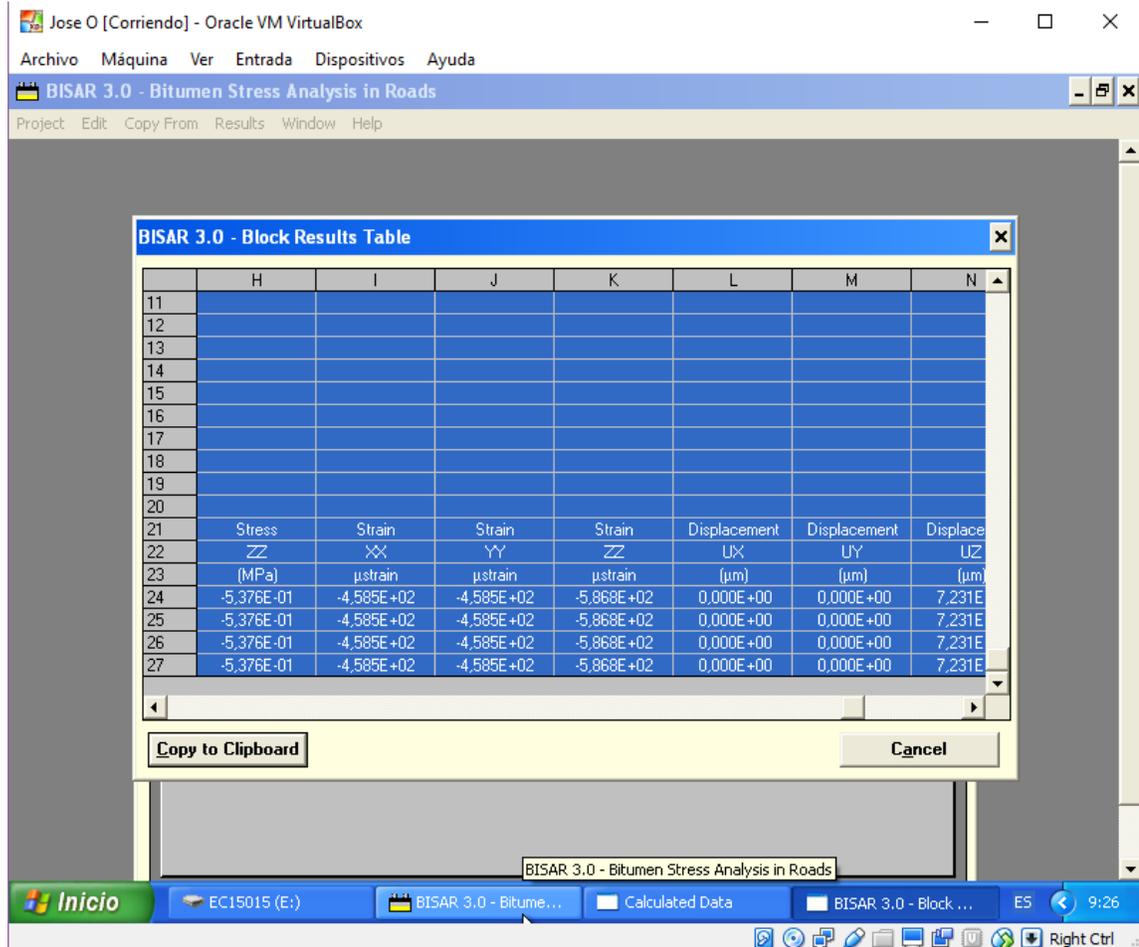
BISAR 3.0

**PROYECTO CAB17N
TRAMO DE TEJUTEPEQUE A JUTIAPA**

- **Respuestas obtenidas por el Programa BISAR 3.0**
 - **Tramo con identificación 10900**



- **Tramo con identificación 10901**

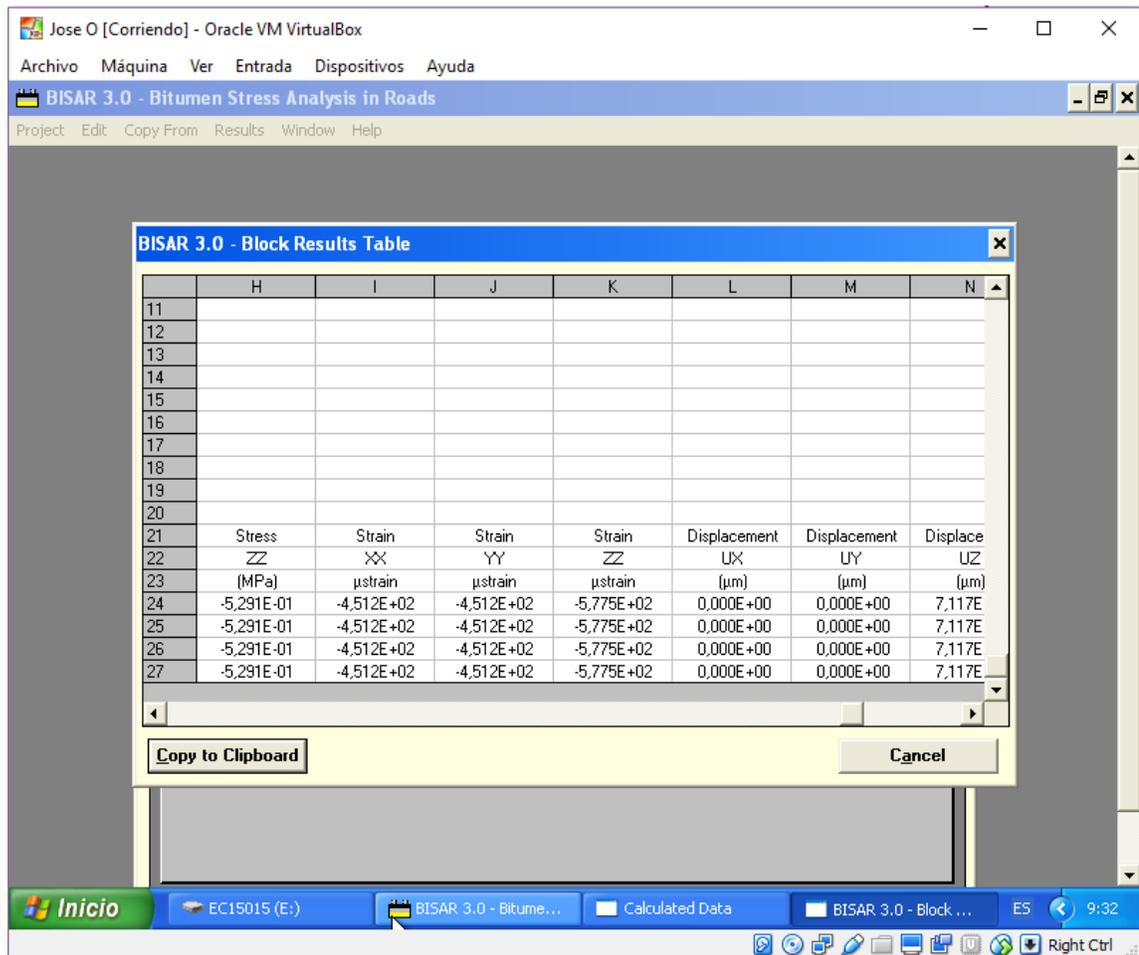


- **Tramo con identificación 10907**

The screenshot shows the BISAR 3.0 software interface. A window titled 'BISAR 3.0 - Block Results Table' is open, displaying a table of results for the project 'CAB17N10907'. The table has 8 columns (G, H, I, J, K, L, M) and 18 rows (9-26). The data is as follows:

	G	H	I	J	K	L	M
9	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(m)	(m)	(m)
10	3,790E+01	5,362E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,500E-01	0,000E+00	0,000E
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displace
22	YY	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY
23	(MPa)	(MPa)	μstrain	μstrain	μstrain	(μm)	(μm)
24	-5,068E-01	-5,362E-01	-4,573E+02	-4,573E+02	-5,852E+02	0,000E+00	0,000E
25	-5,068E-01	-5,362E-01	-4,573E+02	-4,573E+02	-5,852E+02	0,000E+00	0,000E
26	-5,068E-01	-5,362E-01	-4,573E+02	-4,573E+02	-5,852E+02	0,000E+00	0,000E

- **Tramo con identificación 10914**



**Respuestas obtenidas por
el Software**

3D MOVE

**PROYECTO LIB16S
TRAMO DE INT. LIB22S A TAMANIQUE**

- **Respuestas obtenidas por el Programa 3D MOVE**
 - **Tramo con identificación 5956**

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.49025E+03	0.49294E+03	0.53013E+03

- **Tramo con identificación 5958**

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.49419E+03	0.49690E+03	0.53439E+03

- **Tramo con identificación 5959**

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "ID 5959-LIB16S.xls - Excel". The active sheet is "Normal Strain". The data table is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.49621E+03	0.49893E+03	0.53775E+03

- **Tramo con identificación 5961**

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "ID5961-LIB16S.xlsx - Excel". The active sheet is "Normal Strain". The data table is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.49550E+03	0.49822E+03	0.53582E+03

- **Tramo con identificación 5965**

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'ID5965.xlsx - Excel'. The active sheet is 'Static Output - Normal Strain'. The data is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.49156E+03	0.49425E+03	0.53154E+03

- **Tramo con identificación 5966**

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'ID5966-LIB16S.xlsx - Excel'. The active sheet is 'Static Output - Normal Strain'. The data is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.49550E+03	0.49822E+03	0.53582E+03

- **Tramo con identificación 5967**

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'ID-5967-LIB16S.xlsx - Excel'. The active sheet is 'Normal Strain'. The data is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.49288E+03	0.49558E+03	0.53297E+03

- **Tramo con identificación 5968**

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'ID5968-LIB16S_Output.xls - Excel'. The active sheet is 'Normal Strain'. The data is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.49419E+03	0.49690E+03	0.53439E+03

- **Tramo con identificación 5974**

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'ID5974-LIB16S.xls - Excel'. The active sheet is 'Static Output - Normal Strain'. The data table is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.49156E+03	0.49425E+03	0.53154E+03

- **Tramo con identificación 5977**

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'ID5977-LIB16S.xlsx - Excel'. The active sheet is 'Static Output - Normal Strain'. The data table is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.49945E+03	0.50219E+03	0.54008E+03

- **Tramo con identificación 5981**

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.49682E+03	0.49954E+03	0.53723E+03

Anexo 2

**Respuestas obtenidas por
el Software**

3D MOVE

**PROYECTO CAB17N
TRAMO DE TEJUTEPEQUE A JUTIAPA**

ANEXO 2

- Respuestas obtenidas por el Programa 3D MOVE
 - Tramo con identificación 10900

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "ID10900-CAB17N.xlsx - Excel". The active sheet is "Normal Strain". The data table is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.45226E+03	0.45487E+03	0.58245E+03

- Tramo con identificación 10901

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "ID10901-CAB17N.xlsx - Excel". The active sheet is "Normal Strain". The data table is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.45585E+03	0.45849E+03	0.58708E+03

CARRETERA CAB17N TRAMO: TEJUTEPEQUE - JUTIAPA, CABAÑAS

- **Tramo con identificación 10907**

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "ID10907-CAB17N.xlsx - Excel". The active sheet is "Normal Strain". The data is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.45466E+03	0.45729E+03	0.58554E+03

- **Tramo con identificación 10914**

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "ID10914-CAB17N.xls - Excel". The active sheet is "Normal Strain". The data is as follows:

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	0.15	0.15	0	0.44865E+03	0.45125E+03	0.57780E+03

**Respuestas obtenidas por
el Software**

PITRA PAVE

**PROYECTO LIB16S
TRAMO DE INT. LIB22S A TAMANIQUE**

- **Respuestas obtenidas por el Programa PITRA PAVE**
 - **Tramo con identificación 5956**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	,PITRA PAVE							
2	,version 1.0.0							
3								
4	,Sistema Multicapa							
5	,Numero de Capas:,3							
6	,Numero de Cargas:,1							
7	,Numero de Puntos:,1							
8								
9	,Preferencias							
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal							
11	,Union entre Capas:,Ligadas							
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical							
13	,Puntos:,General							
14								
15	,Capas							
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo							
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asfaltico,Elastica							
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica							
19	3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,,Elastica							
20								
21	,Cargas							
22	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),							
23	1,3.7300e+04,5.2760e+05,0.0000e+00,0.0000e+00							
24								
25	,Puntos							
26	ID,X (m),Y (m),Z (m)							
27	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00							
28								
29	,Resultados							
30	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)							
31	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 6.8986e-04, 4.9219e-04, 4.9219e-04, 5.2948e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.1903e+05, 5.1903e+05, 5.2760e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00							
32								

- Tramo con identificación 5958

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	,PITRA PAVE							
2	,version 1.0.0							
3								
4	,Sistema Multicapa							
5	,Numero de Capas:,3							
6	,Numero de Cargas:,1							
7	,Numero de Puntos:,1							
8								
9	,Preferencias							
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal							
11	,Union entre Capas:,Ligadas							
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical							
13	,Puntos:,General							
14								
15	,Capas							
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo							
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asfaltico,Elastica							
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica							
19	3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,,Elastica							
20								
21	,Cargas							
22	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),							
23	1,3.7600e+04,5.3184e+05,0.0000e+00,0.0000e+00							
24								
25	,Puntos							
26	ID,X (m),Y (m),Z (m)							
27	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00							
28								
29	,Resultados							
30	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)							
31	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 6.9541e-04, 4.9615e-04, 4.9615e-04, 5.3373e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.2320e+05, 5.2320e+05, 5.3184e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00							
32								

- **Tramo con identificación 5959**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	,PITRA PAVE							
2	,version 1.0.0							
3								
4	,Sistema Multicapa							
5	,Numero de Capas:,3							
6	,Numero de Cargas:,1							
7	,Numero de Puntos:,1							
8								
9	,Preferencias							
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal							
11	,Union entre Capas:,Ligadas							
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical							
13	,Puntos:,General							
14								
15	,Capas							
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo							
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asfaltico,Elastica							
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica							
19	3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,Sub rasante,Elastica							
20								
21	,Cargas							
22	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),							
23	1,3.7600e+04,5.3184e+05,0.0000e+00,0.0000e+00							
24								
25	,Puntos							
26	ID,X (m),Y (m),Z (m)							
27	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00							
28								
29	,Resultados							
30	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)							
31	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 6.9541e-04, 4.9615e-04, 4.9615e-04, 5.3373e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.2320e+05, 5.2320e+05, 5.3184e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00							
32								

- **Tramo con identificación 5961**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	,PITRA PAVE							
2	,version 1.0.0							
3								
4	,Sistema Multicapa							
5	,Numero de Capas:,3							
6	,Numero de Cargas:,1							
7	,Numero de Puntos:,1							
8								
9	,Preferencias							
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal							
11	,Union entre Capas:,Ligadas							
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical							
13	,Puntos:,General							
14								
15	,Capas							
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo							
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asfaltico,Elastica							
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica							
19	3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,,Elastica							
20								
21	,Cargas							
22	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),							
23	1,3.7700e+04,5.3326e+05,0.0000e+00,0.0000e+00							
24								
25	,Puntos							
26	ID,X (m),Y (m),Z (m)							
27	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00							
28								
29	,Resultados							
30	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)							
31	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 6.9726e-04, 4.9747e-04, 4.9747e-04, 5.3516e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.2460e+05, 5.2460e+05, 5.3326e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00							
32								

- **Tramo con identificación 5965**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	,PITRA PAVE							
2	,version 1.0.0							
3								
4	,Sistema Multicapa							
5	,Numero de Capas:,3							
6	,Numero de Cargas:,1							
7	,Numero de Puntos:,1							
8								
9	,Preferencias							
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal							
11	,Union entre Capas:,Ligadas							
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical							
13	,Puntos:,General							
14								
15	,Capas							
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo							
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asfaltico,Elastica							
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica							
19	3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,,Elastica							
20								
21	,Cargas							
22	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),							
23	1,3.7400e+04,5.2901e+05,0.0000e+00,0.0000e+00							
24								
25	,Puntos							
26	ID,X (m),Y (m),Z (m)							
27	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00							
28								
29	,Resultados							
30	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)							
31	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 6.9171e-04, 4.9351e-04, 4.9351e-04, 5.3089e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.2042e+05, 5.2042e+05, 5.2901e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00							
32								

- Tramo con identificación 5966

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	,PITRA PAVE							
2	,version 1.0.0							
3								
4	,Sistema Multicapa							
5	,Numero de Capas:,3							
6	,Numero de Cargas:,1							
7	,Numero de Puntos:,1							
8								
9	,Preferencias							
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal							
11	,Union entre Capas:,Ligadas							
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical							
13	,Puntos:,General							
14								
15	,Capas							
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo							
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asfaltico,Elastica							
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica							
19	3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,,Elastica							
20								
21	,Cargas							
22	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),							
23	1,3.7700e+04,5.3326e+05,0.0000e+00,0.0000e+00							
24								
25	,Puntos							
26	ID,X (m),Y (m),Z (m)							
27	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00							
28								
29	,Resultados							
30	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)							
31	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 6.9726e-04, 4.9747e-04, 4.9747e-04, 5.3516e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.2460e+05, 5.2460e+05, 5.3326e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00							
32								

- **Tramo con identificación 5967**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	,PITRA PAVE							
2	,version 1.0.0							
3								
4	,Sistema Multicapa							
5	,Numero de Capas:,3							
6	,Numero de Cargas:,1							
7	,Numero de Puntos:,1							
8								
9	,Preferencias							
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal							
11	,Union entre Capas:,Ligadas							
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical							
13	,Puntos:,General							
14								
15	,Capas							
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo							
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asfaltico,Elastica							
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica							
19	3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,,Elastica							
20								
21	,Cargas							
22	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),							
23	1,3.7500e+04,5.3043e+05,0.0000e+00,0.0000e+00							
24								
25	,Puntos							
26	ID,X (m),Y (m),Z (m)							
27	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00							
28								
29	,Resultados							
30	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)							
31	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 6.9356e-04, 4.9483e-04, 4.9483e-04, 5.3232e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.2182e+05, 5.2182e+05, 5.3043e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00							
32								

- **Tramo con identificación 5968**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	,PITRA PAVE							
2	,version 1.0.0							
3								
4	,Sistema Multicapa							
5	,Numero de Capas:,3							
6	,Numero de Cargas:,1							
7	,Numero de Puntos:,1							
8								
9	,Preferencias							
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal							
11	,Union entre Capas:,Ligadas							
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical							
13	,Puntos:,General							
14								
15	,Capas							
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo							
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asfaltico,Elastica							
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica							
19	3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,,Elastica							
20								
21	,Cargas							
22	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),							
23	1,3.7600e+04,5.3184e+05,0.0000e+00,0.0000e+00							
24								
25	,Puntos							
26	ID,X (m),Y (m),Z (m)							
27	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00							
28								
29	,Resultados							
30	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)							
31	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 6.9541e-04, 4.9615e-04, 4.9615e-04, 5.3373e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.2320e+05, 5.2320e+05, 5.3184e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00							
32								

- **Tramo con identificación 5974**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		,PITRA PAVE						
2		,version 1.0.0						
3								
4		,Sistema Multicapa						
5		,Numero de Capas:,3						
6		,Numero de Cargas:,1						
7		,Numero de Puntos:,1						
8								
9		,Preferencias						
10		,Analisis:,General,Estatico,Lineal						
11		,Union entre Capas:,Ligadas						
12		,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical						
13		,Puntos:,General						
14								
15		,Capas						
16		ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipos						
17		1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asphaltico,Elastica						
18		2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica						
19		3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,,Elastica						
20								
21		,Cargas						
22		ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),						
23		1,3.7400e+04,5.2901e+05,0.0000e+00,0.0000e+00						
24								
25		,Puntos						
26		ID,X (m),Y (m),Z (m)						
27		1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00						
28								
29		,Resultados						
30		ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)						
31		1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 6.9171e-04, 4.9351e-04, 4.9351e-04, 5.3089e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.2042e+05, 5.2042e+05, 5.2901e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00						
32								

- **Tramo con identificación 5977**

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	,PITRA PAVE							
2	,version 1.0.0							
3								
4	,Sistema Multicapa							
5	,Numero de Capas:,3							
6	,Numero de Cargas:,1							
7	,Numero de Puntos:,1							
8								
9	,Preferencias							
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal							
11	,Union entre Capas:,Ligadas							
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical							
13	,Puntos:,General							
14								
15	,Capas							
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo							
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asfaltico,Elastica							
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica							
19	3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,,Elastica							
20								
21	,Cargas							
22	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),							
23	1,3.8000e+04,5.3750e+05,0.0000e+00,0.0000e+00							
24								
25	,Puntos							
26	ID,X (m),Y (m),Z (m)							
27	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00							
28								
29	,Resultados							
30	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)							
31	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 7.0281e-04, 5.0143e-04, 5.0143e-04, 5.3941e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.2877e+05, 5.2877e+05, 5.3750e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00							
32								

- **Tramo con identificación 5981**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	,PITRA PAVE							
2	,version 1.0.0							
3								
4	,Sistema Multicapa							
5	,Numero de Capas:,3							
6	,Numero de Cargas:,1							
7	,Numero de Puntos:,1							
8								
9	,Preferencias							
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal							
11	,Union entre Capas:,Ligadas							
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical							
13	,Puntos:,General							
14								
15	,Capas							
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo							
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.0000e-02,Concreto Asfaltico,Elastica							
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.0000e-01,Base Granular,Elastica							
19	3,1.1983e+08,4.0000e-01,1.2340e+03,,Elastica							
20								
21	,Cargas							
22	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),							
23	1,3.7800e+04,5.3467e+05,0.0000e+00,0.0000e+00							
24								
25	,Puntos							
26	ID,X (m),Y (m),Z (m)							
27	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00							
28								
29	,Resultados							
30	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)							
31	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 6.9911e-04, 4.9879e-04, 4.9879e-04, 5.3657e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.2599e+05, 5.2599e+05, 5.3467e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00							
32								

**Respuestas obtenidas por
el Software**

PITRA PAVE

**PROYECTO CAB17N
TRAMO DE TEJUTEPEQUE A JUTIAPA**

- **Respuestas obtenidas por el Programa PITRA PAVE**
 - **Tramo con identificación 10900**

ID	dx (m)	dy (m)	dz (m)	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)	Sxx (Pa)	Syy (Pa)	Szz (Pa)	Sxy (Pa)	Sxz (Pa)	Syz (Pa)
1	0.0000e+00	0.0000e+00	7.1726e-04	4.5453e-04	4.5453e-04	5.8140e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	5.0410e+05	5.0410e+05	5.3326e+05	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

- **Tramo con identificación 10901**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	,PITRA PAVE								
2	,version 1.0.0								
3									
4	,Sistema Multicapa								
5	,Numero de Capas:,4								
6	,Numero de Cargas:,1								
7	,Numero de Puntos:,1								
8									
9	,Preferencias								
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal								
11	,Union entre Capas:,Ligadas								
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical								
13	,Puntos:,General								
14									
15	,Capas								
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo								
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.2500e-02,Concreto Asfáltico,Elastica								
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.5000e-01,Base Granular,Elastica								
19	3,1.3823e+08,4.0000e-01,4.0000e-01,Sub-base Granular,Elastica								
20	4,7.6897e+07,4.0000e-01,1.2340e+03,Subrasante,Elastica								
21									
22	,Cargas								
23	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),								
24	1,3.7700e+04,5.3326e+05,0.0000e+00,0.0000e+00								
25									
26	,Puntos								
27	ID,X (m),Y (m),Z (m)								
28	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00								
29									
30	,Resultados								
31	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)								
32	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 7.1726e-04, 4.5453e-04, 4.5453e-04, 5.8140e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.0410e+05, 5.0410e+05, 5.3326e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00								
33									
34									

- **Tramo con identificación 10907**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									

ANEXO 2

- Tramo con identificación 10914

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	,PITRA PAVE								
2	,version 1.0.0								
3									
4	,Sistema Multicapa								
5	,Numero de Capas:,4								
6	,Numero de Cargas:,1								
7	,Numero de Puntos:,1								
8									
9	,Preferencias								
10	,Analisis:,General,Estatico,Lineal								
11	,Union entre Capas:,Ligadas								
12	,Cargas:,General,Circular,Uniforme,Vertical								
13	,Puntos:,General								
14									
15	,Capas								
16	ID,Modulo E (Pa),Poisson v (1),Espesor (m),Descripcion,Tipo								
17	1,3.1026e+08,3.5000e-01,5.2500e-02,Concreto Asfáltico,Elastica								
18	2,2.9099e+08,4.0000e-01,2.5000e-01,Base Granular,Elastica								
19	3,1.3823e+08,4.0000e-01,4.0000e-01,Sub-base Granular,Elastica								
20	4,7.6897e+07,4.0000e-01,1.2340e+03,Subrasante,Elastica								
21									
22	,Cargas								
23	ID,Carga (N),Presion (Pa),X (m),Y (m),								
24	1,3.7400e+04,5.3609e+05,0.0000e+00,0.0000e+00								
25									
26	,Puntos								
27	ID,X (m),Y (m),Z (m)								
28	1,0.0000e+00,0.0000e+00,0.0000e+00								
29									
30	,Resultados								
31	ID,dx (m),dy (m),dz (m),Exx (1) ,Eyy (1) ,Ezz (1) ,Exy (1) ,Exz (1) ,Eyz (1) ,Sxx (Pa),Syy (Pa),Szz (Pa),Sxy (Pa),Sxz (Pa),Syz (Pa)								
32	1, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 7.1477e-04, 4.5594e-04, 4.5594e-04, 5.8557e-04, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 5.0630e+05, 5.0630e+05, 5.3609e+05, 0.0000e+00, 0.0000e+00, 0.0000e+00								
33									
34									

CARRETERA CAB17N TRAMO: TEJUTEPEQUE - JUTIAPA, CABAÑAS

**Respuestas obtenidas por
el Software**

WinDEPAV

**PROYECTO LIB16S
TRAMO DE INT. LIB22S A TAMANIQUE**

- **Respuestas obtenidas por el Programa WinDEPAV**
 - **Tramo con identificación 5956**

Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (kgf/cm ²)	Relación de Poisson	Condición de
1	5	3.16E+03	0.35	Continua
2	20	2.97E+03	0.4	Continua
3	30	1.22E+03	0.4	Continua
4	Semi infinita	7.84E+02	0.4	

Capa	Profundidad (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrai)	Épsilon Z (microstrai)
1	0	5.43E+00 B	2.69E+00 A	520 B	499 B
	5	2.58E+00 B	5.17E+00 B	-43 B	1070 B
2	5	3.23E+00 B	5.17E+00 B	-43 B	870 B
	25	-1.36E+00 B	1.49E+00 B	-475 B	866 B
3	25	2.15E-02 B	1.49E+00 B	-475 B	1200 B
	55	-1.61E-01 B	3.96E-01 B	-209 B	429 B
4	55	-8.73E-03 B	3.96E-01 B	-209 B	514 B

Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)	78.59
Radio de curvatura (m)	84.22
Deflexión x Radio (m x mm/100)	6618.8

- **Tramo con identificación 5958**

5958 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

C40

1	WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74					
2	Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca					
3	DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (http://www.dosbox.com/)					
4	Programado por: Ing. Luis Ricardo Vázquez Varela - M.Sc.					
5						
6	Archivo:					
7	Descripción del problema: Casos de Jose Echeverria					
8						
9	Radio de las ruedas (cm):			15		
10	Distancia entre los centros de las ruedas (cm):			0		
11	Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm ²):			2.703		
12						
13	Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (kgf/cm ²)	Relación de Poisson de		
14	1	5	3.16E+03	0.35 Continua		
15	2	20	2.97E+03	0.4 Continua		
16	3	30	1.22E+03	0.4 Continua		
17	4	Semi infinita	7.84E+02	0.4		
18						
19	Posición del valor máximo para una carga					
20	A Bajo una rueda simple					
21	B Bajo una de las ruedas de la carga					
22	C Al centro de la carga					
23						
24	Capa	Profundidad d (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrai)	Épsilon Z (microstrai)
25	1	0	5.47E+00 B	2.71E+00 A	525 B	503 B
26		5	2.60E+00 B	5.21E+00 B	-43.3 B	1070 B
27	2	5	3.26E+00 B	5.21E+00 B	-43.3 B	877 B
28		25	-1.37E+00 B	1.50E+00 B	-478 B	873 B
29	3	25	2.17E-02 B	1.50E+00 B	-478 B	1210 B
30		55	-1.63E-01 B	3.99E-01 B	-210 B	433 B
31	4	55	-8.80E-03 B	3.99E-01 B	-210 B	518 B
32						
33	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)				79.2	
34	Radio de curvatura (m)				83.57	
35	Deflexión x Radio (m x mm/100)				6618.8	
36						

Caso 01 - carga 02 y 03 y 08

Listo

- **Tramo con identificación 5959**

5959 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

C40

1	WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74																		
2	Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca																		
3	DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (https://www.dosbox.com/)																		
4	Programado por: Ing. Luis Ricardo Vásquez Varela - M.Sc.																		
5																			
6	Archivo:																		
7	Descripción del problema: Casos de Jose Echeverria																		
8	Radio de las ruedas (cm):				15														
9	Distancia entre los centros de las ruedas (cm):				0														
10	Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm ²):				2.709														
11																			
12																			
13	Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (kgf/cm ²)	Relación de Poisson de	Condición de														
14	1	5	3.16E+03	0.35	Continua														
15	2	20	2.97E+03	0.4	Continua														
16	3	30	1.22E+03	0.4	Continua														
17	4	Semi infinita	7.84E+02	0.4															
18																			
19	Posición del valor máximo para una carga																		
20	A Bajo una rueda simple																		
21	B Bajo una de las ruedas de la carga																		
22	C Al centro de la carga																		
23																			
24	Capa	Profundidad d (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrai)	Épsilon Z (microstrai)													
25	1	0	5.47E+00 B	2.71E+00 A	525 B	503 B													
26		5	2.60E+00 B	5.21E+00 B	-43.3 B	1070 B													
27	2	5	3.26E+00 B	5.21E+00 B	-43.3 B	877 B													
28		25	-1.37E+00 B	1.50E+00 B	-478 B	873 B													
29	3	25	2.17E-02 B	1.50E+00 B	-478 B	1210 B													
30		55	-1.63E-01 B	3.99E-01 B	-210 B	433 B													
31	4	55	-8.80E-03 B	3.99E-01 B	-210 B	518 B													
32																			
33	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)				79.2														
34	Radio de curvatura (m)				83.57														
35	Deflexión x Radio (m x mm/100)				6618.8														
36																			

Caso 01 - carga 02 y 03 y 08

Listo 70%

- **Tramo con identificación 5961**

5961 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

J38

1 WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74
 2 Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca
 3 DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (<https://www.dosbox.com/>)
 4 Programado por: Ing. Luis Ricardo Vázquez Varela - M.Sc.
 5
 6 Archivo:
 7 Descripción del problema: Casos de Jose Echeverria
 8
 9 Radio de las ruedas (cm): 15
 10 Distancia entre los centros de las ruedas (cm): 0
 11 Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm²): 2.716
 12
 13 Capa No. Espesor (cm) Módulo E (kgf/cm²) Relación de Poisson Condición de
 14 1 5 3.16E+03 0.35 Continua
 15 2 20 2.97E+03 0.4 Continua
 16 3 30 1.22E+03 0.4 Continua
 17 4 Semi infinita 7.84E+02 0.4
 18
 19 Posición del valor máximo para una carga
 20 A Bajo una rueda simple
 21 B Bajo una de las ruedas de la carga
 22 C Al centro de la carga
 23
 24 Capa Profundidad (cm) Sigma T (kgf/cm²) Sigma Z (kgf/cm²) Épsilon T (microstrain) Épsilon Z (microstrain)
 25 1 0 5.43E+00 B 2.71E+00 A 526 B 504 B
 26 5 2.60E+00 B 5.22E+00 B -43.4 B 1080 B
 27 2 5 3.27E+00 B 5.22E+00 B -43.4 B 880 B
 28 25 -1.38E+00 B 1.50E+00 B -480 B 875 B
 29 3 25 2.17E-02 B 1.50E+00 B -480 B 1210 B
 30 55 -1.63E-01 B 4.00E-01 B -211 B 434 B
 31 4 55 -8.82E-03 B 4.00E-01 B -211 B 519 B
 32
 33 Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm) 79.4
 34 Radio de curvatura (m) 83.35
 35 Deflexión x Radio (m x mm/100) 6618.8
 36
 37

5961 5966

Listo

70 %

- **Tramo con identificación 5965**

5965 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

N27

1	WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74												
2	Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca												
3	DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (https://www.dosbox.com/)												
4	Programado por: Ing. Luis Ricardo Vásquez Varela - M.Sc.												
5													
6	Archivo:												
7	Descripción del problema: Casos de Jose Echeverria												
8													
9	Radio de las ruedas (cm):											15	
10	Distancia entre los centros de las ruedas (cm):											0	
11	Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm ²):											2.695	
12													
13	Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (k. Relación de	Condición de interfase									
14	1	5	3.18E+03	0.35	Continua								
15	2	20	2.97E+03	0.4	Continua								
16	3	30	1.22E+03	0.4	Continua								
17	4	Semi infinita	7.84E+02	0.4									
18													
19	Posición del valor máximo para una carga												
20	A. Bajo una rueda simple												
21	B. Bajo una de las ruedas de la carga												
22	C. Al centro de la carga												
23													
24	Capa	Profundidad	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	Épsilon Z (microstrain)							
25	1	0	5.44E+00 B	2.69E+00 A	522 B	500 B							
26		5	2.58E+00 B	5.18E+00 B	-43.1 B	1070 B							
27	2	5	3.24E+00 B	5.18E+00 B	-43.1 B	873 B							
28		25	-1.36E+00 B	1.43E+00 B	-476 B	868 B							
29	3	25	2.16E-02 B	1.43E+00 B	-476 B	1200 B							
30		55	-1.62E-01 B	3.97E-01 B	-209 B	430 B							
31	4	55	-8.76E-03 B	3.97E-01 B	-209 B	515 B							
32													
33	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100)											78.79	
34	Radio de curvatura (m)											84	
35	Deflexión x Radio (m x mm/100)											6618.8	
36													
37													
38													
39													
40													

5965 5974

Listo

- **Tramo con identificación 5966**

5966 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

L24

1	WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74												
2	Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca												
3	DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (https://www.dosbox.com/)												
4	Programado por: Ing. Luis Ricardo Vázquez Varela - M.Sc.												
5													
6	Archivo:												
7	Descripción del problema: Casos de Jose Echeverria												
8													
9	Radio de las ruedas (cm):											15	
10	Distancia entre los centros de las ruedas (cm):											0	
11	Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm ²):											2.716	
12													
13	Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (kgf/cm ²)	Relación de Poisson	Condición de								
14	1	5	3.16E+03	0.35	Continua								
15	2	20	2.97E+03	0.4	Continua								
16	3	30	1.22E+03	0.4	Continua								
17	4	Semi infinita	7.84E+02	0.4									
18													
19	Posición del valor máximo para una carga												
20	A Bajo una rueda simple												
21	B Bajo una de las ruedas de la carga												
22	C Al centro de la carga												
23													
24	Capa	Profundidad d (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrai)	Épsilon Z (microstrai)							
25	1	0	5.43E+00 B	2.71E+00 A	526 B	504 B							
26		5	2.60E+00 B	5.22E+00 B	-43.4 B	1080 B							
27	2	5	3.27E+00 B	5.22E+00 B	-43.4 B	880 B							
28		25	-1.38E+00 B	1.50E+00 B	-480 B	875 B							
29	3	25	2.17E-02 B	1.50E+00 B	-480 B	1210 B							
30		55	-1.63E-01 B	4.00E-01 B	-211 B	434 B							
31	4	55	-8.82E-03 B	4.00E-01 B	-211 B	519 B							
32													
33	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)											79.4	
34	Radio de curvatura (m)											83.35	
35	Deflexión x Radio (m x mm/100)											6618.8	
36													

5961 5966

Listo

70%

- **Tramo con identificación 5967**

5967 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

D37

1	WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74					
2	Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca					
3	DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (https://www.dosbox.com/)					
4	Programado por: Ing. Luis Ricardo Vázquez Varela - M.Sc.					
5						
6	Archivo:					
7	Descripción del problema: Casos de Jose Echeverria					
8						
9	Radio de las ruedas (cm):				15	
10	Distancia entre los centros de las ruedas (cm):				0	
11	Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm ²):				2.702	
12						
13	Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (kgf/cm ²)	Relación de Poisson	Condición de	
14	1	5	3.16E+03	0.35	Continua	
15	2	20	2.97E+03	0.4	Continua	
16	3	30	1.22E+03	0.4	Continua	
17	4	Semi infinita	7.84E+02	0.4		
18						
19	Posición del valor máximo para una carga					
20	A Bajo una rueda simple					
21	B Bajo una de las ruedas de la carga					
22	C Al centro de la carga					
23						
24	Capa	Profundidad (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	Épsilon Z (microstrain)
25	1	0	5.46E+00 B	2.70E+00 A	523 B	502 B
26		5	2.59E+00 B	5.20E+00 B	-43.2 B	1070 B
27	2	5	3.25E+00 B	5.20E+00 B	-43.2 B	875 B
28		25	-1.37E+00 B	1.49E+00 B	-477 B	871 B
29	3	25	2.16E-02 B	1.49E+00 B	-477 B	1210 B
30		55	-1.62E-01 B	3.98E-01 B	-210 B	431 B
31	4	55	-8.78E-03 B	3.98E-01 B	-210 B	516 B
32						
33	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)				79	
34	Radio de curvatura (m)				83.79	
35	Deflexión x Radio (m x mm/100)				6618.8	

5967

Listo

- **Tramo con identificación 5968**

Capa No.	Esesor (cm)	Módulo E (kg/cm ²)	Relación de Poisson	Condición de interfase
1	5	3.16E+03	0.35	Continua
2	20	2.97E+03	0.4	Continua
3	30	1.22E+03	0.4	Continua
4	Semiinfinita	7.84E+02	0.4	

Capa	Profundidad (mm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	Épsilon Z (microstrain)
1	0	5.47E+00 B	2.71E+00 A	525 B	503 B
	5	2.60E+00 B	5.21E+00 B	-43.3 B	1070 B
2	5	3.26E+00 B	5.21E+00 B	-43.3 B	877 B
	25	-1.37E+00 B	1.50E+00 B	-478 B	873 B
3	25	2.17E-02 B	1.50E+00 B	-478 B	1210 B
	55	-1.63E-01 B	3.99E-01 B	-210 B	433 B
4	55	-8.80E-03 B	3.99E-01 B	-210 B	518 B

33	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)	79.2
34	Radio de curvatura (m)	83.57
35	Deflexión x Radio (m x mm/100)	6618.8

- **Tramo con identificación 5974**

5974 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

N34

1	WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74													
2	Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca													
3	DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (https://www.dosbox.com/)													
4	Programado por: Ing. Luis Ricardo Vázquez Varela - M.Sc.													
5														
6	Archivo:													
7	Descripción del problema: Casos de Jose Echeverría													
8														
9	Radio de las ruedas (cm): 15													
10	Distancia entre los centros de las ruedas (cm): 0													
11	Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm²): 2.635													
12														
13	Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (kgf/cm²)	Relación de Poisson	Condición de interfase									
14	1	5	3.16E+03	0.35	Continua									
15	2	20	2.97E+03	0.4	Continua									
16	3	30	1.22E+03	0.4	Continua									
17	4	Semi infinita	7.84E+02	0.4										
18														
19	Posición del valor máximo para una carga													
20	A Bajo una rueda simple													
21	B Bajo una de las ruedas de la carga													
22	C Al centro de la carga													
23														
24	Capa	Profundidad (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Epsilon T (microstrai)	Epsilon Z (microstrai)								
25	1	0	5.44E+00 B	2.69E+00 A	522 B	500 B								
26		5	2.58E+00 B	5.18E+00 B	-43.1 B	1070 B								
27	2	5	3.24E+00 B	5.18E+00 B	-43.1 B	873 B								
28		25	-1.36E+00 B	1.49E+00 B	-476 B	868 B								
29	3	25	2.16E-02 B	1.49E+00 B	-476 B	1200 B								
30		55	-1.62E-01 B	3.97E-01 B	-209 B	430 B								
31	4	55	-8.76E-03 B	3.97E-01 B	-209 B	515 B								
32														
33	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100): 76.79													
34	Radio de curvatura (m): 84													
35	Deflexión x Radio (m x mm/100): 6618.8													
36														
37														

5965 5974

Listo 70 %

- **Tramo con identificación 5977**

5977 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

L33

1	WINDEPAV 2.6 con DOSBox: 0.74																		
2	Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca																		
3	DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox: 0.74 (https://www.dosbox.com/)																		
4	Programado por: Ing. Luis Ricardo Vázquez Varela - M.Sc.																		
5	Archivo:																		
6	Descripción del problema:																		
7	Casos de Jose Echeverria																		
8	Radio de las ruedas (cm):																		
9																			
10	Distancia entre los centros de las ruedas (cm):																		
11																			
12	Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm ²):																		
13																			
14	Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (kgf/cm ²)	Relación de Poisson	Condición de interfase														
15	1	5	3.16E+03	0.35	Continua														
16	2	20	2.97E+03	0.4	Continua														
17	3	30	1.22E+03	0.4	Continua														
18	4	Semi infinita	7.84E+02	0.4															
19	Posición del valor máximo para una carga																		
20	A Bajo una rueda simple																		
21	B Bajo una de las ruedas de la carga																		
22	C Al centro de la carga																		
23																			
24	Capa	Profundidad (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	Épsilon Z (microstrain)													
25	1	0	5.53E+00 B	2.73E+00 A	530 B	508 B													
26		5	2.62E+00 B	5.26E+00 B	-43.8 B	1060 B													
27	2	5	3.29E+00 B	5.26E+00 B	-43.8 B	886 B													
28		25	-1.39E+00 B	1.51E+00 B	-483 B	882 B													
29	3	25	2.19E-02 B	1.51E+00 B	-483 B	1220 B													
30		55	-1.64E-01 B	4.03E-01 B	-212 B	437 B													
31	4	55	-8.89E-03 B	4.03E-01 B	-212 B	523 B													
32																			
33	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)																		
34	Radio de curvatura (m)																		
35	Deflexión x Radio (m x mm/100)																		

5977

Listo

- **Tramo con identificación 5981**

5981 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

D40

1	WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74																		
2	Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca																		
3	DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (https://www.dosbox.com/)																		
4	Programado por: Ing. Luis Ricardo Vázquez Varela - M.Sc.																		
5	Archivo:																		
6	Descripción del problema:				Casos de Jose Echeverria														
7	Radio de las ruedas (cm):				15														
8	Distancia entre los centros de las ruedas (cm):				0														
9	Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm²):				2.723														
10	Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (kgf/cm²)	Relación de Poisson	Condición de interfase														
11	1	5	3.16E+03	0.35	Continua														
12	2	20	2.37E+03	0.4	Continua														
13	3	30	1.22E+03	0.4	Continua														
14	4	Semiinfinita	7.84E+02	0.4															
15	Posición del valor máximo para una carga																		
16	A Bajo una rueda simple																		
17	B Bajo una de las ruedas de la carga																		
18	C Al centro de la carga																		
19	Capa	Profundidad (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Épsilon T (microstrain)	Épsilon Z (microstrain)													
20	1	0	5.50E+00 B	2.72E+00 A	527 B	506 B													
21		5	2.61E+00 B	5.24E+00 B	-43.5 B	1080 B													
22	2	5	3.27E+00 B	5.24E+00 B	-43.5 B	882 B													
23		25	-1.38E+00 B	1.50E+00 B	-481 B	877 B													
24	3	25	2.18E-02 B	1.50E+00 B	-481 B	1210 B													
25		55	-1.64E-01 B	4.01E-01 B	-211 B	435 B													
26	4	55	-8.84E-03 B	4.01E-01 B	-211 B	520 B													
27	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100)				79.61														
28	Radio de curvatura (m)				83.14														
29	Deflexión x Radio (m x mm/100)				6618.8														

5981

Listo 70%

**Respuestas obtenidas por
el Software**

WinDEPAV

**PROYECTO CAB17N
TRAMO DE TEJUTEPEQUE A JUTIAPA**

- **Respuestas obtenidas por el Programa WinDEPAV**
 - **Tramo con identificación 10900**

10900 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

J8

1 WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74
 2 Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca
 3 DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (<https://www.dosbox.com/>)
 4 Programado por: Ing. Luis Ricardo Vásquez Varela - M.Sc.
 5
 6 Archivo:
 7 Descripción del problema: Casos de Jose Echeverria
 8
 9 Radio de las ruedas (cm) 15
 10 Distancia entre los centros de las ruedas (cm) 0
 11 Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm²): 2.716
 12
 13
 14 Capa No. Espesor (cm) Módulo E (kgf/cm²) Relación de Poisson Condición de interfase
 15 1 5.2 3.16E-03 0.35 Continua
 16 2 25 2.97E-03 0.4 Continua
 17 3 40 1.41E-03 0.4 Continua
 18 4 Semi infinit 7.84E-02 0.4
 19
 20 Posición del valor máximo para una carga
 21 A. Bajo una rueda simple
 22 B. Bajo una de las ruedas de la carga
 23 C. Al centro de la carga
 24
 25 Capa Profundidad (cm) Sigma T (kgf/cm²) Sigma Z (kgf/cm²) Épsilon T (microstrain) Épsilon Z (microstrain)
 26 1 0 5.13E-00 B 2.71E-00 A 454 B 582 B
 27 5.2 2.36E-00 B 5.23E-00 B -95.7 B 1130 B
 28 2 5.2 3.02E-00 B 5.23E-00 B -95.7 B 951 B
 29 30.2 -8.89E-01 B 1.19E-00 B -339 B 640 B
 30 30.2 -4.14E-03 B 1.19E-00 B -339 B 646 B
 31 70.2 -1.48E-01 B 2.49E-01 B -133 B 259 B
 32 70.2 -7.82E-03 B 2.49E-01 B -133 B 325 B
 33 Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (f/100 mm) 71.66
 34 Radio de curvatura (m) 81.32
 35 Deflexión x Radio (m x mm/100) 6543.6
 36

10900

Listo 60 %

- **Tramo con identificación 10901**

10901 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

L25

1	WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74																							
2	Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca																							
3	DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (https://www.dosbox.com/)																							
4	Programado por: Ing. Luis Ricardo Vásquez Varela - M.Sc.																							
5	Archivo:																							
6	Descripción del problema:																							
7	Casos de Jose Echeverria																							
8																								
9	Radio de las ruedas (cm):																							
10	Distancia entre los centros de las ruedas (cm):																							
11	Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm ²):																							
12																								
13	Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (kgf/cm ²)	Relación de Poisson	Condición de interfase																			
14	1	5.2	3.16E+03	0.35	Continua																			
15	2	25	2.97E+03	0.4	Continua																			
16	3	40	1.41E+03	0.4	Continua																			
17	4	Semi infinita	7.84E+02	0.4																				
18																								
19	Posición del valor máximo para una carga																							
20	A. Bajo una rueda simple																							
21	B. Bajo una de las ruedas de la carga																							
22	C. Al centro de la carga																							
23																								
24	Capa	Profundidad (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	Épsilon Z (microstrain)																		
25	1	0	5.17E+00 B	2.73E+00 A	457 B	586 B																		
26		5.2	2.38E+00 B	5.27E+00 B	-96.4 B	1140 B																		
27	2	5.2	3.04E+00 B	5.27E+00 B	-96.4 B	958 B																		
28		30.2	-8.92E-01 B	1.20E+00 B	-342 B	645 B																		
29	3	30.2	-4.17E-03 B	1.20E+00 B	-342 B	853 B																		
30		70.2	-1.48E-01 B	2.51E-01 B	-134 B	261 B																		
31	4	70.2	-7.88E-03 B	2.51E-01 B	-134 B	328 B																		
32																								
33	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)																							
34	Radio de curvatura (m)																							
35	Deflexión x Radio (m x mm/100)																							
36																								

10901

Listo

- **Tramo con identificación 10907**

10907 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

Q33

1	VINDEPAV 2.0 con DOSBox 0.74																										
2	Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca																										
3	DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (https://www.dosbox.com/)																										
4	Programado por: Ing. Luis Ricardo Vásquez Varela - M.Sc.																										
5																											
6	Archivo:																										
7	Descripción del problema: Casos de Jose Echeverria																										
8																											
9	Radio de las ruedas (cm): 15																										
10	Distancia entre los centros de las ruedas (cm): 0																										
11	Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm²): 2.73																										
12																											
13	Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (kgf/cm²)	Relación de Poisson	Condición de interfase																						
14	1	5.2	3.16E+03	0.35	Continua																						
15	2	25	2.97E+03	0.4	Continua																						
16	3	40	1.4E+03	0.4	Continua																						
17	4	Semi infinit.	7.84E+02	0.4																							
18																											
19	Posición del valor máximo para una carga																										
20	A. Bajo una rueda simple																										
21	B. Bajo una de las ruedas de la carga																										
22	C. Al centro de la carga																										
23																											
24	Capa	Profundidad (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Épsilon T (microstrain)	Épsilon Z (microstrain)																					
25	1	0	5.16E+00 B	2.73E+00 A	456 B	585 B																					
26		5.2	2.37E+00 B	5.26E+00 B	-86.2 B	1140 B																					
27	2	5.2	3.03E+00 B	5.26E+00 B	-96.2 B	955 B																					
28		30.2	-8.80E-01 B	1.18E+00 B	-341 B	643 B																					
29	3	30.2	-4.16E-03 B	1.18E+00 B	-341 B	851 B																					
30		70.2	-1.47E-01 B	2.50E-01 B	-133 B	261 B																					
31	4	70.2	-7.86E-03 B	2.50E-01 B	-133 B	327 B																					
32																											
33	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm): 72.03																										
34	Radio de curvatura (m): 90.85																										
35	Deflexión x Radio (m x mm/100): 6543.6																										
36																											

10907

Listo

- **Tramo con identificación 10914**

10914 - Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

O33

1	WINDEPAV 2.6 con DOSBox 0.74																							
2	Interfase para Windows del programa DEPAVF desarrollado por la Universidad del Cauca																							
3	DEPAVF funciona en Windows de 64 bits gracias al programa DOSBox 0.74 (https://www.dosbox.com/)																							
4	Programado por: Ing. Luis Ricardo Vásquez Varela - M.Sc.																							
5																								
6	Archivo:																							
7	Descripción del problema:				Casos de Jose Echeverria																			
8																								
9	Radio de las ruedas (cm):				15																			
10	Distancia entre los centros de las ruedas (cm):				0																			
11	Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm ²):				2.695																			
12																								
13	Capa No.	Espesor (cm)	Módulo E (kgf/cm ²)	Relación de Poisson	Condición de interfase																			
14	1	5.2	3.16E+03	0.35	Continua																			
15	2	25	2.97E+03	0.4	Continua																			
16	3	40	1.41E+03	0.4	Continua																			
17	4	Semi infinita	7.84E+02	0.4																				
18																								
19	Posición del valor máximo para una carga																							
20	A Bajo una rueda simple																							
21	B Bajo una de las ruedas de la carga																							
22	C Al centro de la carga																							
23																								
24	Capa	Profundidad (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)				Épsilon Z (microstrain)															
25	1	0	5.09E+00 B	2.63E+00 A	450 B				577 B															
26		5.2	2.34E+00 B	5.19E+00 B	-95 B				1130 B															
27	2	5.2	3.00E+00 B	5.19E+00 B	-95 B				344 B															
28		30.2	-8.79E-01 B	1.18E+00 B	-337 B				635 B															
29	3	30.2	-4.11E-03 B	1.18E+00 B	-337 B				840 B															
30		70.2	-1.45E-01 B	2.47E-01 B	-132 B				257 B															
31	4	70.2	-7.76E-03 B	2.47E-01 B	-132 B				323 B															
32																								
33	Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)				71.1																			
34	Radio de curvatura (m)				32.03																			
35	Deflexión x Radio (m x mm/100)				6543.6																			

10914

Listo