

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Desarrollo de una interfaz orientada al diseño y análisis de desempeño de pavimentos flexibles usando el lenguaje Python

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil


Autores:

Xavier Edward Barrera Bermeo

Anderson Israel Silva Sáenz

Director:

Jaime Asdrúbal Bojorque Iñiguez

ORCID:  0000-0003-2847-9669

Cuenca, Ecuador

2024-02-29

Resumen

El diseño de pavimentos flexibles involucra procesos como: análisis de tráfico, estudio de materiales y suelos, seguido de una metodología de diseño para determinar la estructura y su comportamiento (esfuerzos y deformaciones) bajo cargas y condiciones ambientales. Estos procesos son complejos de realizar manualmente debido al tiempo implicado, el diseñador es más propenso a cometer errores y los programas que existen en la actualidad presentan interfaces complejas de usar y comprender, además de contar con licencias costosas. Este trabajo se enfoca en desarrollar y validar un programa computacional que opera con parámetros representativos de las condiciones del sitio para la construcción vial, con el fin de establecer una alternativa de diseño. El programa denominado PRO-PAVE comprende una interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada en Python que consta de cuatro módulos: “Tráfico”, “Materiales”, “Diseño de pavimentos flexibles (AASHTO)” y “Análisis estructural”.

Adicionalmente, se verifica que el programa proporcione resultados adecuados mediante una simulación con datos de un estudio vial realizado por el Gobierno Provincial de Loja, Ecuador. Se comparan además los resultados del análisis estructural del pavimento diseñado con los obtenidos de una simulación en el programa KENPAVE (Universidad de Kentucky). Después de ejecutar el programa, se comprobó su compatibilidad con los procedimientos de las instituciones públicas en proyectos viales, con resultados que varían hasta un máximo del 5% respecto al estudio vial, según la consideración de parámetros. En base a lo expuesto, el programa se convierte en una herramienta eficaz para el diseño y análisis del desempeño de pavimentos flexibles.

Palabras clave: ingeniería de carreteras, programa de pavimentos, simulación del diseño, respuesta del pavimento



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The design of flexible pavements involves processes such as: traffic analysis, material and soil studies, followed by a design methodology for the structure and its behavior (stresses & deformations) under loads and environmental conditions. These processes are complex to perform manually due to the time involved, the designer's susceptibility to errors, and the currently available programs have complex and costly interfaces that are difficult to use and comprehend. This work focuses on developing and validating a software that operates with parameters representative of site conditions for road construction, in order to establish a design alternative. The program PRO-PAVE comprises a graphical user interface (GUI) developed in Python consisting of four modules: "Traffic", "Materials", "Flexible Pavement Design (AASHTO)" and "Structural Analysis".

Additionally, it is verified that the program provides adequate results through a simulation with data from a road study conducted by the Provincial Government of Loja, Ecuador. Furthermore, the results of the structural analysis of the designed pavement are compared with those obtained from a simulation in the KENPAVE software (University of Kentucky). After running the program, its compatibility with the procedures of Public Institutions in road projects was confirmed, with results varying up to a maximum of 5% compared to the road study, depending on the consideration of parameters. Based on the above, the program becomes an effective tool for the design and distress analysis of flexible pavements.

Keywords: highway engineering, pavement software, design simulation, pavement response



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Capítulos	25
1 Introducción	25
1.1 Antecedentes y justificación	25
1.2 Objetivos	26
1.2.1 Objetivo general	26
1.2.2 Objetivos específicos	26
1.3 Alcance	27
1.4 Organización de capítulos	28
2 Marco Teórico	29
2.1 Conceptos generales de los pavimentos	29
2.1.1 Definición	29
2.1.2 Pavimento flexible	30
2.1.3 Funciones de las capas de un pavimento flexible	31
2.1.3.1 Carpeta Asfáltica	31
2.1.3.2 Base	31
2.1.3.3 Subbase	31
2.1.4 Factores considerados para el diseño del pavimento	32
2.1.4.1 Tráfico	32
2.1.4.2 Subrasante	32
2.1.4.3 Materiales disponibles	32
2.1.4.4 Clima	32
2.2 Tráfico	33
2.2.1 Clasificación vehicular según el MTOP	34
2.2.2 Período de análisis de diseño y período de desempeño	35
2.2.2.1 Período de análisis de diseño	35
2.2.2.2 Período de desempeño	36
2.2.3 Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA)	36
2.2.4 Tasa de crecimiento vehicular	36
2.2.5 Tráfico proyectado	37
2.2.6 Tráfico acumulado en el período de diseño	37
2.2.7 Composición vehicular en el Ecuador	38

2.2.8	Factor de distribución por dirección	38
2.2.9	Factor de distribución por carril	39
2.2.10	Índices de serviciabilidad.....	39
2.2.11	Factor de carga	40
2.2.12	Determinación del ESAL	41
2.2.13	Confiabilidad	41
2.2.14	Desviación estándar	42
2.3	Suelos y Materiales	43
2.3.1	California Bearing Ratio	43
2.3.2	Valor de resistencia R	44
2.3.3	Módulo resiliente	45
2.3.3.1	Definición	45
2.3.3.2	Correlaciones entre el módulo resiliente y otros ensayos	46
2.3.3.3	Análisis de daño relativo y el módulo resiliente efectivo ..	47
2.3.4	Granulometría de los materiales	49
2.3.5	Límites de consistencia	50
2.3.6	Clasificación de los suelos	51
2.3.6.1	SUCS	51
2.3.6.2	AASHTO	52
2.3.7	Combinación de áridos	53
2.3.8	Especificaciones técnicas de las capas del pavimento flexible según la NEVI-12	55
2.3.8.1	Subrasante	55
2.3.8.2	Subbase	55
2.3.8.3	Base.....	56
2.3.9	Cálculo del contenido de asfalto óptimo: Método de Marshall ..	59
2.3.9.1	Parámetros para el diseño de la mezcla asfáltica	60
2.3.9.2	Criterios de diseño Marshall.....	64
2.3.9.3	Relaciones gravimétricas y volumétricas	64
2.4	Diseño de pavimentos flexibles por el método de la AASHTO	66
2.4.1	Parámetros de diseño	66
2.4.1.1	Número estructural SN.....	66

2.4.1.2	Coeficiente estructural o de capa.....	66
2.4.1.3	Coeficiente de drenaje	70
2.4.1.4	Espesores mínimos	71
2.4.2	Proceso de diseño	71
2.4.3	Hinchazón y congelamiento.....	73
2.4.4	Metodología de diseño de sobrecarpetas	75
2.4.4.1	Capacidad estructural y deficiencia estructural	75
2.4.4.2	Inspección visual y ensayos de materiales	77
2.4.4.3	Ensayos no destructivos de deflexión	78
2.4.4.4	Método de vida remanente	78
2.4.4.5	Determinación del módulo efectivo E_p	79
2.4.4.6	Determinación del espesor de la sobrecarpeta	81
2.5	Análisis estructural	81
2.5.1	Análisis lineal	82
2.5.1.1	Esfuerzos y desplazamientos	83
2.5.1.2	Deformaciones	87
2.5.1.3	Superposición de esfuerzos por cargas de neumáticos ..	87
2.5.2	Análisis no-lineal	89
2.5.2.1	Determinación del módulo elástico para materiales de tipo granular	90
2.5.2.2	Determinación del módulo elástico para suelos de grano fino	91
2.5.2.3	Punto de análisis de esfuerzos para la capa no-lineal	93
2.5.3	Análisis viscoelástico	94
2.5.3.1	Series de Dirichlet	95
2.5.3.2	Superposición tiempo-temperatura	95
2.5.3.3	Cargas estáticas	97
2.5.3.4	Cargas dinámicas	97
2.5.4	Análisis de daño	99
2.5.4.1	Agrietamiento por fatiga	99
2.5.4.2	Deformación permanente.....	99

2.5.4.3	Puntos de máxima tracción y compresión en la estructura del pavimento según el tipo de eje	100
2.5.4.4	Deflexión admisible	101
2.5.4.5	Relación de daño	101
3	Metodología	102
3.1	Implementación del programa	103
3.2	Módulo 1: Tráfico	105
3.3	Módulo 2: Materiales	108
3.3.1	Análisis granulométrico	108
3.3.2	Combinación de áridos	109
3.3.3	Diseño de la mezcla asfáltica – Método de Marshall	112
3.3.4	Cálculo del módulo resiliente – Subrasante	114
3.3.4.1	Ventana principal – Módulo resiliente	115
3.3.4.2	Ventana secundaria – Cálculo del CBR	116
3.4	Módulo 3: Diseño del pavimento flexible	116
3.4.1	Diseño de la estructura inicial de pavimento flexible	116
3.4.2	Diseño de sobrecarpetas con mezcla asfáltica	119
3.5	Módulo 4: Análisis estructural del pavimento	123
4	Procedimiento para la ejecución del programa	127
4.1	Módulo 1: Tráfico	128
4.1.1	Ejecución para ingresar datos con la opción AASHTO	128
4.1.2	Ejecución para ingresar datos con ecuaciones de proyección ..	133
4.1.3	Factores de Dirección y Carril	136
4.1.4	Factor Camión	136
4.1.5	Aspectos generales	137
4.2	Módulo 2: Materiales	139
4.2.1	Análisis granulométrico	139
4.2.2	Combinación de áridos	140
4.2.3	Diseño de la mezcla asfáltica - Método de Marshall	142
4.2.4	Cálculo del módulo resiliente	144
4.3	Módulo 3: Diseño de pavimento flexible y sobrecarpetas	147
4.3.1	Diseño de la estructura de pavimento flexible	148

4.3.1.1	Reducción del período de desempeño	155
4.3.2	Diseño de sobrecarpetas para pavimentos flexibles	156
4.3.2.1	Inspección visual y ensayos de materiales	156
4.3.2.2	Método de ensayos no destructivos	158
4.3.2.3	Método de vida remanente	160
4.3.2.4	Determinación de espesor de la sobrecarpeta	161
4.4	Módulo 4: Análisis estructural del pavimento	161
4.4.1	Configuración según el tipo de análisis	163
4.4.2	Entrada de datos	166
4.4.2.1	Tráfico	166
4.4.2.2	Parámetros por capa	168
4.4.2.3	Profundidades	169
4.4.2.4	Propiedades no-lineales de las capas	169
4.4.2.5	Propiedades no-lineales por temporada	170
4.4.2.6	Punto de esfuerzo	171
4.4.3	Gráficos de resultados	172
5	Resultados y discusión	173
5.1	Estudio de tráfico	173
5.1.1	Información de entrada	173
5.1.2	Ejecución del módulo de tráfico	176
5.2	Estudio de los materiales para mejoramiento, subbase y base	179
5.2.1	Información de entrada	180
5.2.2	Ejecución del módulo de materiales - Análisis granulométrico .	182
5.3	Estudio de los materiales para la mezcla asfáltica y determinación del contenido de asfalto óptimo según el método de Marshall	185
5.3.1	Información de entrada	185
5.3.2	Ejecución del módulo de materiales - Combinación de áridos y método de Marshall	188
5.4	Estudio de subrasante	195
5.4.1	Información de entrada	195
5.4.2	Ejecución del módulo de materiales - Módulo resiliente de la subrasante	196

5.5	Diseño de la estructura del pavimento flexible	198
5.5.1	Información de entrada	198
5.5.2	Ejecución del módulo de diseño de pavimento	199
5.6	Diseño aplicando rehabilitación a los 10 años con una sobrecarpeta .	202
5.7	Análisis estructural del pavimento flexible	205
5.8	Observaciones adicionales del programa	211
6	Conclusiones y recomendaciones	213
6.1	Conclusiones	213
6.2	Recomendaciones	215
	Referencias	216
	Anexos	218
A	Conteo vehicular	218
B	Informes impresos en el programa desarrollado	226
C	Análisis de daño de la estructura de pavimento en el programa KENPAVE .	232
D	Análisis estructural lineal, no-lineal y viscoelástico en el programa	234
D.1	Cargas aplicadas	234
D.2	Análisis lineal	236
D.2.1	Parámetros de capa	236
D.2.2	Resultados	236
D.3	Análisis no-lineal	240
D.3.0.1	Parámetros de capa	240
D.3.0.2	Resultados	241
D.4	Análisis combinado: Viscoelástico y no-lineal	248
D.4.0.1	Parámetros de capa	248
D.4.0.2	Resultados	248

Índice de figuras

Figura 2.1	Estructura del pavimento [2]	30
Figura 2.2	Estructura del pavimento flexible	30
Figura 2.3	Tipos de ejes [7].....	33
Figura 2.4	a) Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones [14].....	34
Figura 2.5	b) Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones [14].....	35
Figura 2.6	Integral bajo la curva para calcular el tráfico acumulado	38
Figura 2.7	Determinación del valor CBR aplicando corrección a la curva de esfuerzo vs. deformación [3]	44
Figura 2.8	Deformaciones bajo cargas repetidas [9]	45
Figura 2.9	Carta de correlaciones para estimar el M_R [9]	47
Figura 2.10	Ábaco para estimar el módulo resiliente [9].....	48
Figura 2.11	Curva granulométrica y definición de D_{10} , D_{30} y D_{60} [4].....	49
Figura 2.12	Carta de plasticidad [4]	51
Figura 2.13	Clasificación de suelos según SUCS [4]	52
Figura 2.14	a) Clasificación de suelos según la AASHTO [4].....	52
Figura 2.15	b) Clasificación de suelos según la AASHTO [4].....	53
Figura 2.16	Composición de la mezcla asfáltica. Adaptada de Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix types Manual Series No.2 (MS-2) [10]	65
Figura 2.17	Coeficiente estructural de la capa de rodadura de hormigón asfáltico en función al módulo elástico [1].....	67
Figura 2.18	Coeficiente estructural para bases granulares [1]	68
Figura 2.19	Coeficiente estructural para bases estabilizadas con cemento [1]	68
Figura 2.20	Coeficiente estructural para bases estabilizadas con emulsión asfáltica [1]	69
Figura 2.21	Coeficiente estructural para subbases granulares [1].....	70
Figura 2.22	Cálculo de espesores [9]	72
Figura 2.23	Relación de la máxima pérdida de serviciabilidad debida al congelamiento [1]	74
Figura 2.24	Pérdida de la capacidad estructural en función del tiempo o tráfico [1]	76

Figura 2.25	Coeficientes estructurales o de capa recomendados para capas de pavimentos existentes [1].....	77
Figura 2.26	Factor de condición [1]	79
Figura 2.27	Factor de ajuste para pavimentos con base granular o tratada con asfalto [1].....	80
Figura 2.28	Factor de ajuste para pavimentos con base estabilizada con cemento o puzolanas [1]	81
Figura 2.29	Puntos de análisis de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento. Adaptada de Pavement analysis and design [9]..	82
Figura 2.30	Parámetros que intervienen en el análisis lineal en un sistema multicapa [9]	83
Figura 2.31	Geometría en planta de un eje tándem [9]	87
Figura 2.32	Descomposición de los esfuerzos en coordenadas cilíndricas a coordenadas cartesianas o rectangulares [9]	88
Figura 2.33	División del semi-espacio en siete capas [9].....	89
Figura 2.34	Relación entre el esfuerzo desviador y el módulo resiliente en suelos de grano fino [9].....	92
Figura 2.35	Relación entre el esfuerzo desviador y el módulo resiliente para cuatro tipos de subrasante [9]	92
Figura 2.36	Puntos de análisis de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en múltiples neumáticos [1]	93
Figura 2.37	Curva de fluencia vs. tiempo a diferentes temperaturas [9]	96
Figura 2.38	Factor de cambio vs. temperatura [9].....	96
Figura 2.39	Carga dinámica en función del tiempo [9].....	98
Figura 2.40	Análisis de daño de un eje tándem [9].....	100
Figura 2.41	Análisis de daño de un eje trídem [9]	101
Figura 3.1	Módulos comprendidos dentro de la ventana principal	102
Figura 3.2	Interfaz gráfica de QtDesigner. La ventana de tráfico contiene imágenes de varias fuentes en objetos de lista [14, 16].....	103
Figura 3.3	Diagrama de flujo del módulo de tráfico	105
Figura 3.4	Diagrama de flujo del módulo de materiales para el análisis granulométrico (submódulo 1)	108

Figura 3.5	Diagrama de flujo del módulo de materiales para la combinación de áridos (submódulo 2)	110
Figura 3.6	Diagrama de flujo del módulo de materiales para el diseño de la mezcla asfáltica (submódulo 3).....	112
Figura 3.7	Diagramas de flujo del módulo de materiales para el cálculo del módulo resiliente para la subrasante y CBR (submódulo 4)	115
Figura 3.8	Diagramas de flujo del módulo de diseño para determinar la estructura inicial del pavimento flexible (submódulo 1)	117
Figura 3.9	Diagramas de flujo del módulo de diseño para determinar el espesor de la sobrecarpeta con mezcla asfáltica (submódulo 2)	120
Figura 3.10	Diagrama de flujo para el M_R retrocalculado	120
Figura 3.11	Diagrama de flujo del submódulo de análisis estructural del pavimento flexible	123
Figura 3.12	Uso de “multithreading” para graficar resultados de manera concurrente en ejecución. Adaptada de “A process with two threads of execution, running on a single processor” Fuente: Wikipedia.....	124
Figura 3.13	Uso de “multiprocessing” para determinar las constantes de integración A_i , B_i , C_i y D_i	125
Figura 4.1	Ventana principal del programa. La ventana contiene imágenes AI creadas usando el modelo GPT-3 [16]	127
Figura 4.2	Interfaz gráfica del módulo 1 - Tráfico. La ventana contiene imágenes de varias fuentes en objetos de lista [14, 16].....	128
Figura 4.3	Tabla para ingresar datos vehiculares y cargas por eje, método AASHTO	129
Figura 4.4	Tipos de vehículos: a) Dos ejes b) Tres ejes c) Cuatro ejes. Objetos de lista contienen imágenes de varias fuentes [14, 16]..	129
Figura 4.5	Parámetros para el diseño de la estructura, método AASHTO ...	130
Figura 4.6	Opciones para determinar la tasa de crecimiento vehicular	130
Figura 4.7	Tasas de crecimiento vehicular en el Ecuador	130
Figura 4.8	Interfaz para determinar tasa de crecimiento vehicular según registros de matriculación	131

Figura 4.9	Formato de hoja de cálculo para cargar datos de matriculación .	131
Figura 4.10	Parámetros de interpolación	132
Figura 4.11	Resumen de tasas de crecimiento en la ventana principal de tráfico	133
Figura 4.12	Tabla para ingresar datos, método "Ecuaciones de proyección" .	133
Figura 4.13	Interfaz gráfica para obtener ecuaciones de proyección	134
Figura 4.14	Resumen de ecuaciones de proyección	135
Figura 4.15	Interfaz gráfica para ingresar otras ecuaciones de proyección ...	135
Figura 4.16	Factor de dirección y carril en la ventana principal de tráfico	136
Figura 4.17	Determinación del factor camión	137
Figura 4.18	Consideración del tráfico inducido con la opción AASHTO	137
Figura 4.19	Botones para facilitar el manejo de la tabla principal	138
Figura 4.20	Resultados del módulo Tráfico.....	138
Figura 4.21	Interfaz gráfica para determinar la granulometría del material sin diferenciar entre parte gruesa y fina	139
Figura 4.22	Interfaz gráfica para determinar la granulometría del material con parte gruesa y fina	140
Figura 4.23	Interfaz gráfica para realizar la combinación de áridos	141
Figura 4.24	Interfaz gráfica para determinar el porcentaje de asfalto óptimo según el método de diseño Marshall	142
Figura 4.25	Determinar gravedad específica efectiva G_{se}	143
Figura 4.26	Tipo de tráfico	144
Figura 4.27	Relaciones gravimétricas y volumétricas de cada espécimen	144
Figura 4.28	Interfaz gráfica para calcular el M_R de la subrasante	145
Figura 4.29	Interfaz gráfica para la estimación del CBR	146
Figura 4.30	Definición de períodos	146
Figura 4.31	Ingreso de meses que corresponden a cada período	146
Figura 4.32	Recomendaciones según el Instituto del Asfalto para elegir el percentil de acuerdo al número de ESALs	147
Figura 4.33	Interfaz gráfica para el diseño de pavimentos flexibles	148
Figura 4.34	Período de diseño de acuerdo al tipo de vía	148
Figura 4.35	Confiabilidad de acuerdo al tipo de vía	149

Figura 4.36	Tipos de estructura permitidas en el módulo de diseño	150
Figura 4.37	Parámetros para la capa de rodadura	150
Figura 4.38	Correlación entre el módulo elástico y el coeficiente estructural de la capa de rodadura [6]	151
Figura 4.39	Parámetros para la capa base	151
Figura 4.40	Correlación entre los parámetros de resistencia y el coeficiente estructural del material base granular [6].....	152
Figura 4.41	Correlación entre los parámetros de resistencia y el coeficiente estructural del material base tratada con cemento [6]	152
Figura 4.42	Correlación entre los parámetros de resistencia y el coeficiente estructural del material base bituminosa [6]	153
Figura 4.43	Parámetros para la capa subbase	153
Figura 4.44	Correlación entre los parámetros de resistencia y el coeficiente estructural del material subbase [6]	154
Figura 4.45	Parámetros para la subrasante	154
Figura 4.46	Coeficientes de drenaje para base y subbase	155
Figura 4.47	Determinación del período de desempeño reducido.....	156
Figura 4.48	Ingreso de datos para determinar el número estructural efectivo con el método de inspección visual y ensayos de materiales.....	157
Figura 4.49	Coeficientes estructurales recomendados al pavimento actual...	157
Figura 4.50	Ingreso de datos para determinar el número estructural efectivo mediante el método de ensayo no destructivo (NDT).....	158
Figura 4.51	Interfaz gráfica para el retrocálculo del M_R - entrada de datos del plato de carga	159
Figura 4.52	Interfaz gráfica para el retrocálculo del M_R - entrada de datos de deflexiones	159
Figura 4.53	Ingreso de datos para determinar el número estructural efectivo mediante el método de vida remanente	160
Figura 4.54	Parámetros estructurales de la sobrecarpeta.....	161
Figura 4.55	Interfaz gráfica del análisis estructural.....	162
Figura 4.56	Configuración según el tipo de análisis.....	163
Figura 4.57	Definición de períodos	164

Figura 4.58	Datos de entrada para el análisis viscoelástico	165
Figura 4.59	Configuración para el análisis de daño	166
Figura 4.60	Selección del tipo de eje	167
Figura 4.61	Visualización de los datos ingresados para un eje tándem	167
Figura 4.62	Ingreso de parámetros de capa según el tipo de análisis	168
Figura 4.63	Ingreso de módulos elásticos por capa	168
Figura 4.64	Ingreso de profundidades de análisis	169
Figura 4.65	Ingreso de parámetros para análisis no-lineal y combinado	170
Figura 4.66	Propiedades por temporada K_1 y módulos elásticos límite	170
Figura 4.67	Parámetros para ubicar el punto de esfuerzo	171
Figura 4.68	División de capas no-lineales	172
Figura 4.69	Bulbo de presiones para una carga aislada	172
Figura 5.1	Formato para el aforo vehicular [5]	173
Figura 5.2	Tasas de crecimiento vehicular [5]	175
Figura 5.3	Cargas de tráfico que soportará el pavimento [5]	175
Figura 5.4	Ingreso de parámetros considerados en el estudio vial para calcular los ejes equivalentes en el programa	176
Figura 5.5	Ingreso del peso por eje de los camiones considerados en el estudio vial	176
Figura 5.6	Comparación en la proyección del tráfico en el programa y estudio vial	177
Figura 5.7	Granulometría de la mina La Vega 3 cargada al programa	182
Figura 5.8	Granulometría de la mina La Cera cargada al programa	183
Figura 5.9	Granulometría de la combinación de las minas en el programa ..	184
Figura 5.10	Granulometría para mezcla asfáltica [12]	186
Figura 5.11	Gravedades específicas determinadas en el ensayo [5]	187
Figura 5.12	Ensayo RICE realizado en el estudio vial [5]	187
Figura 5.13	Resultados del ensayo Marshall [5]	188
Figura 5.14	Árido A	188
Figura 5.15	Árido B	189
Figura 5.16	Combinación de áridos en el programa	189
Figura 5.17	Ingreso de datos de gravedades específicas	190

Figura 5.18	Ingreso de datos del ensayo RICE	190
Figura 5.19	Ingreso de datos del ensayo Marshall	190
Figura 5.20	Gráficas del ensayo Marshall obtenidas en el programa	191
Figura 5.21	Gráficas del ensayo Marshall obtenidas en el estudio vial [5]	192
Figura 5.22	Resumen del contenido de asfalto óptimo [5].....	193
Figura 5.23	Resumen del contenido de asfalto óptimo en el programa (a)....	193
Figura 5.24	Resumen del contenido de asfalto óptimo en el programa (b)....	194
Figura 5.25	Contenido de asfalto óptimo corregido en el programa.....	194
Figura 5.26	Caracterización de la subrasante [5].....	195
Figura 5.27	Ingreso de los valores de CBR al programa	196
Figura 5.28	Resultado del CBR en el programa	197
Figura 5.29	Resultado del M_R en el programa.....	197
Figura 5.30	Correlaciones empleadas en el programa	198
Figura 5.31	Cálculo del número estructural requerido	200
Figura 5.32	Número estructural requerido en el programa	200
Figura 5.33	Número estructural requerido en el estudio vial	201
Figura 5.34	Espesores calculados en el estudio vial [5]	201
Figura 5.35	Espesores calculados con el programa	201
Figura 5.36	Cálculo de ESAL para 10 años, primera iteración $SN = 2.0$	202
Figura 5.37	Número estructural requerido, primera iteración	203
Figura 5.38	Diseño de la estructura de pavimento para 10 años	203
Figura 5.39	Parámetros para diseñar la sobrecarpeta	204
Figura 5.40	Espesor de la sobrecarpeta.....	205
Figura 5.41	Estructura del pavimento [5]	206
Figura 5.42	Datos de la carga	206
Figura 5.43	Parámetros de las capas	207
Figura 5.44	Puntos de análisis de daño	207
Figura 5.45	Resumen de resultados para el análisis de daño	208
Figura 5.46	Criterios de falla	208
Figura 5.47	Gráficas de esfuerzo vertical vs. profundidad	209
Figura 5.48	Gráficas de deformación y deflexión vertical vs. profundidad	210

Índice de tablas

Tabla 2.1	Tasas de crecimiento según MTOP 2009 [6].	37
Tabla 2.2	Composición vehicular según MTOP 2013 [14]	38
Tabla 2.3	Factor de distribución por dirección [1]	39
Tabla 2.4	Factor de distribución por carril [1]	39
Tabla 2.5	Índice de serviciabilidad final según el tipo de vía [1].	40
Tabla 2.6	Confiabilidad de acuerdo al tipo de vía [1]	42
Tabla 2.7	Valores de desviación estándar según el tipo de pavimento [1]	42
Tabla 2.8	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para subbase [13]	56
Tabla 2.9	Recomendaciones para uso de material de base [13]	57
Tabla 2.10	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 1 [13]	57
Tabla 2.11	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 2 [13]	58
Tabla 2.12	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 3 [13]	58
Tabla 2.13	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 4 [13]	58
Tabla 2.14	Criterios de diseño Marshall [10]	64
Tabla 2.15	Mínimo porcentaje de vacíos en el agregado mineral [10]	64
Tabla 2.16	Relaciones gravimétricas y volumétricas [10].	65
Tabla 2.17	Consideraciones de drenaje [1].	70
Tabla 2.18	Valores para el coeficiente de drenaje [1].	71
Tabla 2.19	Valores mínimos de espesores en pulgadas [1].	71
Tabla 2.20	Constantes no-lineales K_1 y K_2 para materiales granulares [9].	91
Tabla 2.21	Valores de K_1 y K_2 para materiales granulares no tratados [9].	91
Tabla 2.22	Valores de f_1 , f_2 y f_3 [9].	99
Tabla 2.23	Valores de f_4 , f_5 [9].	100
Tabla 5.1	Tráfico Promedio Diario Anual [5].	174
Tabla 5.2	Tráfico Promedio Diario Anual año 2038.	177
Tabla 5.3	Clasificación de los vehículos pesados.	178

Tabla 5.4	Factores de equivalencia de carga.....	178
Tabla 5.5	Número de ejes equivalentes, $SN = 2.0$ y $P_t = 2.0$	179
Tabla 5.6	Resultados de las características mecánicas de la mina La Vega 3 [5]	179
Tabla 5.7	Resultados de las características mecánicas de la mina Cera [5]	180
Tabla 5.8	Ensayo granulométrico mina La Vega 3 [5]	180
Tabla 5.9	Ensayo granulométrico mina La Cera [5].....	181
Tabla 5.10	Ensayo granulométrico combinación mina La Vega 3 (80%) y Cera (20%) [5]	181
Tabla 5.11	Comparación mina La Vega 3	182
Tabla 5.12	Comparación mina La Cera.....	183
Tabla 5.13	Comparación combinación mina La Vega 3 (80%) y Cera (20%) .	184
Tabla 5.14	Granulometría Ripio 1" Triturado [5].....	185
Tabla 5.15	Granulometría Polvo de Piedra Retriturado [5]	186
Tabla 5.16	Resultados del ensayo Marshall para cada porcentaje de asfalto (a)	190
Tabla 5.17	Resultados del ensayo Marshall para cada porcentaje de asfalto (b)	191
Tabla 5.18	Datos de los ensayos CBR [5].....	196
Tabla 5.19	Parámetros de las capas [5]	199
Tabla 5.20	Comparación de criterios de falla	209

Dedicatoria

A mis padres, Sandra y Javier, por creer siempre en mí y por contar con su apoyo incondicional durante de mi carrera universitaria.

A mi hermano Mauricio, por ser mi compañero de toda la vida, con quien puedo siempre contar e inspira a dar lo mejor de mí.

A mis tías, primos, a mis abuelos, Eduardo y Ariolfo, que los tengo presentes cada día de mi vida, y a toda mi familia.

A mis amigos y compañeros que hice a lo largo de la carrera, entre ellos: Mateo, César, Pedro, Leonel, Anderson, por su apoyo, confianza y comprensión.

Xavier Edward Barrera Bermeo

A mis padres, Moisés y Mirian, por su apoyo, amor y sacrificio para que yo pueda cumplir todas mis metas. Gracias por guiarme, alentarme y sostenerme durante mi carrera universitaria.

A mis hermanas Thalía, Pamela y Paula por extenderme su mano cuando las necesité, a mi hermano Andrés que cuando requerí su ayuda siempre estuvo presente.

A todas las personas que formaron parte de este logro.

A mi grupo de amigos con quienes compartimos buenas experiencias y conocimientos durante toda la carrera.

A la mujer que me acompaña desde el colegio, gracias por motivarme, ayudarme, escucharme y creer en mí.

Anderson Israel Silva Sáenz

Agradecimientos

Agradecemos primeramente a Dios por brindarnos la valentía para alcanzar este logro.

A la Universidad de Cuenca por ayudarnos a crecer personalmente y ser el espacio para nuestra educación.

A nuestro tutor Ing. Jaime Bojorque por habernos motivado a realizar este tema con sus excelentes clases en las asignaturas de pavimentos y por aceptar ser partícipe de este trabajo.

A los ingenieros Daniel Mogrovejo y Gerardo Arbito por guiarnos y aconsejarnos durante el desarrollo de este trabajo.

A nuestras familias, quienes han sido nuestro sostén durante toda la vida y nos han brindado su ayuda siempre.

A nuestro grupo de amigos, con quienes compartimos conocimientos, anécdotas y experiencias.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería que nos impartieron sus valiosas enseñanzas para lograr que nuestra formación académica sea excelente.

Lista de Símbolos

Acrónimos

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AIM	Asphalt Institute Method
ASTM	American Society for Testing Materials (EE.UU.)
FWD	Falling Weight Deflectometer
GUI	Interfaz Gráfica de Usuario
IDE	Integrated Development Environment
I/O	Input/Output
MEPDG	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
MOP	Ministerio de Obras Públicas
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NEVI	Norma para Estudios y Diseño Vial
NDT	Non-Destructive Testing
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
UI	Interfaz de Usuario

Tráfico

ESAL	Equivalent Single Axle Load
FC	Factor camión o de carga
F_D	Factor de distribución por dirección
F_L	Factor de distribución por carril
F_{Proy}	Factor de proyección
r	Tasa de crecimiento
TPDA	Tráfico Promedio Diario Anual
TPD	Tráfico Promedio Diario
$\%V_c$	Porcentaje de vehículos comerciales

Lista de Símbolos

Materiales

CBR	California Bearing Ratio
C_c	Coeficiente de concavidad
C_u	Coeficiente de uniformidad
D_{10}	Diámetro correspondiente al 10% más fino en la curva de distribución de tamaño de partícula
D_{30}	Diámetro correspondiente al 30% más fino en la curva de distribución de tamaño de partícula
D_{60}	Diámetro correspondiente al 60% más fino en la curva de distribución de tamaño de partícula
G_b	Gravedad específica del asfalto
G_{mb}	Gravedad específica real de la mezcla (Bulk)
G_{mm}	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla
G_{sa}	Gravedad específica aparente de los áridos
G_{se}	Gravedad específica efectiva de los áridos
G_{sb}	Gravedad específica de la combinación de áridos
LL	Límite Líquido
M_R	Módulo resiliente
NP	No Plástico
PI	Índice de plasticidad
PL	Límite Plástico
P_b o C.A.	Porcentaje o contenido de asfalto
P_{mm}	Porcentaje total de la mezcla suelta
P_s	Porcentaje de combinación de áridos
VFA	Vacíos rellenos de asfalto
VMA	Vacíos en el agregado mineral
VTM	Vacíos totales de la mezcla
W_D	Peso al aire del espécimen seco
W_{SSD}	Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco
W_w	Peso del espécimen saturado sumergido

Lista de Símbolos

Método AASHTO

a_e	Radio del bulbo de presión en la interface paquete estructural del pavimento y subrasante
a_1, a_2, a_3	Coefficientes estructurales o de capa
CF	Factor de condición
D_{ol}	Espesor de la sobrecarpeta
d_r	Deflexión a la distancia "r" medida desde el centro de la placa - Ensayo FWD
E_{MAC}	Módulo elástico dinámico de la mezcla asfáltica en caliente
E_p	Módulo efectivo de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante o del paquete estructural
m_2, m_3	Coefficientes de drenaje
$N_p, N_{1.5}$	Número de ejes equivalentes requeridos hasta la fecha y para alcanzar una serviciabilidad de 1.5
P_o, P_t	Índices de serviciabilidad inicial y final
ΔPSI	Pérdida de serviciabilidad
ΔPSI_{MAX}	Máxima pérdida de serviciabilidad por congelamiento
ΔPSI_{FH}	Pérdida de serviciabilidad por congelamiento
ΔPSI_{SW}	Pérdida de serviciabilidad por hinchazón
ΔPSI_{TR}	Pérdida de serviciabilidad por tráfico
RL	Vida remanente
SN	Número estructural
SN_{eff}	Número estructural efectivo del pavimento actual
SN_f	Número estructural requerido del pavimento con sobrecarpeta para el nuevo período de diseño
SN_o	Número estructural del pavimento al inicio de la construcción
SN_{ol}	Número estructural requerido para la sobrecarpeta
S_o	Desviación estándar
V_R	Posible ascenso vertical por hinchazón
W_{18}	Número de ejes equivalentes con carga 18 kips
Z_R	Nivel de confiabilidad

Lista de Símbolos

Análisis Estructural

a_T	Factor tiempo-temperatura
ν	Coeficiente de Poisson
E	Módulo de elasticidad
E_0	Módulo de elasticidad inicial
D_r	Relación de daño en el pavimento
f_1, f_2, f_3	Constantes para el criterio de falla por fatiga
f_4, f_5	Constantes para el criterio de falla por deformación permanente
K_0	Coeficiente de presión de tierras en reposo
K_1	Constante por temporada para capas no-lineales
K_2, K_3, K_4	Constantes no temporales para capas no-lineales
N_d, N_f	Número permitido de repeticiones por carga para evitar grietas por deformación permanente y fatiga
$RCNOL$	Coordenada radial del punto de esfuerzo no-lineal
SLD	Pendiente de distribución de carga
$XCNOL$	Coordenada cartesiana "x" del punto de esfuerzo no-lineal
$YCNOL$	Coordenada cartesiana "y" del punto de esfuerzo no-lineal
$ZCNOL$	Profundidad del punto de esfuerzo no-lineal
Δ_{adm}	Deflexión admisible en la superficie del pavimento
$\epsilon_c, \epsilon_{tn}$	Deformación de compresión y tensional horizontal
$\epsilon_z, \epsilon_r, \epsilon_t$	Deformaciones en coordenadas cilíndricas
$\epsilon_z, \epsilon_x, \epsilon_y$	Deformaciones en coordenadas cartesianas
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	Deformaciones principales
σ_d, θ	Esfuerzo desviador e invariante
$\sigma_z, \sigma_r, \sigma_t$	Esfuerzos normales en coordenadas cilíndricas
$\sigma_z, \sigma_x, \sigma_y$	Esfuerzos normales en coordenadas cartesianas
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Esfuerzos principales
$\tau_{rz}, \tau_{zt}, \tau_{rt}$	Esfuerzos tangenciales en coordenadas cilíndricas
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Esfuerzos tangenciales en coordenadas cartesianas
ω, u	Deflexión o desplazamiento vertical y radial

Capítulo 1

1. Introducción

1.1 Antecedentes y justificación

Para el diseño del pavimento se debe tener en cuenta todas las variables que influyen en su desempeño y funcionamiento. Estos factores son el clima, tipo de suelo, materiales disponibles para construir la estructura, cargas y repeticiones del tráfico, sin restar importancia al factor económico. La combinación de estas variables genera un problema de tipo técnico-económico que debe ser analizado por el diseñador, teniendo que optar por varias alternativas de diseño considerando una estructura de pavimento flexible o rígido; esto implica mayores tiempos de elaboración, y en ocasiones se pueden generar errores por parte del usuario al realizar cálculos manuales, pudiendo desencadenar en el no cumplimiento de la normativa que exigen las instituciones públicas encargadas.

En la actualidad existen varios programas que apoyan al diseño de pavimentos, estos programas simplifican los procesos de cálculo para el diseñador, permitiéndole tomar una elección más rápida y eficaz entre las alternativas. Además, la elaboración de un programa permite establecer un proceso en el que los posibles errores generados por el diseñador sean evitados. Los programas disponibles por lo general solo realizan una parte del análisis, por ello resulta conveniente contar con una herramienta computacional que permita un vínculo entre varios de los parámetros que involucran el diseño de la estructura de pavimento y su comportamiento.

La metodología de diseño según la guía AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) es la más utilizada desde un punto de vista empírico para pavimentos. La guía se basa en los estudios realizados de la AASHTO Road Test a finales de los años 50, sobre el desempeño de las estructuras de pavimento, la cual se ha venido actualizando para determinar los espesores de las capas subbase, base y de rodadura, tomando en cuenta que los parámetros impuestos por el diseñador pueden contener cierto nivel de incertidumbre, por lo que se utiliza el

concepto de confiabilidad para compensar esa variabilidad.

A la par del diseño se debe analizar las condiciones de desempeño del pavimento, para determinar el tipo de fallas que se pueden producir en el pavimento nuevo o a rehabilitar, de tal manera que cumpla con las condiciones de tipo estructural y funcional durante su vida útil. Para esto se complementa el diseño del pavimento con el análisis estructural que permite conocer los esfuerzos, deformaciones y deflexiones que se producen en todas las capas que conforman la estructura. Por otra parte, se realiza el análisis de daño para predecir el desempeño y la durabilidad del pavimento utilizando los indicadores por fatiga y ahuellamiento (en la subrasante).

La elaboración de la interfaz para los diseños según la AASHTO permitirá realizar los análisis que comprenden el diseño completo de un pavimento flexible, de manera que no dependa de procesos de cálculos externos o manuales. Los resultados determinados en el programa deben ser analizados por el diseñador, para establecer criterios de tipo técnico-económico y así llegar a la alternativa definitiva. El programa servirá como una herramienta de análisis para el diseñador que estará enfocado a un proceso de diseño, y contará con la flexibilidad de considerar diferentes características de diseño y materiales para satisfacer el requerimiento estructural del pavimento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un programa computacional en lenguaje Python que incluya una interfaz gráfica de usuario y que permita determinar alternativas de diseño para pavimentos flexibles, como también analizar el comportamiento estructural para capas elásticas, no-lineales y viscoelásticas.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Estudiar y determinar el número de ejes equivalentes (ESAL) que transitarán por la vía durante el período de diseño.
2. Clasificar y caracterizar los materiales que conforman la estructura de pavimento.

3. Programar el diseño de la estructura del pavimento flexible según el método de la guía de diseño AASHTO 93.
4. Implementar la teoría de análisis lineal, no-lineal, viscoelástico y análisis de daño para estudiar el comportamiento de la estructura del pavimento.
5. Indicar el proceso y funcionamiento de las interfaces que contiene el programa, referente al tráfico, materiales, diseño y análisis estructural.
6. Realizar un diseño de pavimento flexible a partir de un estudio vial ejecutado por el Gobierno Provincial de Loja, empleando el programa desarrollado.
7. Comparar los resultados obtenidos del análisis estructural entre el programa desarrollado y el módulo KENLAYER del programa KENPAVE.

1.3 Alcance

El programa estará desarrollado en lenguaje Python, el cual permitirá el proceso de varias de las operaciones necesarias para el diseño de un pavimento flexible, en el que se tomará en cuenta el estudio del tráfico, materiales, análisis estructural basado en esfuerzos, deformaciones y deflexiones, y diseño según la metodología de la AASHTO. Dentro del programa se pretende obtener la combinación de capas que conforman la estructura del pavimento flexible usando la metodología de diseño empírico de la AASHTO 93, la cual utiliza los datos de entrada de tráfico y propiedades de materiales de las distintas capas que conforman el pavimento. El parámetro del tráfico dentro del programa puede ser determinado a partir del conteo vehicular y características del carril de diseño, con ello se determina el número de cargas equivalentes (ESAL) para una variedad de vehículos disponibles. En cuanto a las propiedades de las capas, se utiliza el módulo resiliente que puede obtenerse a partir del ensayo CBR (California Bearing Ratio) usando correlaciones propuestas por la guía, estas se implementarán al programa para proceder con el diseño de la estructura. El programa incluirá adicionalmente el diseño de sobrecarpetas con mezcla asfáltica usando los métodos de vida remanente, factor de condición y método no destructivo propuestos por la guía de diseño AASHTO 93. Se realizará una simulación de diseño usando la interfaz, esto servirá para verificar que los resultados propiciados por el programa sean correctos.

1.4 Organización de capítulos

El presente trabajo de titulación se enfoca en la creación de un programa computacional o software denominado "PRO-PAVE", dentro del cual se implementan distintos módulos, estos sirven para analizar el tráfico, caracterizar materiales, diseñar la estructura del pavimento, diseñar sobrecarpetas con mezcla asfáltica y finalmente estudiar el comportamiento estructural, en base a los esfuerzos, deformaciones y deflexiones que se generan debido a las cargas repetidas del tráfico.

A continuación, se brinda un breve resumen de cada capítulo.

- 1. Introducción:** este capítulo detalla de forma breve los antecedentes del trabajo de titulación, se identifica el estado del arte, se justifica la relevancia de este trabajo y se plantea el alcance del mismo. Además, contiene el objetivo general y los objetivos específicos.
- 2. Marco teórico:** se proporciona definiciones y conceptos básicos útiles para la implementación del programa. Se explica todo lo relacionado al diseño del pavimento, como: el tráfico, materiales, metodología de diseño AASHTO, diseño de sobrecarpetas y distintas teorías para analizar el comportamiento estructural.
- 3. Metodología:** se presentan diagramas de flujo, funciones, datos de entrada, datos de salida y complementos adicionales de cada módulo y submódulo del programa PRO-PAVE.
- 4. Procedimiento para la ejecución del programa:** se expone la lógica y el proceso a seguir para la utilización del programa, esto a modo de guía para el usuario. Se indica como trabajar con los distintos módulos del software para obtener la estructura del pavimento requerida y su comportamiento estructural.
- 5. Resultados:** se presentan los resultados obtenidos mediante el programa, tanto de la estructura del pavimento como su comportamiento. También se realiza la comparación entre el análisis estructural del programa creado con el módulo KENLAYER del programa KENPAVE.
- 6. Conclusiones y recomendaciones:** se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo de titulación.

Capítulo 2

2. Marco Teórico

En este capítulo se proporcionan las definiciones y conceptos básicos útiles para la implementación del programa. Se explica los conceptos relacionados al diseño del pavimento, como: el tráfico, materiales, metodología de diseño para la estructura inicial y sobrecarpetas y distintas teorías para analizar el comportamiento estructural.

2.1 Conceptos generales de los pavimentos

2.1.1 Definición

Un pavimento es una estructura conformada por varias capas superpuestas aproximadamente horizontales, la estructura se diseña y construye técnicamente con materiales resistentes y debidamente compactados. El conjunto de capas se asienta directamente sobre la subrasante o material de mejoramiento, los cuales han de soportar correctamente los esfuerzos producidos por las cargas repetidas del tráfico durante todo el período de vida útil del pavimento [7].

Montejo (1998) especifica que los pavimentos deben reunir las siguientes características:

- Ser resistente ante las cargas vehiculares solicitadas.
- Ser resistente a los agentes del intemperismo.
- Poseer una textura superficial adecuada.
- Presentar resistencia al desgaste generado por el efecto abrasivo de los neumáticos.
- Ser durable.
- Tener un drenaje adecuado.
- El ruido debe ser moderado.
- Su diseño debe ser económico.

En la figura 2.1 se presenta un esquema de la estructura típica del pavimento.

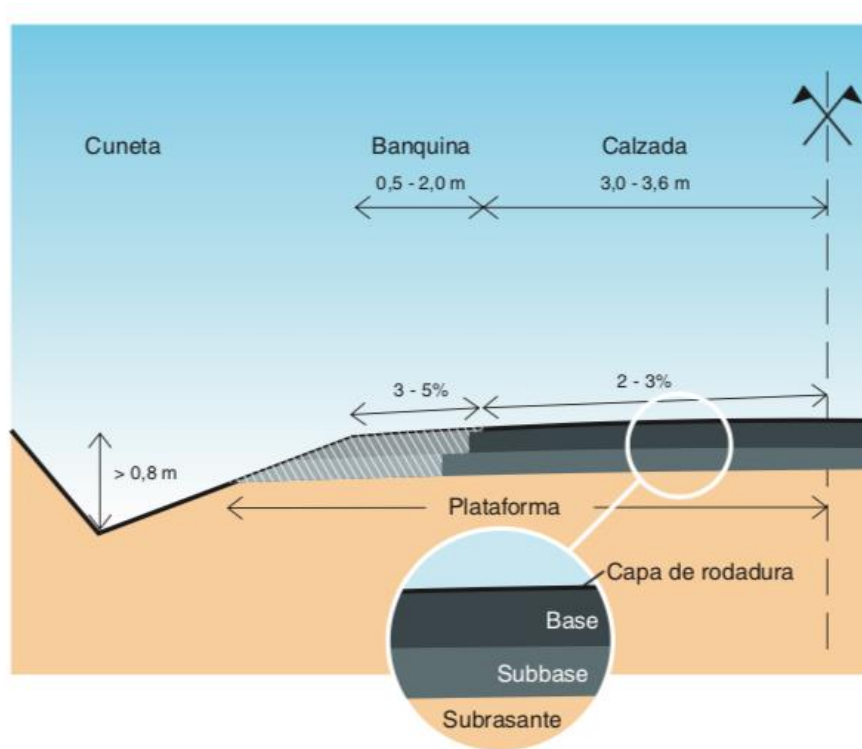


Figura 2.1: Estructura del pavimento [2]

2.1.2 Pavimento flexible

Estos pavimentos poseen una capa de rodadura con mezcla asfáltica, asentada por lo general sobre las capas de base y subbase. Su construcción es económica, pero requieren un mantenimiento continuo para que funcione adecuadamente durante el período de vida útil [7]. En la figura 2.2 se muestran las capas que por lo general, conforman la estructura del pavimento.

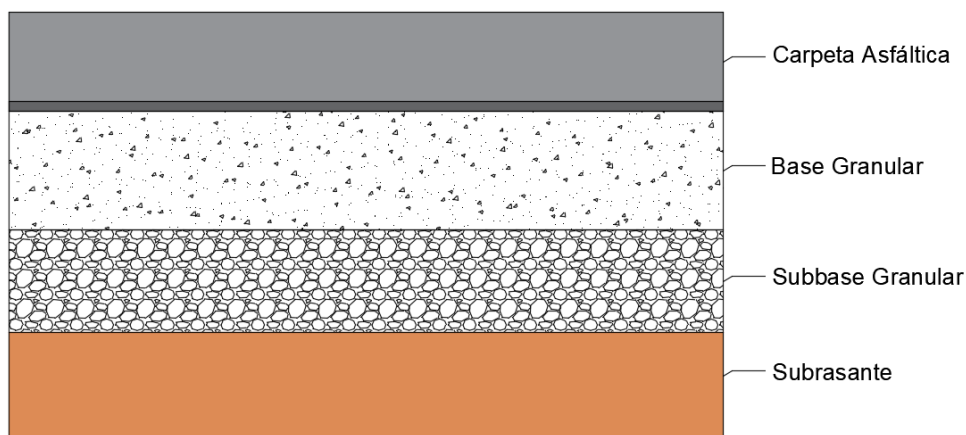


Figura 2.2: Estructura del pavimento flexible

2.1.3 Funciones de las capas de un pavimento flexible

Según Montejo (1998) cada capa del pavimento cumple con ciertas características.

2.1.3.1 Carpeta Asfáltica

- **Superficie de rodadura:** proporciona uniformidad, textura y color que brindan seguridad al tránsito.
- **Impermeabilidad:** evita la filtración de agua hacia las capas inferiores.
- **Resistencia:** disipa adecuadamente los esfuerzos generados por el tráfico.

2.1.3.2 Base

- **Economía:** la función de la base es disminuir los costos de la capa de rodadura. Si se aumenta el espesor de la capa base, por consecuencia el espesor de la carpeta asfáltica será menor, siendo esta última la más costosa.
- **Resistencia:** disminuir en gran medida los esfuerzos que serán transmitidos a la subbase y subrasante.

2.1.3.3 Subbase

- **Economía:** esta capa es la de menor costo, por lo que, si se aumenta su espesor se disminuyen los espesores de las capas superiores, en otras palabras, el costo de la estructura del pavimento será menor.
- **Resistencia:** contrarrestar los esfuerzos que serán transmitidos a la subrasante.
- **Drenaje:** drena el agua que ingresa por las bermas o por la misma estructura.
- **Disminución de deformaciones:** puede actuar como una barrera ante los cambios de volumen de la subrasante, evitando que estas deformaciones afecten la capa de rodadura.

2.1.4 Factores considerados para el diseño del pavimento

2.1.4.1 Tráfico

Para definir la estructura del pavimento es importante conocer las cargas del tráfico a las que será sometido. Para ello se determina el número de ejes equivalentes en el carril de diseño y durante el período de diseño adoptado [1].

2.1.4.2 Subrasante

Es el material o terreno natural donde se asentará la estructura del pavimento. El espesor de la estructura depende en gran medida de la resistencia a los esfuerzos y deformaciones de esta capa. Es importante tener presente la variación en las características del terreno cuando entra en contacto con agua, estas condiciones pueden generar daños de gran magnitud en toda la estructura del pavimento, por lo cual, se deben manejar técnicas para contrarrestarlas, por ejemplo, impermeabilización de toda la estructura o mejoramiento de la subrasante mediante estabilización con cal [7].

2.1.4.3 Materiales disponibles

Antes de realizar el diseño de la estructura del pavimento es necesario analizar técnica y económicamente los materiales disponibles en la zona donde se llevará a cabo la construcción. Se considera canteras cercanas y depósitos aluviales de la zona, debiendo analizar la calidad, volumen a extraer, procesos de explotación, costos y distancias de acarreo [7].

2.1.4.4 Clima

Los cambios de temperatura y las lluvias influyen en gran medida durante la ejecución del proyecto en los trabajos de compactación de las capas y el movimiento de tierras. Además, tienden a modificar el comportamiento de la subrasante durante todo el período de diseño. En pavimentos flexibles la variación en la temperatura implica una alteración del módulo elástico de la carpeta asfáltica generando deformaciones excesivas o grietas que afectan el confort y la seguridad de quienes transitan [7].

2.2 Tráfico

Para el diseño de una vía la variable más influyente es el tráfico, puesto que la estructura del pavimento dependerá del número y el peso de los vehículos. Adicionalmente, se requiere conocer volúmenes y dimensiones para el diseño geométrico. A continuación, se detallan conceptos básicos que intervienen en el estudio del tráfico.

- **Eje simple:** eje formado por uno o dos neumáticos en sus extremos.
- **Eje tándem:** conformado por dos ejes simples con doble neumático.
- **Eje tridem:** conjunto de tres ejes simples con neumático doble en sus extremos.

En la figura 2.3 se observa los tipos de ejes.



Figura 2.3: Tipos de ejes [7]

- **Vehículos livianos:** vehículos con un peso menor a 5 toneladas.
- **Vehículos comerciales:** tienen un peso mayor a 5 toneladas.
- **Volumen de tránsito:** es la cantidad de vehículos que circulan por la vía durante un período de tiempo.
- **Tránsito promedio diario:** volumen de tránsito durante un período de tiempo, dividido por el número de días del período.
- **Tránsito existente:** cantidad de vehículos que circulan por la vía antes de ser pavimentada.
- **Tránsito atraído:** cantidad de vehículos que, sin modificar su origen ni destino, podrían ocupar la vía pavimentada como ruta alternativa [12].
- **Tránsito generado:** número de vehículos que resulta como consecuencia del desarrollo social y económico de la nueva zona de influencia [12].
- **Tránsito inducido:** es el total del tránsito atraído y generado [12].

2.2.1 Clasificación vehicular según el MTOP

El MTOP en 2016 expidió las "Normas de aplicación para el Control de Pesos y Dimensiones a los vehículos de carga pesada que circulan en la Red Vial del país".

La tabla Nacional de Pesos y Dimensiones detalla los tipos de vehículos motorizados, remolques y semirremolques con sus posibles combinaciones, se indica el peso y dimensiones máximas permitidas, ver figuras 2.4 y 2.5.

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESO MÁXIMO PERMITIDO (Ton.)	LONGITUDES MÁXIMAS PERMITIDAS (metros)		
				Largo	Ancho	Alto
2 D			7	5,00	2,60	3,00
2DA			10	7,50	2,60	3,50
2DB			18	12,20	2,60	4,10
3-A			27	12,20	2,60	4,10
4-C			31	12,20	2,60	4,10
4-0 OCTOPUS			32	12,20	2,60	4,10
V2DB			18	12,20	2,60	4,10
V3A			27	12,20	2,60	4,10
VZS			27	12,20	2,60	4,10
T2			18	8,50	2,60	4,10
T3			27	8,50	2,60	4,10
S3			24	13,00	2,60	4,10
S2			20	13,00	2,60	4,10
S1			11	13,00	2,60	4,10
R2			22	10,00	2,60	4,10
R3			31	10,00	2,60	4,10
B1			11	10,00	2,60	4,10
B2			20	10,00	2,60	4,10
B3			24	10,00	2,60	4,10

Figura 2.4: a) Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones [14]

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESO BRUTO VEHICULAR MÁXIMO PERMITIDO (toneladas)	LONGITUDES MÁXIMAS PERMITIDAS (metros)		
				Largo	Ancho	Alto
2S1			29	20,50	2,60	4,30
2S2			38	20,50	2,60	4,30
2S3			42	20,50	2,60	4,30
3S1			38	20,50	2,60	4,30
3S2			47	20,50	2,60	4,30
3S3			48	20,50	2,60	4,30
2R2			40	20,50	2,60	4,30
2R3			48	20,50	2,60	4,30
3R2			48	20,50	2,60	4,30
3R3			48	20,50	2,60	4,30
2B1			29	20,50	2,60	4,30
2B2			38	20,50	2,60	4,30
2B3			42	20,50	2,60	4,30
3B1			38	20,50	2,60	4,30
3B2			47	20,50	2,60	4,30
3B3			48	20,50	2,60	4,30

Figura 2.5: b) Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones [14]

2.2.2 Período de análisis de diseño y período de desempeño

2.2.2.1 Período de análisis de diseño

Es el período de tiempo que debe contener cualquier estrategia de diseño. Dentro de este período se debe contemplar por lo menos una intervención de mantenimiento o rehabilitación para la preservación del pavimento. Se recomienda, en general, aplicar períodos de análisis largos, puesto que a futuro pueden ser mejor al momento de evaluar estrategias alternativas basadas en los costos del ciclo de vida. Por lo general,

este período de diseño es superior al de la vida útil del pavimento, por lo tanto, éste será mayor a 20 años [1].

2.2.2.2 Período de desempeño

El período de desempeño corresponde al tiempo transcurrido en el que una estructura nueva, reconstruida o rehabilitada pasa desde su capacidad de servicio inicial hasta su capacidad de servicio final. Este parámetro se ve afectado por la clasificación funcional del pavimento, el tipo y nivel de mantenimiento, factor económico, etc [9].

2.2.3 Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA)

El Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA), se considera un parámetro principal para el diseño de pavimentos y se define como el volumen total de vehículos que pasan por una sección de una carretera en un período de tiempo determinado, dividido para el número de días del período, este puede ser anual, mensual o semanal [7].

Para el cálculo del TPDA se debe conocer lo siguiente:

- En carreteras de un solo sentido de circulación, el tráfico será el contado en ese sentido.
- En carreteras de dos sentidos de circulación, se considera el volumen de tráfico en las dos direcciones.
- Para el caso de autopistas, usualmente se obtiene el TPDA para cada sentido de circulación, en estas se obtiene flujo direccional que es el porcentaje de vehículos en cada sentido de la vía.

2.2.4 Tasa de crecimiento vehicular

La tasa de crecimiento se utiliza para la proyección del tráfico, su valor se sustenta en análisis estadísticos, por lo general, con datos del parque automotor. En otras situaciones se suele emplear la tasa de crecimiento poblacional o de combustible [12].

En el año 2009 el MTOP realizó un estudio a nivel nacional para conocer las tasas de crecimiento vehicular, los resultados se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Tasas de crecimiento según MTOP 2009 [6]

Tipo de vehículos	Tasa de crecimiento vehicular
Livianos	3.60%
Buses	1.70%
Camiones de 2 o más ejes	2.72%

2.2.5 Tráfico proyectado

Existen distintas maneras de proyectar el tráfico vehicular, sin embargo, la ecuación más utilizada corresponde a un crecimiento exponencial del parque automotor. La ecuación 2.1 permite proyectar el tráfico para cualquier período de diseño n , considerando la tasa de crecimiento r [12].

$$TPD_n = TPD_i \cdot (1 + r)^n \quad (2.1)$$

Donde:

TPD_n : tráfico proyectado.

TPD_i : tráfico inicial.

r : tasa de crecimiento (%).

n : número de años.

2.2.6 Tráfico acumulado en el período de diseño

Cuando se hace referencia al tráfico acumulado en el período de diseño se hace referencia al total de vehículos que circularán por la vía durante su vida útil. Este valor resulta de aplicar el concepto de integración (ver figura 2.6).

De la figura 2.6 se plantea la siguiente integral definida:

$$\int_a^b f(x) dx \quad (2.2)$$

Finalmente, el tráfico acumulado para la ecuación 2.1 se obtiene al resolver la siguiente integral:

$$T_{acum} = \int_0^n TPD_i \cdot (1 + r)^x dx = TPD_i \cdot \frac{(1 + r)^n - 1}{\ln(1 + r)} \quad (2.3)$$

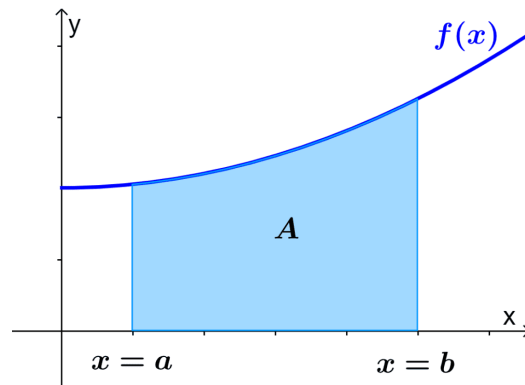


Figura 2.6: Integral bajo la curva para calcular el tráfico acumulado

Donde el factor de proyección es:

$$F_{Proy} = \frac{(1 + r)^n - 1}{\ln(1 + r)} \tag{2.4}$$

La ecuación anterior solamente aplica cuando el crecimiento del tráfico es exponencial según la ecuación 2.1. En casos donde el crecimiento vehicular es diferente, se debe integrar la ecuación de proyección para obtener el tráfico acumulado, por lo tanto, no es necesario determinar el factor de proyección.

2.2.7 Composición vehicular en el Ecuador

Los vehículos usualmente se definen en dos clases: livianos y pesados, en este último se contemplan camiones de 2 o más ejes y buses. En la tabla 2.2 se presenta la clasificación del tráfico en nuestro país según el estudio realizado en el año 2013 por el MTOP:

Tabla 2.2: Composición vehicular según MTOP 2013 [14]

Tipo de vehículos	Porcentaje promedio de vehículos a nivel nacional
Livianos	75%
Buses	15%
Camiones de 2 o más ejes	10%

2.2.8 Factor de distribución por dirección

Si en el estudio de tráfico no se tiene registro de datos con respecto a la cantidad de vehículos en cada dirección de la vía, se puede utilizar los porcentajes mostrados en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Factor de distribución por dirección [1]

Número de carriles en ambas direcciones	Porcentaje de camiones en el carril de diseño
2	50%
4	45%
6 o más	40%

2.2.9 Factor de distribución por carril

Este factor considera el porcentaje de ESALs que circulan por el carril más solicitado. De igual manera, si no se tienen datos tomados en campo se puede utilizar los valores proporcionados por la guía de diseño AASHTO 93, la misma recomienda porcentajes según el número de carriles, ver tabla 2.4.

Tabla 2.4: Factor de distribución por carril [1]

Número de carriles en cada dirección	Porcentaje de camiones en el carril de diseño
1	100%
2	80-100%
3	60-80%
4	50-75%

2.2.10 Índices de serviciabilidad

El índice de servicio hace referencia a la condición del pavimento para brindar seguridad y confort a los usuarios durante el manejo. Es decir, este valor tiene una relación directa con el comportamiento funcional de la estructura del pavimento. Según la AASHTO, el índice de serviciabilidad inicial P_o con el que debe empezar un pavimento es de 4.5 para rígidos y de 4.2 para flexibles, mientras que los índices de serviciabilidad final P_t se indican en la tabla 2.5 de acuerdo a la clasificación de la vía.

Tabla 2.5: Índice de serviciabilidad final según el tipo de vía [1]

Clasificación	P_t
Carreteras/Autopistas principales	3
Colectores	2.5
Calles comerciales e industriales	2.25
Calles residenciales y estacionamientos	2

La diferencia entre ambos índices de serviciabilidad se conoce como la pérdida de serviciabilidad, la pérdida va incrementando a lo largo de la vida útil del pavimento, y se ve influenciado por el tráfico y el entorno ambiental.

$$\Delta PSI = P_o - P_t \quad (2.5)$$

Donde:

ΔPSI : Pérdida de serviciabilidad.

P_o : Índice de serviciabilidad inicial.

P_t : Índice de serviciabilidad final.

2.2.11 Factor de carga

Cuando se realiza el diseño de pavimentos es necesario considerar los distintos tipos de cargas como consecuencia de los vehículos que transitan por la vía, la carga de cada vehículo depende del tipo de eje que poseen. Dentro del método AASHTO, se considera estandarizar las cargas a un solo tipo de eje de 18 kips [6]. Para calcular los factores de carga se utiliza la ecuación 2.6:

$$FC = \left[\frac{L_x + L_{2x}}{L_{18} + L_{2s}} \right]^{4.79} \cdot \left[\frac{10^{\frac{G}{\beta_{18}}}}{10^{\frac{G}{\beta_x}}} \right] \cdot [L_{2x}]^{4.33} \quad (2.6)$$

$$G = \log \left(\frac{4.2 - P_t}{4.2 - 1.5} \right); \beta = 0.4 \cdot \left[\frac{0.081 \cdot (L_x + L_{2x})^{3.23}}{(SN+1)^{5.19} \cdot (L_{2x})^{3.23}} \right]$$

Donde:

FC : Factor de carga.

SN : Número estructural.

P_t : Índice de serviciabilidad final.

L_x : Carga del eje en kips.

L_{2x} : Tipo de eje analizado.

$L_{2s} = 1$ (eje equivalente de 18 kips).

2.2.12 Determinación del ESAL

Debido a la gran cantidad de tipos de vehículos y ejes, se ha optado por convertir estos a un eje estandarizado conocido como ESAL (Equivalent Single Axle Load). Este eje fue planteado y creado por la AASHO Road Test, y su carga corresponde a 18 kips u 8.2 toneladas.

Para diseñar la estructura del pavimento es imprescindible conocer el número de ejes simples equivalentes acumulados de vehículos comerciales en el carril más solicitado y en el período de diseño, este parámetro se calcula con la ecuación 2.7 si el crecimiento vehicular es exponencial:

$$ESAL = TPD \cdot \%V_C \cdot F_D \cdot F_L \cdot F_{Proy} \cdot FC \cdot 365 \quad (2.7)$$

Donde:

TPD : Tráfico promedio diario.

$\%V_C$: Porcentaje de vehículos comerciales.

F_D : Factor de distribución por dirección.

F_L : Factor de distribución por carril.

F_{Proy} : Factor de proyección del tráfico.

FC : Factor camión o de carga.

Si el crecimiento vehicular corresponde a otro tipo de ajuste como puede ser lineal, polinomial o logarítmico, la determinación del ESAL viene dada por la expresión 2.8.

$$ESAL = \int_a^b f(x) dx \cdot F_D \cdot F_L \cdot FC \cdot 365 \quad (2.8)$$

Donde:

$f(x)$: Ecuación de proyección del tráfico.

2.2.13 Confiabilidad

La confiabilidad es la variable que sirve para disminuir el grado de incertidumbre en el proceso de diseño, o en otras palabras, funciona como un factor de seguridad para que el pavimento resista adecuadamente las cargas del tráfico para el período que

fue diseñado. Su valor depende del nivel de certeza que se desee sobre las variables que intervienen en el diseño, como, por ejemplo: el tráfico, suelos, materiales, etc [15].

La guía de diseño AASHTO 93 menciona lo siguiente: "La confiabilidad del diseño de un pavimento es la probabilidad de que la estructura diseñada se desempeñe satisfactoriamente en todo el período de diseño ante las cargas del tráfico y las condiciones ambientales".

En la tabla 2.6 se indican los intervalos de confiabilidad según el tipo y la zona de vía recomendados por la guía de diseño AASHTO 93.

Tabla 2.6: Confiabilidad de acuerdo al tipo de vía [1]

Tipo de vía	Urbanas (%)	Rurales (%)
Interprovincial	85-99.9	80-99.9
Arterias Principales	80-99	75-95
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

2.2.14 Desviación estándar

Dentro del proceso de diseño de pavimentos se incluye el parámetro conocido como desviación estándar, que sirve para contemplar la variabilidad de los materiales y procesos constructivos. La guía de diseño AASHTO 93 recomienda usar los siguientes valores (ver tabla 2.7).

Tabla 2.7: Valores de desviación estándar según el tipo de pavimento [1]

Condición de diseño	Rígido	Flexible
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito	0.35	0.45
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito	0.40	0.50

2.3 Suelos y Materiales

La estructura del pavimento se constituye por capas superpuestas de distintos materiales. En primera instancia es importante conocer el tipo de suelo (subrasante) sobre el cual será apoyada la estructura, en base a ello seleccionar los materiales y espesores de las capas superiores, que en el caso de pavimentos flexibles corresponde comúnmente a subbase, base y capa de rodadura, aunque se puede prescindir de la subbase [7]. Los materiales deben caracterizarse de acuerdo a ensayos de laboratorio y cumplir con las especificaciones técnicas que obliga la normativa.

Los parámetros para determinar la resistencia del suelo ante cargas aplicadas se detallan a continuación.

2.3.1 California Bearing Ratio

Este parámetro mide la resistencia de los materiales a la penetración de la subrasante, y materiales de las capas base, subbase de muestras compactadas en laboratorio. El procedimiento según la Norma ASTM 1883, es el siguiente:

Un pistón de 3 pulgadas cuadradas presiona sobre un espécimen de material de 6 pulgadas de diámetro y 5 pulgadas de profundidad, el cual es previamente compactado a la humedad óptima y densidad máxima (ensayo proctor Norma ASTM D698). La velocidad de carga es de 0.05 pulgadas por minuto. La carga requerida para penetrar el suelo se va midiendo a intervalos especificados.

Los resultados son comparados con la curva de penetración estándar de la piedra picada propuesta por la AASHTO. Se compara los valores de esfuerzo a 0.01 y 0.02 pulgadas, si ambos valores de esfuerzos son cercanos se elige el que corresponde a los 0.01 pulgadas, pero si tienen una diferencia considerable se debe realizar nuevamente el ensayo [3]. Es un método sencillo de ejecutar, sin embargo, es muy sensible a la preparación de la muestra.

En la figura 2.7 se muestra la curva de esfuerzo vs. deformación del ensayo CBR.

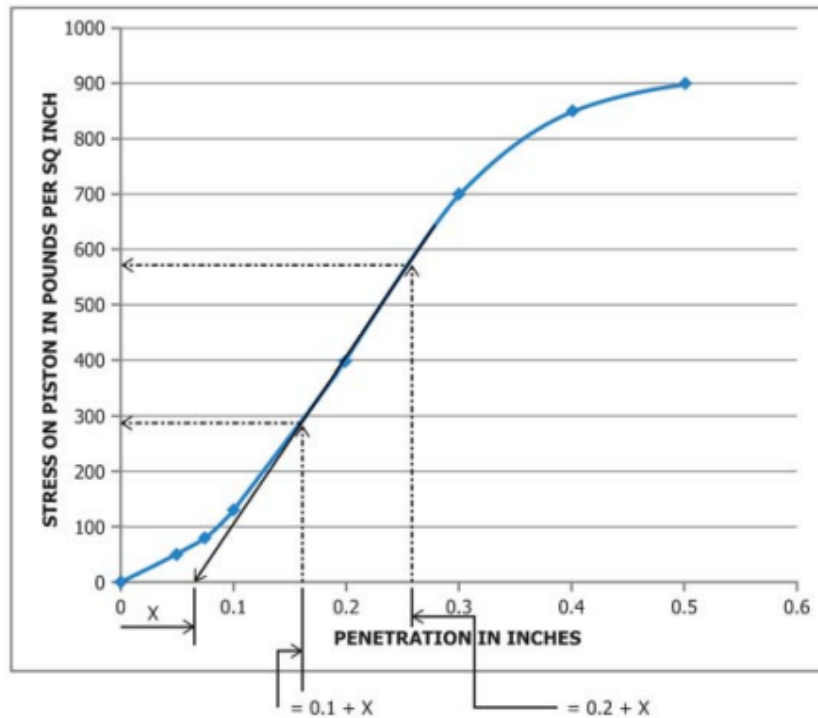


Figura 2.7: Determinación del valor CBR aplicando corrección a la curva de esfuerzo vs. deformación [3]

2.3.2 Valor de resistencia R

Mide la capacidad que tiene el suelo para soportar cargas. El valor de resistencia R o Valor- R , es el resultado de una prueba realizada con un estabilómetro (Norma ASTM D2844). Una muestra cilíndrica de 4 pulgadas de diámetro y 2.5 pulgadas de altura es confinada con una membrana y cargada verticalmente sobre toda la cara superior. El dato obtenido de esta prueba es la presión horizontal generada en el material que sirve para calcular el Valor- R . Para garantizar que la muestra esté saturada, el estado de California utiliza una presión de exudación de 240 psi (1.7 MPa), mientras que el estado de Washington utiliza 300 psi (2.1 MPa). El Valor- R fluctúa en el rango de 0 a 100.

$$R = 100 - \frac{100}{\frac{2.5}{D} \cdot \left(\frac{P_v}{P_h}\right) + 1} \quad (2.9)$$

Donde:

P_v : Presión vertical aplicada, $P_v = 11.2 \frac{kg}{cm^2}$.

P_h : Presión horizontal en el manómetro ($\frac{kg}{cm^2}$)

D : Desplazamiento horizontal de la muestra, medido con el número de vueltas que da la manivela para pasar de P_h a $7 \frac{kg}{cm^2}$.

2.3.3 Módulo resiliente

2.3.3.1 Definición

Los materiales utilizados en el diseño de pavimentos por lo general no tienen un comportamiento elástico, sino que luego de aplicarles una carga estos presentan deformaciones permanentes.

Según varios análisis se ha podido determinar que, si la carga es pequeña en relación con la resistencia que presenta el material, y si esta se repite muchas veces, la deformación luego de cada repetición puede comportarse elásticamente (ver figura 2.8) [9].

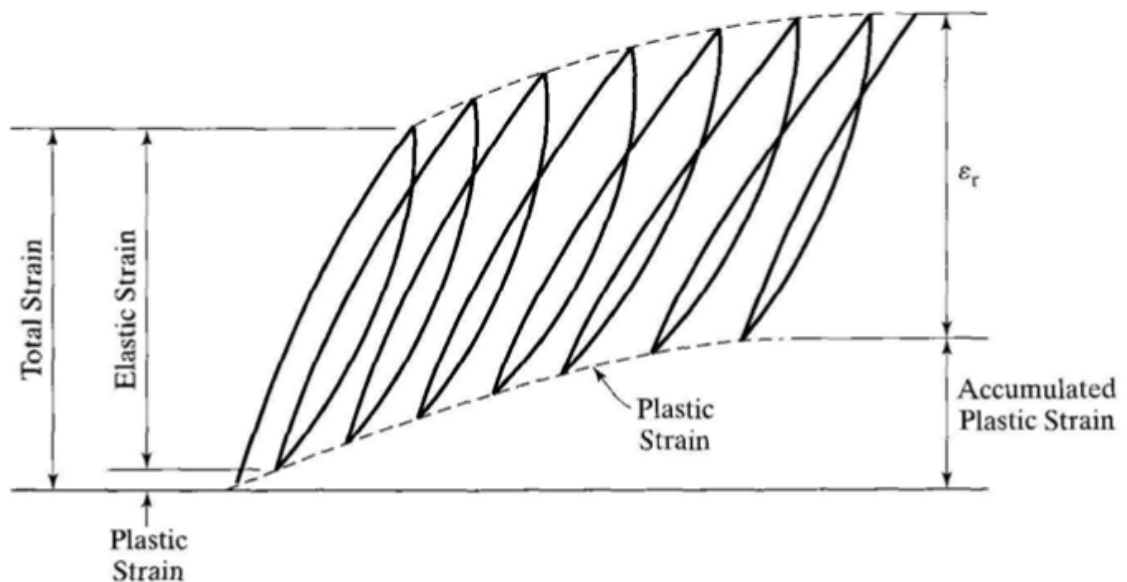


Figura 2.8: Deformaciones bajo cargas repetidas [9]

El módulo elástico basado en la deformación recuperable bajo cargas repetidas se llama módulo resiliente M_R , y se obtiene con la ecuación 2.10:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2.10)$$

Donde:

σ_d : Esfuerzo desviador en el ensayo triaxial.

ϵ_r : Deformación plástica recuperable.

Según varios análisis llevados a cabo sobre el M_R de los materiales, este depende de muchos factores como: número de aplicaciones del esfuerzo, tixotropía, magnitud del esfuerzo desviador, método y condiciones de compactación.

2.3.3.2 Correlaciones entre el módulo resiliente y otros ensayos

El módulo resiliente se debe determinar mediante el ensayo triaxial dinámico. Sin embargo, se pueden utilizar ecuaciones o tablas de correlación usualmente con el CBR y el Valor-R.

Heukelom y Klomp (1962) propusieron la siguiente correlación:

$$M_R(\text{psi}) = B \cdot \text{CBR}(\%) \quad (2.11)$$

Para un CBR menor o igual a 10%, el valor de B es 1500, aunque el valor puede variar entre 750 a 3000. La ecuación 2.11 se recomienda utilizar en suelos finos con CBR saturado menor al 10%.

El Instituto del Asfalto en 1982 planteó la siguiente correlación en función del Valor-R:

$$M_R(\text{psi}) = A + B \cdot R \quad (2.12)$$

Para un Valor-R menor o igual a 20 se recomienda un valor de A igual a 1000 y un valor de B de 555. El rango de variación para A es de 772 a 1155, mientras que para B varía entre 369 a 555.

Paterson and Maree en 1978 recomendaron la siguiente correlación:

$$M_R(\text{psi}) = 2555 \cdot [\text{CBR}(\%)]^{0.64} \quad (2.13)$$

En la figura 2.9 se muestra la carta de correlaciones para estimar el M_R a partir de varios parámetros de resistencia.

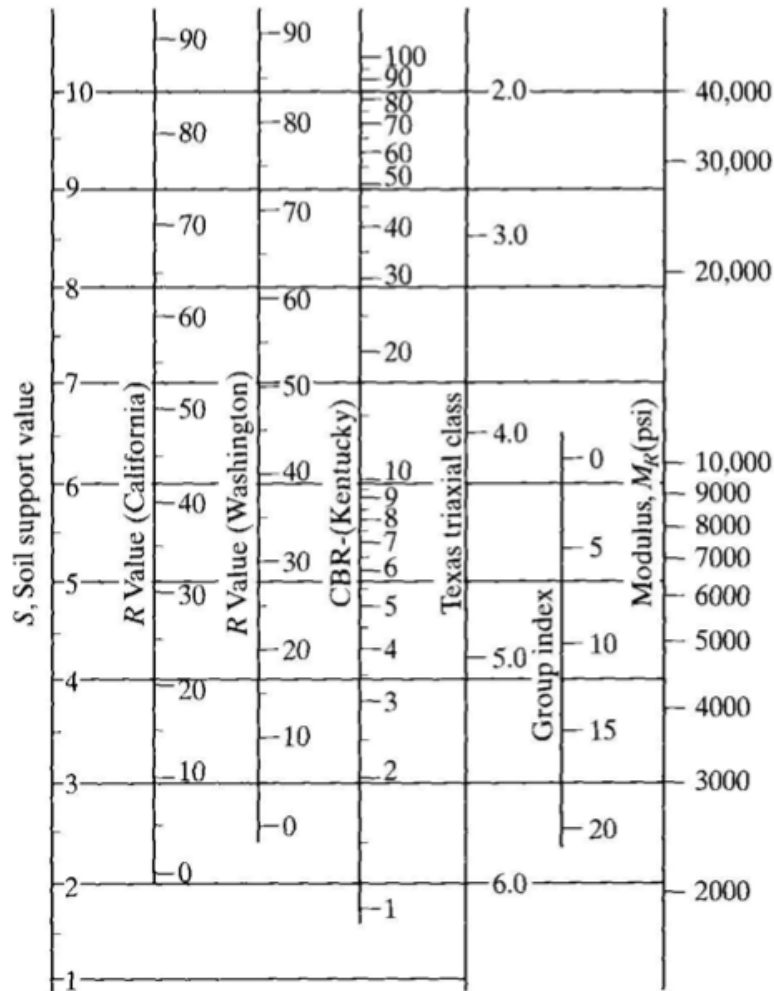


Figura 2.9: Carta de correlaciones para estimar el M_R [9]

2.3.3.3 Análisis de daño relativo y el módulo resiliente efectivo

La guía de diseño AASHTO 93 plantea el cálculo para la obtención del módulo resiliente efectivo de la subrasante mediante el análisis de daño relativo. Se considera ejecutar un estudio de la variabilidad del M_R de acuerdo a las condiciones de humedad y temperatura del suelo. El propósito es cuantificar el daño relativo al que estará sometida la estructura del pavimento según la estación del año. El mínimo período para cada año debe ser de 15 días y las condiciones a las que será sometido el suelo deben arrojar resultados distintos para cada período [8].

La guía de diseño AASHTO 93 establece el siguiente proceso para determinar el M_R efectivo resultante de la combinación entre los módulos estacionales:

- a. Colocar los módulos estacionales en sus períodos de tiempo.

- b. Calcular los valores del daño relativo correspondiente a cada módulo estacional. Para ello se utilizará la ecuación que se indica a continuación:

$$u_f = 1.18 \cdot 10^8 \cdot M_R^{-2.32} \tag{2.14}$$

Donde:

M_R : Módulo resiliente de la subrasante (psi).

u_f : Daño relativo.

- c. Determinar el daño relativo promedio.
- d. Finalmente se calcula el M_R efectivo con la ecuación 2.14 tomando el valor promedio del daño relativo. La figura 2.10 presenta un ábaco para estimar el M_R a partir del daño relativo.

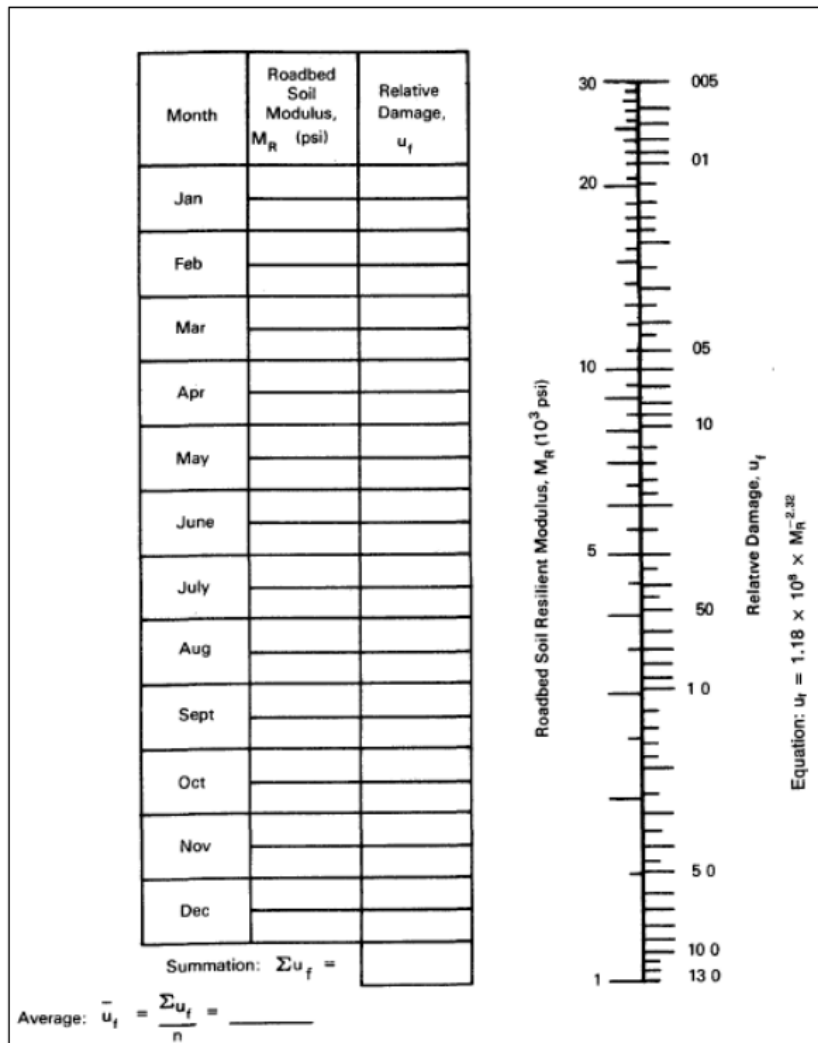


Figura 2.10: Ábaco para estimar el módulo resiliente [9]

2.3.4 Granulometría de los materiales

La granulometría de un árido muestra su distribución en tamaños (ver figura 2.11). Para obtener la curva de distribución se elabora ensayos en laboratorio haciendo pasar el material a través de una serie de tamices con tamaños de abertura decrecientes, y pesando la cantidad de material retenido en cada uno. Existen dos series de tamices, la primera se conoce como serie mayor o gruesa, mientras que la segunda se llama serie menor o fina [11].

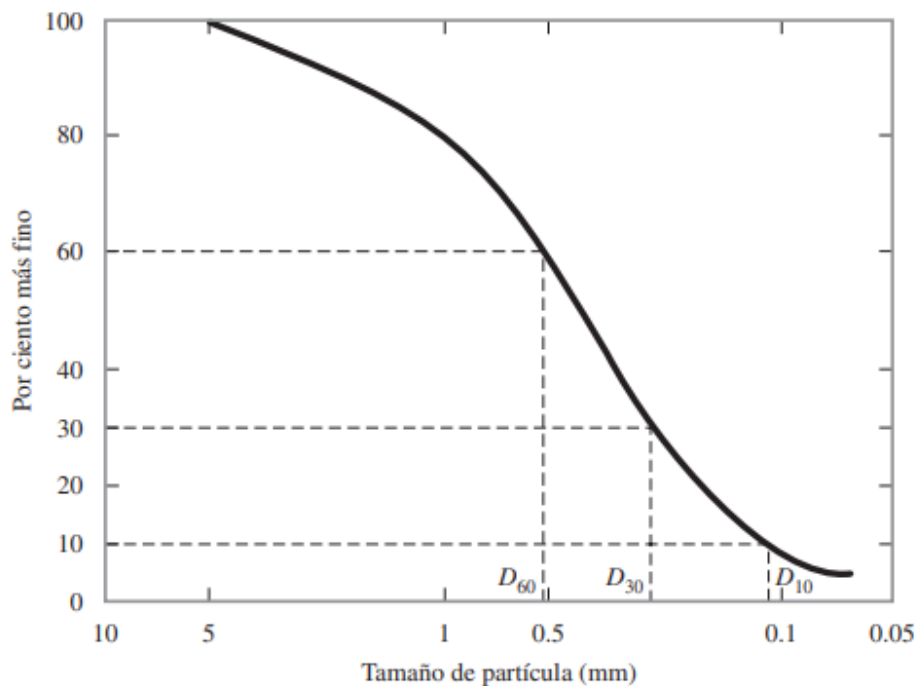


Figura 2.11: Curva granulométrica y definición de D_{10} , D_{30} y D_{60} [4]

Por lo general, en las curvas granulométricas se utiliza la siguiente terminología:

- Árido grueso: material retenido en el tamiz número 10.
- Árido fino: material que pasa por el tamiz número 10.
- Filler: material fino que en su mayoría pasa el tamiz número 200.
- Tamaño máximo de un árido: corresponde al menor tamiz por el que pasa la totalidad de la muestra.
- Coeficiente de uniformidad: indica la uniformidad del material, mientras más cercano a cero, este es más uniforme. Se determina mediante la siguiente

expresión:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.15)$$

Donde:

C_u : Coeficiente de uniformidad.

D_{60} : Diámetro correspondiente al 60% más fino en la curva de distribución de tamaño de partícula.

D_{10} : Diámetro correspondiente al 10% más fino en la curva de distribución de tamaño de partícula.

- Coeficiente de concavidad: mide el grado de curvatura de la granulometría, un material bien graduado posee un porcentaje de vacíos menor [4].

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (2.16)$$

Donde:

C_c : Coeficiente de concavidad.

D_{30} : Diámetro correspondiente al 30% más fino en la curva de distribución de tamaño de partícula.

En la figura 2.11 se indican los diámetros explicados anteriormente.

2.3.5 Límites de consistencia

En 1900, un científico sueco llamado Albert Mauritz Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad. Con un contenido de humedad muy bajo, el suelo se comporta más como un sólido quebradizo. Cuando el contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Por lo tanto, sobre una base arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido [4].

El contenido de humedad en el punto de transición del estado semisólido al estado plástico es el límite plástico PL , y del estado plástico al estado líquido es el límite líquido LL [4]. Estos límites son también conocidos como límites de Atterberg. El índice de plasticidad PI es la diferencia entre el límite líquido LL y el límite plástico

PL de un suelo [4].

$$PI = LL - PL \tag{2.17}$$

Arturo Casagrande (1932) estudió la razón del índice de plasticidad con el límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales [4]. En la figura 2.12 se presenta la carta de plasticidad sobre la base de resultados de la prueba [4].

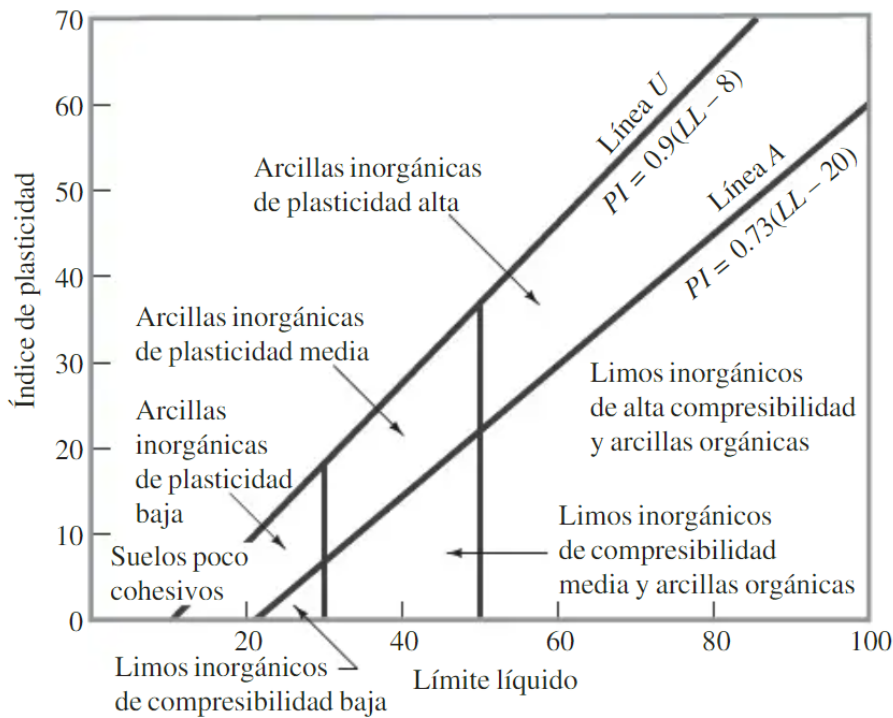


Figura 2.12: Carta de plasticidad [4]

2.3.6 Clasificación de los suelos

La cantidad de suelos que se tiene en la naturaleza es extensa por lo que se han desarrollado métodos de clasificación según el campo de aplicación y el uso que vayan a tener los mismos [7]. Los suelos son clasificados básicamente según la granulometría y los límites de consistencia. Dentro del campo del diseño de pavimentos los dos mecanismos de clasificación mayormente empleados son:

2.3.6.1 SUCS

El autor de esta clasificación fue Arturo Casagrande, propuesto en el año 1942 para su uso en los trabajos de construcción de aeropuertos (ver figura 2.13).

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW
		Menos de 5% finos ^a	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GP
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Gravas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	GM
		Más de 12% finos ^{a,d}	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GC
		Arenas limpias	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	SW
		Menos de 5% finos ^b	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SP
	Arenas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	SM	
	Más de 12% finos ^{b,d}	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	SC	
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^e	CL
		Orgánico	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^e	ML
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Límite líquido: secado < 0.75 ; vea la figura 4.2; zona OL	OL
		Orgánico	Límite líquido: no secado	OL
		Inorgánico	Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	CH
		Orgánico	Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2)	MH
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico			Pt

^aGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^bArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

^dSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

^eSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

Figura 2.13: Clasificación de suelos según SUCS [4]

2.3.6.2 AASHTO

Los suelos están clasificados en ocho grupos designados por los símbolos del A-1 al A-8 de acuerdo a su comportamiento (ver figuras 2.14 y 2.15).

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Figura 2.14: a) Clasificación de suelos según la AASHTO [4]

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)			
				A-7 A-7-5* A-7-6†
<i>Grupo de clasificación</i>	A-4	A-5	A-6	
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo			

*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$

†Para A-7-6, $PI > LL - 30$

Figura 2.15: b) Clasificación de suelos según la AASHTO [4]

2.3.7 Combinación de áridos

En el campo de los pavimentos, muy a menudo es necesario mezclar varios áridos para generar una granulometría deseada, de acuerdo con las especificaciones técnicas de cada país o región. Para ello, primeramente, se debe conocer la granulometría de cada árido que será parte de la combinación, y se calcula el porcentaje que debe aportar cada uno para conseguir la granulometría de interés. Se explican dos maneras de realizar la combinación: la primera con el método de tanteo y la segunda con el método de mínimos cuadrados.

- **Método analítico - combinación por tanteos:** en esta metodología se hace uso de la ecuación 2.18 para un número de tamices de la serie:

$$aA + bB + cC = T \tag{2.18}$$

Donde:

A, B, C : Porcentaje que aporta cada árido.

a, b, c : Porcentaje respectivo correspondiente al tamiz dado X , expresado en fracción decimal.

T : Valor correspondiente al tamiz X en la granulometría combinada.

Por lo que, el número de ecuaciones disponibles es igual al número de tamices utilizados en la granulometría del material. Esto provoca que el número de ecuaciones sea mayor al número de incógnitas, pero se debe tener presente otra ecuación, que la suma de los porcentajes que aporta cada tolva debe ser igual a 100% o expresados en fracciones decimales igual a 1.

$$A(\%) + B(\%) + C(\%) = 100 \quad (2.19)$$

Este proceso requiere de un correcto análisis en cuanto a los áridos que aportan material en cierto tamiz, en algunos casos se puede despreciar el porcentaje pasante de algún material, si este es mínimo comparado con el resto de áridos. Por esto, es necesario de un buen criterio al manejar granulometría de áridos [11].

- **Método de mínimos cuadrados:** este método plantea la solución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \sum AN' \\ \sum BN' \\ \sum CN' \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum A^2 & \sum AB & \sum AC & \dots \\ \sum BA & \sum B^2 & \sum BC & \dots \\ \sum CA & \sum CB & \sum C^2 & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a' \\ b' \\ c' \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Donde:

A, B, C : Porcentaje pasante de cada tolva en cierto tamiz.

N : Valor medio entre los límites de la normativa.

a', b', c' : Porcentaje que debe aportar cada tolva en fracción decimal.

Para resolver el sistema de ecuaciones se calcula la matriz inversa y se multiplica por el vector independiente, obteniéndose el vector solución que representa el porcentaje en fracción decimal de cada tolva. Una vez conocido el vector solución se procede a sumar los porcentajes que aporta cada árido para obtener el valor de 1, que no siempre sucede. Por lo tanto, se debe aplicar una regla de tres simple a los valores calculados, y con esos resultados se procede a hacer la granulometría combinada. Es importante mencionar que valores negativos no son válidos en la determinación de estos porcentajes.

2.3.8 Especificaciones técnicas de las capas del pavimento flexible según la NEVI-12

Para diseñar y construir las capas que componen los pavimentos flexibles en el Ecuador, es necesario basarse en la normativa que impone el Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP, haciendo cumplir todas las especificaciones técnicas de cada material para garantizar el buen funcionamiento de la estructura del pavimento.

2.3.8.1 Subrasante

Si luego de analizar el comportamiento de la subrasante se la considera como un material pobre con $CBR < 6\%$, es necesario reemplazar el material inadecuado por un material de mejoramiento [6]. Como material de mejoramiento se puede usar suelo seleccionado, estabilización con cal, estabilización con material pétreo y membranas sintéticas [13]. Este material debe cumplir con las siguientes características:

- Ser suelo granular, material rocoso o una combinación de los dos.
- Libre de material orgánico y escombros.
- Tener una granulometría en el que todas sus partículas pasen por el tamiz con abertura cuadrada de 4" (100 mm) y máximo el 20% puede pasar por el tamiz #200 (0.075 mm) según el ensayo AASHTO-T.11.
- El material que pase el tamiz #40 (0.425 mm) debe tener un PI menor que 9% y un LL hasta 35% si se cumple que el CBR es mayor al 10%.

2.3.8.2 Subbase

Subbase Granular: debe cumplir con las siguientes características para ser empleada en la construcción de carreteras [13].

- Tener un coeficiente de desgaste mayor al 50% de acuerdo al ensayo de abrasión de los Ángeles.
- El material que pasa el tamiz #40 deberá tener un PI menor que 6% y un LL máximo de 25%.
- Todas las clases de subbase deben tener un CBR igual o mayor que 30%.

En la tabla 2.8 se indican las clases de subbases granulares.

Tabla 2.8: Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para subbase [13]

Tamiz		Subbase clase 1		Subbase clase 2		Subbase clase 3	
Pulgadas	mm	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
3	76.2	-	-	-	-	-	100
2	50.4	-	-	-	100	-	-
1 1/2	38.1	-	100	70	100	-	-
No. 4	4.75	30	70	30	70	30	70
No. 40	0.425	10	35	15	40	-	-
No. 200	0.075	0	15	0	20	0	20

Subbase del suelo estabilizado con Cal:

- Los suelos deben estar limpios y no tener materia orgánica en más del 3% de su peso.
- La fracción del material que pasa el tamiz #40 debe tener un *PI* entre 10% y 50%.
- El tamaño del agregado grueso no debe ser mayor a 1/3 del espesor de la capa compactada del suelo-cal.
- La mezcla debe tener un CBR mayor o igual que 40%.

2.3.8.3 Base

Base Granular: todas deben cumplir con las siguientes propiedades:

- El *LL* del material que pasa el tamiz #40 debe ser menor que 25% y el *PI* menor a 6%.
- El porcentaje de desgaste por abrasión de los agregados será menor a 40%.
- El CBR debe ser igual o superior al 80%.
- Los agregados deben ser limpios, sólidos y resistentes, no contener polvo, suciedad, arcilla o materias extrañas.

En la tabla 2.9 se indican las bases recomendadas de acuerdo al tipo y uso de la vía [13].

Tabla 2.9: Recomendaciones para uso de material de base [13]

Material Especificado	Tipo de carretera	No. Carriles	TPDA
BASE CLASE 1	Para uso principalmente en aeropuertos y carreteras con alto nivel de tráfico	8 a 12	>50'000
BASE CLASE 2	Carreteras de 2 hasta 6 carriles con un ancho mínimo por carril de 3.65 m. Se incluye franja central desde 2 a 4 m.	2 a 6	8'000-50'000
BASE CLASE 3	Vías internas de urbanizaciones con bajo nivel de tráfico	2 a 4	1'000-8'000
BASE CLASE 4	Caminos vecinales	2	<1'000

En las tablas 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13 se indican las clases de bases granulares.

Tabla 2.10: Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 1 [13]

Tamiz		Base Clase 1 Tipo A		Base Clase 2 Tipo B	
Pulgadas	mm	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
2	50	-	100	-	100
1 1/2	37.5	70	100	70	100
1	25	55	85	60	90
3/4	19	50	80	45	75
3/8	9.5	35	60	30	60
No. 4	4.75	25	50	20	50
No. 10	2	20	40	10	25
No. 40	0.425	10	25	2	12
No. 200	0.075	2	12	-	-

Tabla 2.11: Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 2 [13]

Tamiz		Base Clase 2	
Pulgadas	mm	Mín.	Máy.
2	50	-	100
1 1/2	37.5	70	100
1	25	55	85
3/4	19	47	75
3/8	9.5	35	65
No. 4	4.75	25	55
No. 10	2	15	45
No. 40	0.425	5	25
No. 200	0.075	0	10

Tabla 2.12: Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 3 [13]

Tamiz		Base Clase 3	
Pulgadas	mm	Mín.	Máy.
2	50	-	100
1	25	70	100
3/4	19	60	90
3/8	9.5	40	75
No. 4	4.75	30	60
No. 10	2	15	45
No. 40	0.425	10	30
No. 200	0.075	0	15

Tabla 2.13: Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada para Base Clase 4 [13]

Tamiz		Base Clase 4	
Pulgadas	mm	Mín.	Máy.
2	50	-	100
1	25	60	90
No. 4	4.75	20	50
No. 200	0.075	0	15

Base de agregados estabilizados con cemento hidráulico: se aplica cuando los agregados no cumplen con las especificaciones de una base granular. Esta base se compone de agregados triturados o cribados, o una combinación de los dos, junto con cemento y agua. Una vez realizada la mezcla se debe realizar ensayos de compresión simple para verificar que la resistencia no sea menor a 2.45 MPa ($25 \frac{kg}{cm^2}$) [13].

Base de hormigón asfáltico: conformada por agregados triturados o cribados mezclado en el camino o en planta con material bituminoso. La estabilidad de Marshall para la mezcla asfáltica debe ser mínimo de 750 lb [13].

Base de Suelo Cemento: es una mezcla de suelo, cemento portland y agua, que pueden ser preparadas en sitio con el suelo de la subrasante, o en planta central. El ensayo a compresión simple debe dar un valor mínimo de $18 \frac{kg}{cm^2}$ [13].

2.3.9 Cálculo del contenido de asfalto óptimo: Método de Marshall

A continuación, se detallan algunas consideraciones a tener en cuenta antes de determinar el contenido de asfalto óptimo [11].

- Granulometría de los áridos: se recomiendan áridos de granulometría densa, la estabilidad crece con su tamaño máximo.
- Tipo de áridos: las mezclas serán más estables si se trabaja con áridos calizos triturados y arenas con partículas angulosas.
- Calidad de los áridos: áridos con partículas duras, estables y limpios.
- Contenido de asfalto: contenidos muy altos de asfalto generan inestabilidad, mientras que contenidos muy bajos producen desintegración.
- Consistencia del asfalto: asfaltos duros conllevan a pavimentos muy quebradizos.
- Calidad del betún asfáltico: no debe ser procedente de un proceso de cracking.
- Cuando los áridos presentan formas angulosas atribuyen al pavimento una mayor resistencia ante las cargas verticales. Si las partículas son redondeadas su estabilidad es menor y su resistencia se debe principalmente a la rugosidad de las partículas.

- El porcentaje de vacíos dentro de la mezcla asfáltica debe estar entre 2 y 6% del volumen total. Si el porcentaje de vacíos es bajo (menor a 2%) el pavimento tiende a presentar exudación y se vuelve antideslizante, si el porcentaje es alto (mayor a 6%) puede darse desprendimientos de los agregados.
- Porcentaje de densidad teórica: la densidad deseable para hormigones asfálticos varía entre 94% y 98%.
- La suma del porcentaje de vacíos en el pavimento y el volumen en porcentaje ocupado por el betún asfáltico corresponde al contenido de vacíos de los áridos (VA). Es importante poder reducir este parámetro mediante una adecuada distribución de tamaños, sin embargo, no es recomendable utilizar un exceso de áridos que pasen el tamiz #200.

2.3.9.1 Parámetros para el diseño de la mezcla asfáltica

Seleccionar la granulometría: es preferible utilizar las mezclas con mayor tamaño de áridos debido a que presentan una estabilidad alta ante las cargas. Así mismo, requieren menor cantidad de asfalto, que se traduce a una mezcla más económica.

Selección de áridos: recurrir a materiales más económicos que cumplan con la calidad requerida, es recomendable obtener una granulometría combinada con la menor cantidad de áridos, y que estos sean cercanos al sitio de construcción.

Pesos específicos:

- Gravedad específica aparente por unidad de volumen (bulk) G_{sb} : volumen total que incluye las cavidades de las partículas de los áridos que se llenan con agua en inmersión de 15 a 19 horas [10].
- Gravedad específica aparente G_{sa} : porción impermeable de la piedra, prescindiendo del volumen de los capilares que se llenan de agua en inmersión de 15 a 19 horas [10].
- Gravedad específica efectiva G_{se} : se refiere al volumen de la piedra impermeable y al volumen de los capilares que no han sido llenados de asfalto [10].

Cuando se emplean los dos primeros pesos específicos la determinación de la gravedad específica se hace sobre cada tipo de árido utilizado para la mezcla, y luego se obtiene la gravedad específica de los áridos mezclados.

Al emplear la gravedad específica efectiva, la determinación se hace sobre el conjunto de los áridos de la mezcla. La gravedad específica neta se obtiene con la ecuación 2.21:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_i}{\frac{P_1}{G_{s1}} + \frac{P_2}{G_{s2}} + \dots + \frac{P_i}{G_{si}}} \quad (2.21)$$

Donde:

G_{sb} : Gravedad específica de la combinación de áridos.

P_i : Porcentaje en peso correspondiente a cada árido.

G_{si} : Gravedad específica de cada árido.

Proporción de áridos: se obtiene mediante la combinación de entre 2 a 5 tolvas de material mediante los métodos descritos en la sección 2.3.7. Este proceso se realiza para cumplir con las especificaciones técnicas vigentes en cada país.

Gravedad específica teórica máxima de la mezcla G_{mm} : este parámetro se consigue realizando el ensayo RICE (ASTM D 2041-AASHTO T 209). Se puede calcular mediante la ecuación 2.22.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (2.22)$$

Donde:

P_{mm} : Porcentaje total de la mezcla suelta (100%).

P_b : Contenido de asfalto (porcentaje en peso).

P_s : Porcentaje de combinación de los áridos (100- P_b).

G_b : Gravedad específica del asfalto a 25 °C.

G_{se} : Gravedad específica efectiva de los áridos a 25 °C.

Gravedad específica efectiva de los áridos G_{se} :

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (2.23)$$

Donde:

G_{mm} : Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

P_{mm} : Porcentaje total de la mezcla suelta (100%).

P_b : Contenido de asfalto (porcentaje en peso).

G_b : Gravedad específica del asfalto a 25 °C.

Porcentaje teórico de densidad:

$$R = \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \cdot 100 \quad (2.24)$$

Donde:

R : Porcentaje de la densidad máxima a 25 °C.

G_{mb} : Gravedad específica real de la probeta a 25 °C.

G_{mm} : Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

Porcentaje de vacíos en la probeta (VTM): la relación entre los VTM de cada probeta para cierto contenido de asfalto debe ser menor al 20%, caso contrario, se rechazan esas probetas.

$$VTM = 100 - R \quad (2.25)$$

Donde:

VTM : Porcentaje de vacíos en la probeta.

R : Porcentaje de la densidad máxima a 25 °C.

Vacíos en el agregado mineral (VMA):

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \cdot P_s \quad (2.26)$$

Donde:

G_{mb} : Gravedad específica real de la probeta a 25 °C.

G_{sb} : Peso específico de los áridos.

P_s : Porcentaje de combinación de los áridos (contenido en peso).

Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA):

$$VFA = \frac{VMA - (100 - R)}{VMA} \quad (2.27)$$

Donde:

VMA: Vacíos en el agregado mineral.

R: Porcentaje de la densidad máxima a 25 °C.

Determinación de estabilidad y flujo: se determina la estabilidad de cada probeta de acuerdo con el método de proyecto empleado, en este caso, método de Marshall. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida, donde el número total de libras necesario para producir la rotura se anota como valor de su estabilidad Marshall con el valor de fluencia de la probeta expresado en centésimas de pulgada. La estabilidad debe ser corregida de acuerdo al volumen de la probeta, los factores de corrección deben ser multiplicados por la estabilidad obtenida en el ensayo.

Interpretación de resultados: se debe realizar un promedio entre los datos de las probetas correspondientes a cada contenido de asfalto, esto es, promedio de i) peso unitario, ii) estabilidad corregida, iii) flujo, iv) porcentaje de vacíos totales en la mezcla (VTM), v) porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) y vi) porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA). Se realizan gráficos de puntos respecto al contenido de asfalto con su curva de ajuste, que generalmente corresponden a una curva polinómica de segundo grado.

Determinación del contenido óptimo de asfalto:

Según la AIM (Asphalt Institute Method), el contenido óptimo de asfalto es el valor medio de los obtenidos por:

- Máxima estabilidad.
- Máximo peso unitario.
- Valor medio de los límites del % de vacíos de la mezcla total.
- Valor medio de los límites del % de vacíos de los áridos rellenos de asfalto.

Según la NAPA (National Asphalt Pavement Association), el contenido óptimo de asfalto es la media de los límites del porcentaje de vacíos totales (generalmente, 4%).

2.3.9.2 Criterios de diseño Marshall

El contenido de asfalto óptimo debe cumplir los criterios que se muestran en las tablas 2.14 y 2.15 según el tipo de tráfico [10].

Tabla 2.14: Criterios de diseño Marshall [10]

Criterios	Tráfico Bajo		Tráfico medio		Tráfico Alto	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Método de Marshall						
Compactación (Nro. de golpes)	35		50		75	
Estabilidad (lb)	750	-	1200	-	1800	-
Fluencia (0.01")	8	18	8	16	8	14
Vacíos-Aire(%)	3	5	3	5	3	5
VMA (%)	Ver tabla 2.15					
VFA (%)	70	80	65	78	65	75

Tabla 2.15: Mínimo porcentaje de vacíos en el agregado mineral [10]

Tamaño nominal		Porcentaje mínimo VMA		
Máximo de partícula		Vacíos de aire (%)		
mm	Pulgadas	3	4	5
1.18	T #16	21.5	22.5	23.5
2.36	T #8	19	20	21
4.75	T #4	16	17	18
9.5	3/8"	14	15	16
12.5	1/2"	13	14	15
19	3/4"	12	13	14
25	1"	11	12	13
37.5	1 1/2"	10	11	12
50	2"	9.5	10.5	11.5
63	2 1/2"	9	10	11

2.3.9.3 Relaciones gravimétricas y volumétricas

Para una mejor visión de los parámetros involucrados en el diseño de una mezcla asfáltica se presenta la figura 2.16. Las relaciones se indican en la tabla 2.16.

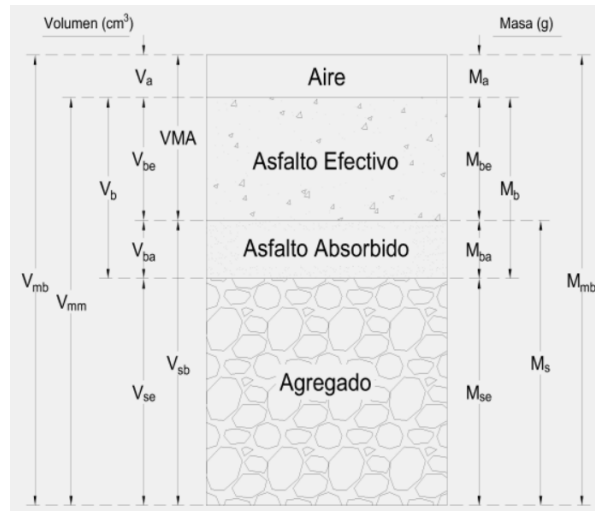


Figura 2.16: Composición de la mezcla asfáltica. Adaptada de Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix types Manual Series No.2 (MS-2) [10]

Tabla 2.16: Relaciones gravimétricas y volumétricas [10]

Símbolo	Descripción	Ecuación
Relaciones volumétricas		
V_{mb}	Volumen total del espécimen compactado	-
V_a	Volumen de vacíos de aire	$V_a = \left(1 - \frac{G_{mm}}{G_{mb}}\right) V_{mb}$
V_{be}	Volumen efectivo de la mezcla asfáltica	$V_{be} = VFA(\%) \cdot VMA(cm^3)$
V_{ba}	Volumen absorbido de la mezcla asfáltica	$V_{ba} = \left(\frac{G_{se}-G_{sb}}{G_{se}G_{sb}}\right) G_b V_{mb}$
V_b	Volumen de la mezcla asfáltica	$V_b = V_{be} + V_{ba}$
V_{mm}	Volumen de la mezcla asfáltica y agregado	$V_{mm} = V_{mb} - V_a$
V_{se}	Volumen efectivo del agregado	$V_{se} = V_{mb} - VMA - V_{ba}$
V_{sb}	Volumen neto (bulk) del agregado	$V_{sb} = V_{mb} - V_a - V_{be}$
VMA	Volumen en el agregado mineral	$VMA = \left(1 - \frac{G_{mb}P_s}{G_{sb}}\right) V_{mb}$
Relaciones gravimétricas		
M_{mb}	Masa total en el espécimen compactado	-
M_a	Masa de vacíos (aire)	-
M_b	Masa de asfalto	$M_b = P_b M_{mb}$
M_s	Masa del agregado	$M_s = M_{mb} - M_b$
M_{ba}	Masa de mezcla asfáltica absorbida	$M_{ba} = \frac{V_{ba}}{V_{mb}} M_s$
M_{be}	Masa de mezcla asfáltica efectiva	$M_{be} = M_b - M_{ba}$
M_{se}	Masa efectiva del agregado	$M_{se} = M_s - M_{ba}$

2.4 Diseño de pavimentos flexibles por el método de la AASHTO

2.4.1 Parámetros de diseño

En esta sección se definen los parámetros que están inmersos en la ecuación propuesta por la AASHTO, la ecuación para el diseño de pavimentos flexibles es:

$$\log(W_{18}) = Z_R \cdot S_o + 9.36 \cdot \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log(M_R) - 8.07 \quad (2.28)$$

Donde:

W_{18} : Número de ejes equivalentes.

Z_R : Nivel de confiabilidad.

S_o : Desviación estándar combinada.

SN : Número estructural.

ΔPSI : Pérdida de serviciabilidad ($P_t - P_o$).

P_o : Índice de serviciabilidad inicial.

P_t : Índice de serviciabilidad final.

M_R : Módulo resiliente de la subrasante (psi).

2.4.1.1 Número estructural SN

El número estructural es un valor que representa la resistencia requerida del pavimento de acuerdo a las capas utilizadas en el diseño. Este valor se utiliza para calcular los espesores de cada capa en función de su coeficiente estructural y de drenaje [9].

2.4.1.2 Coeficiente estructural o de capa

El coeficiente estructural o de capa "a" es una medida de la resistencia que tiene cierto material para resistir las cargas que se le impongan. Este valor puede obtenerse a través de ensayos, como por ejemplo, el AASHTO Road Test, o también mediante correlaciones entre las propiedades del material.

Es recomendable asociar este coeficiente directamente con el valor de módulo resiliente y/o CBR para las capas base, subbase y subrasante [9].

- **Capa de rodadura de hormigón asfáltico:** la figura 2.17 muestra la correlación entre el coeficiente estructural del concreto asfáltico y su módulo de elasticidad. Para asfaltos nuevos, los valores para módulos de elasticidad están en el rango de 300'000 psi a 400'000 psi.

Para determinar el módulo de elasticidad del concreto asfáltico se deben realizar pruebas de laboratorio.

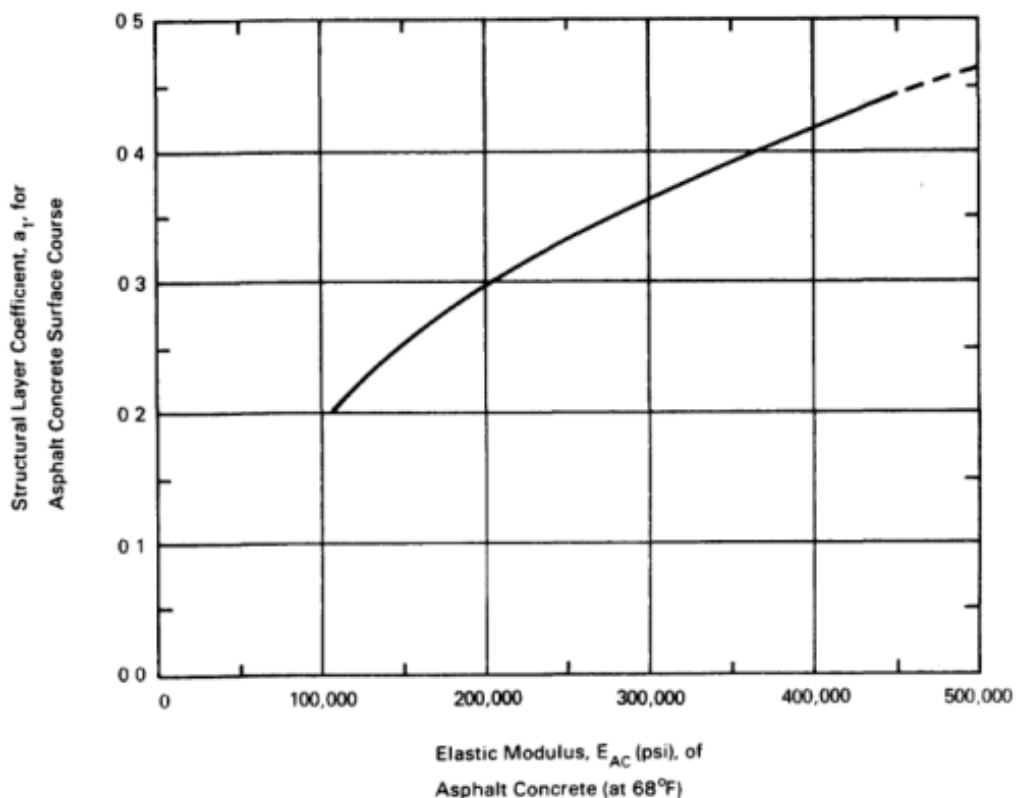


Figura 2.17: Coeficiente estructural de la capa de rodadura de hormigón asfáltico en función al módulo elástico [1]

- **Base granular:** la figura 2.18 muestra la correlación entre el coeficiente estructural de la base granular en función de otros parámetros de resistencia, principalmente se emplea el resultado del ensayo CBR.

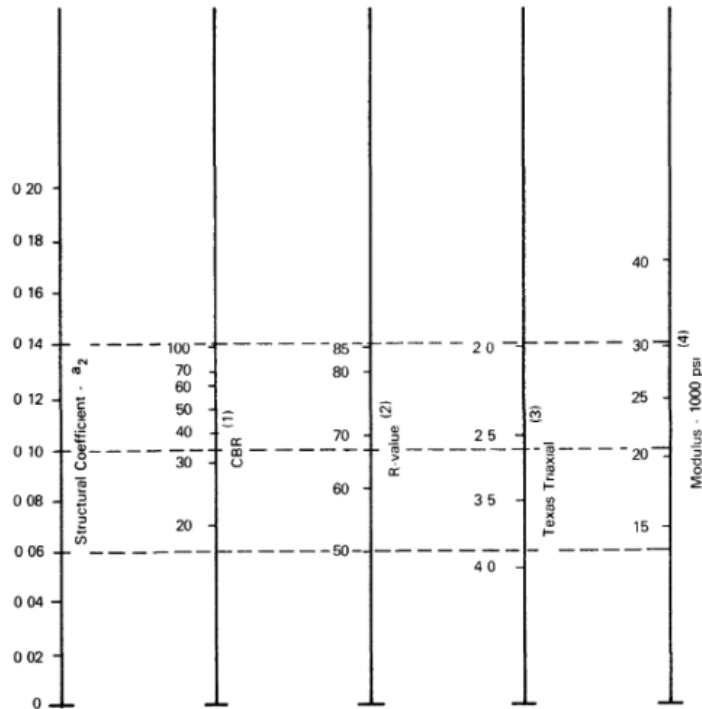


Figura 2.18: Coeficiente estructural para bases granulares [1]

- **Base estabilizada con cemento:** para este tipo de base el coeficiente estructural está correlacionado con la resistencia a la compresión simple y módulo resiliente (ver figura 2.19).

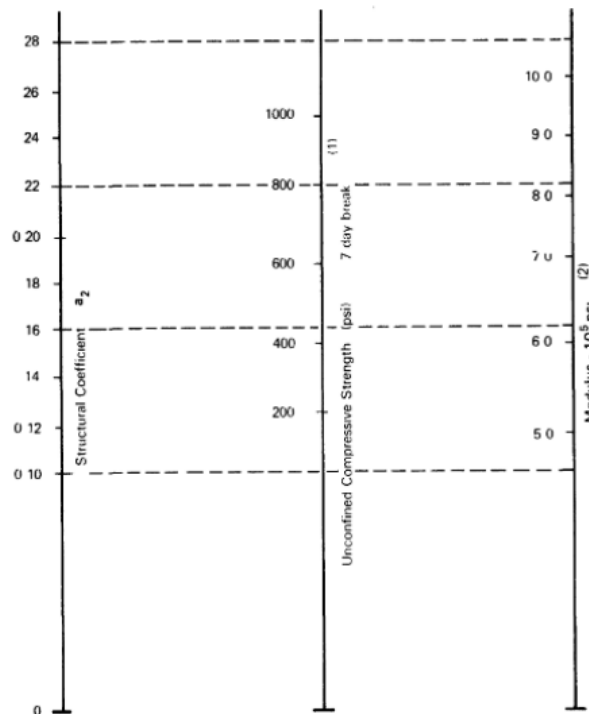


Figura 2.19: Coeficiente estructural para bases estabilizadas con cemento [1]

- **Base estabilizada con emulsión asfáltica:** en este caso el coeficiente estructural está correlacionado con la estabilidad de Marshall y módulo resiliente de la base estabilizada (ver figura 2.20).

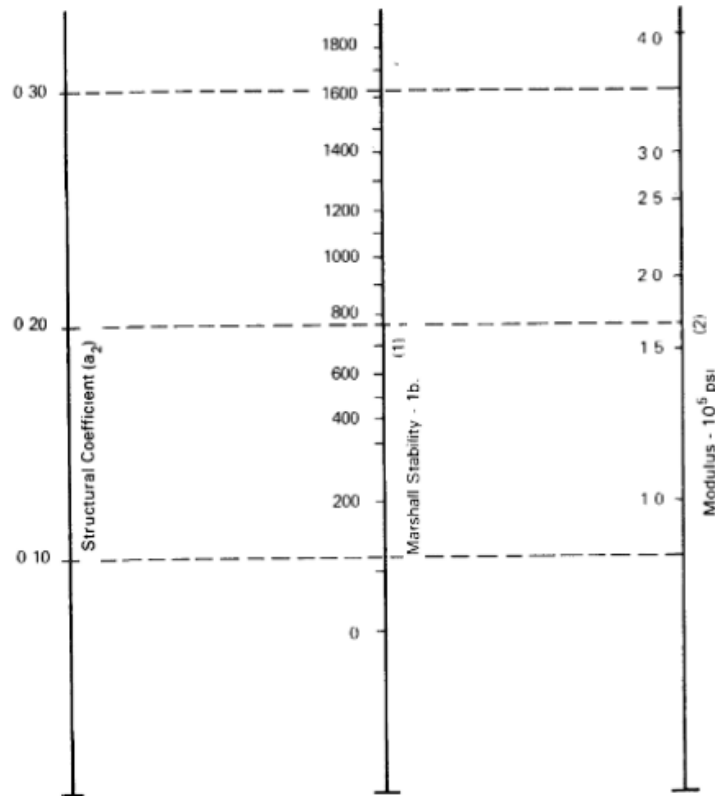


Figura 2.20: Coeficiente estructural para bases estabilizadas con emulsión asfáltica [1]

- **Subbase granular:** la figura 2.21 muestra las correlaciones entre el coeficiente estructural y otros parámetros de resistencia del material. Entre los parámetros relacionados están el módulo resiliente, Valor-R y CBR.

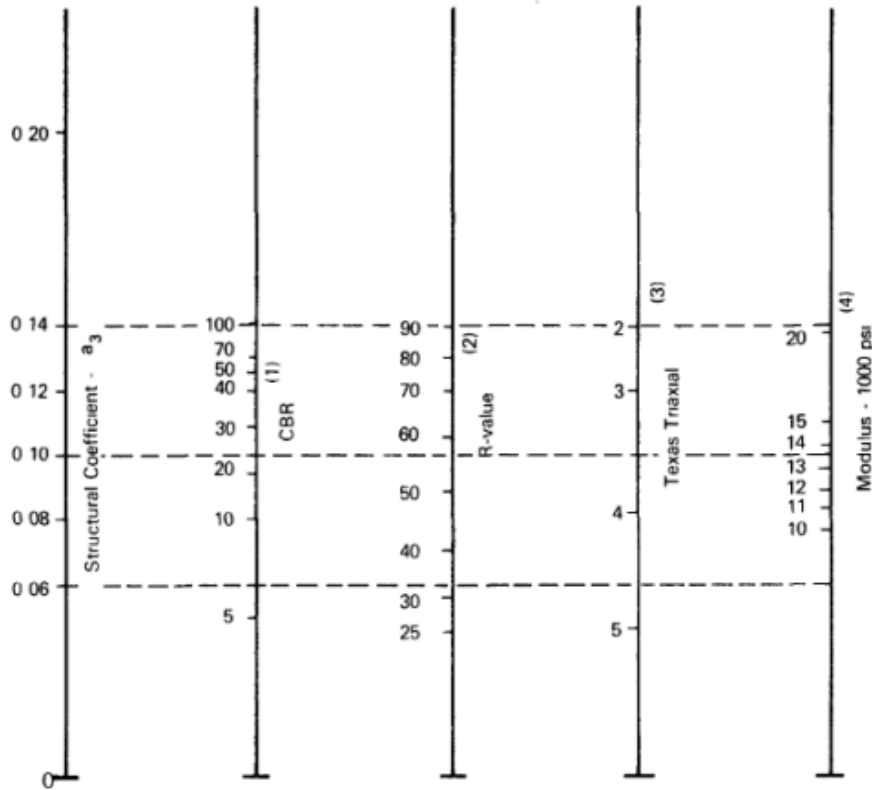


Figura 2.21: Coeficiente estructural para subbases granulares [1]

2.4.1.3 Coeficiente de drenaje

Este valor se utiliza para considerar la calidad de drenaje de los materiales. Se aplican a las bases granulares de acuerdo al tiempo que tarda en eliminar el agua, mientras que para las subbases granulares depende principalmente de su permeabilidad. El tiempo en el que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación depende de la precipitación anual y las condiciones de drenaje que predominan [9]. La tabla 2.17 indica la calidad de drenaje de acuerdo al tiempo que demora en salir el agua del material.

Tabla 2.17: Consideraciones de drenaje [1].

Calidad de drenaje	Tiempo para eliminar agua
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	el agua no drena

La tabla 2.18 proporciona valores recomendados en función de la capacidad del material para eliminar el agua y en función del tiempo durante el cual la estructura está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación [9]

Tabla 2.18: Valores para el coeficiente de drenaje [1].

Calidad de drenaje	Menor al 1%	1-5%	5-25%	Mayor a 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	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	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

2.4.1.4 Espesores mínimos

Por ser impráctico y antieconómico el uso de capas muy delgadas, la AASHTO recomienda los siguientes espesores mínimos para base granular y concreto asfáltico según el número de ejes equivalentes proyectados en el período de diseño (ver tabla 2.19).

Tabla 2.19: Valores mínimos de espesores en pulgadas [1].

Número de ejes equivalentes	Concreto asfáltico	Base granular
Menor a 50'000	1.0 o tratamiento superficial	4.0
50'001 - 150'000	2.0	4.0
150'001 - 500'000	2.5	4.0
500'001 - 2'000'000	3.0	6.0
2'000'001 - 7'000'000	3.5	6.0
Mayor a 7'000.000	4.0	6.0

2.4.2 Proceso de diseño

La metodología AASHTO para pavimentos flexibles plantea calcular inicialmente el SN requerido para toda la estructura. Luego de ello se debe buscar con la ecuación 2.29 un conjunto de espesores que proporcionen un SN igual o mayor al requerido

mediante la ecuación 2.28. Se pueden tener varias combinaciones, sin embargo, el diseño debe contemplar el tema de costos, proceso constructivo y mantenimiento del mismo.

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 \quad (2.29)$$

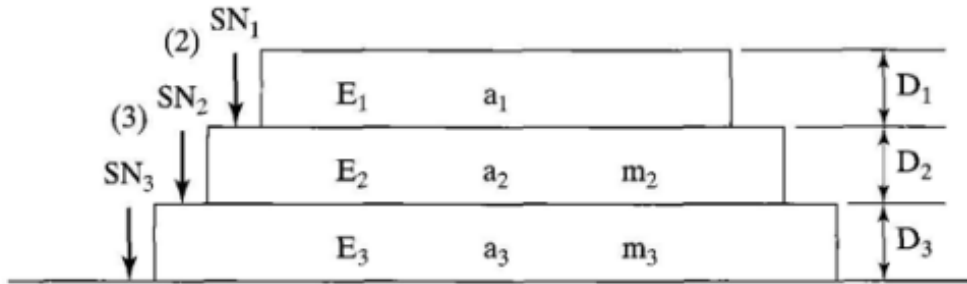


Figura 2.22: Cálculo de espesores [9]

De acuerdo a la figura 2.22 el proceso que se debe seguir para obtener los espesores de las capas del pavimento se muestra a continuación.

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad (2.30)$$

$$SN_1^* = a_1 \cdot D_1^* \geq SN_1 \quad (2.31)$$

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 \cdot m_2} \quad (2.32)$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2 \quad (2.33)$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 \cdot m_3} \quad (2.34)$$

Donde:

SN_1, SN_2, SN_3 : *Números estructurales requeridos por cada capa.*

SN_1^*, SN_2^* : *Números estructurales reales de las capas.*

D_1^*, D_2^*, D_3^* : *Espesores reales de las capas.*

a_1, a_2, a_3 : *Coefficientes estructurales de cada material.*

m_2, m_3 : *Coefficientes de drenaje.*

2.4.3 Hinchazón y congelamiento

La hinchazón y el congelamiento son consideraciones ambientales importantes a tener en cuenta debido a su potencial efecto en la pérdida de serviciabilidad. [1].

- **Hinchazón:** la hinchazón se refiere a los cambios locales de volumen que ocurren en suelos de subrasante expansivos debido a que absorben la humedad [1]. La pérdida de serviciabilidad por hinchazón depende de tres variables: constante de razón de hinchazón, posible ascenso vertical y probabilidad de hinchazón. De considerarse una rehabilitación, el diseñador debe reconocer que la mayor parte del hinchamiento ya habrá ocurrido en los primeros años de la construcción inicial [1].
 - **Constante de razón de hinchazón:** esta constante puede variar entre 0.04 y 0.20 [1]. Se deben utilizar valores mayores y menores para extremos y mínimas exposiciones a la humedad.
 - **Posible ascenso vertical V_R :** representa la cantidad de expansión vertical que puede ocurrir en el suelo de subrasante debido a condiciones extremas de hinchazón [1].
 - **Probabilidad de hinchazón:** representa la proporción de la longitud del proyecto que es susceptible a la hinchazón [1].

La pérdida de serviciabilidad debido a la hinchazón del suelo ΔPSI_{SW} puede ser estimada con la siguiente expresión:

$$\Delta PSI_{SW} = 0.00335 V_R P_s (1 - e^{-\theta t}) \quad (2.35)$$

Donde:

t : Período de diseño (años).

θ : Constante de razón de hinchazón.

P_s : Probabilidad de hinchazón (%).

V_R : Posible ascenso vertical (pulgadas).

- **Congelamiento:** el congelamiento hace referencia a cambios de volumen locales que ocurren en el suelo de subrasante al acumular humedad, este se congela

y produce distorsiones permanentes en la superficie del pavimento [1]. La pérdida de serviciabilidad depende de tres factores: razón de congelamiento, máxima pérdida de serviciabilidad debida al congelamiento y probabilidad de congelamiento [1].

- **Razón de congelamiento:** hace referencia al incremento de la razón de congelamiento en mm/día. [1].
- **Máxima pérdida de serviciabilidad por congelamiento:** depende de la calidad del drenaje y la profundidad de penetración por congelamiento en pies (ver figura 2.23) [1].

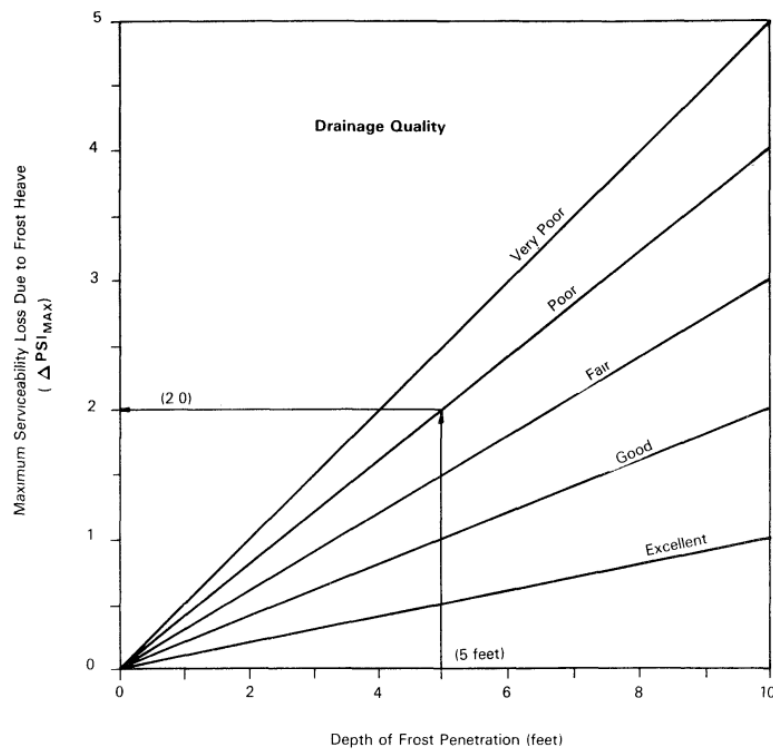


Figura 2.23: Relación de la máxima pérdida de serviciabilidad debida al congelamiento [1]

- **Probabilidad de congelamiento:** representa el porcentaje del área estimado por el diseñador que será susceptible al congelamiento [1].

La pérdida de serviciabilidad debido al congelamiento del suelo ΔPSI_{FH} puede ser estimada con la siguiente expresión:

$$\Delta PSI_{FH} = 0.00335 P_f \Delta PSI_{MAX} (1 - e^{-0.02 \phi t}) \tag{2.36}$$

Donde:

t : Período de diseño (años).

ϕ : Razón de congelamiento (mm/día).

P_f : Probabilidad de congelamiento (%).

ΔPSI_{MAX} : Máxima pérdida de serviciabilidad por congelamiento.

La pérdida de serviciabilidad considerando el tráfico y condiciones ambientales por hinchazón y/o congelamiento se determina con la siguiente expresión:

$$\Delta PSI = \Delta PSI_{TR} + \Delta PSI_{SW,FH} \quad (2.37)$$

Donde:

ΔPSI : Pérdida de serviciabilidad.

ΔPSI_{TR} : Pérdida de serviciabilidad debida al tráfico.

$\Delta PSI_{SW,FH}$: Pérdida de serviciabilidad por hinchazón y/o congelamiento.

2.4.4 Metodología de diseño de sobrecarpetas

2.4.4.1 Capacidad estructural y deficiencia estructural

La capacidad estructural hace referencia a la resistencia de un pavimento para soportar las cargas repetidas del tráfico a lo largo del tiempo. Sin embargo, debido al deterioro de la estructura, esta capacidad se reduce conforme aumenta el tiempo [1]. Cuando el pavimento entra en funcionamiento presenta una capacidad estructural inicial SC_o , luego de un cierto tiempo se plantea una rehabilitación del mismo porque el pavimento presenta una capacidad estructural menor SC_{eff} que puede ser determinada mediante distintas metodologías. De acuerdo a las condiciones de funcionamiento del pavimento rehabilitado se debe calcular la capacidad estructural requerida SC_f , la diferencia entre el SC_f y SC_{eff} se conoce como deficiencia estructural SC_{ol} [1].

$$SC_{ol} = SC_f - SC_{eff} \quad (2.38)$$

Donde:

SC_{ol} : Capacidad estructural de la sobrecarpeta.

SC_f : Capacidad estructural requerida.

SC_{eff} : Capacidad estructural existente.

En la figura 2.24 se muestra la pérdida de serviciabilidad del pavimento y la pérdida estructural, en base a estos dos parámetros la guía de diseño AASHTO ha planteado el método de diseño para sobrecarpeta, que básicamente es calcular un espesor de sobrecarpeta para que el pavimento recupere su capacidad estructural.

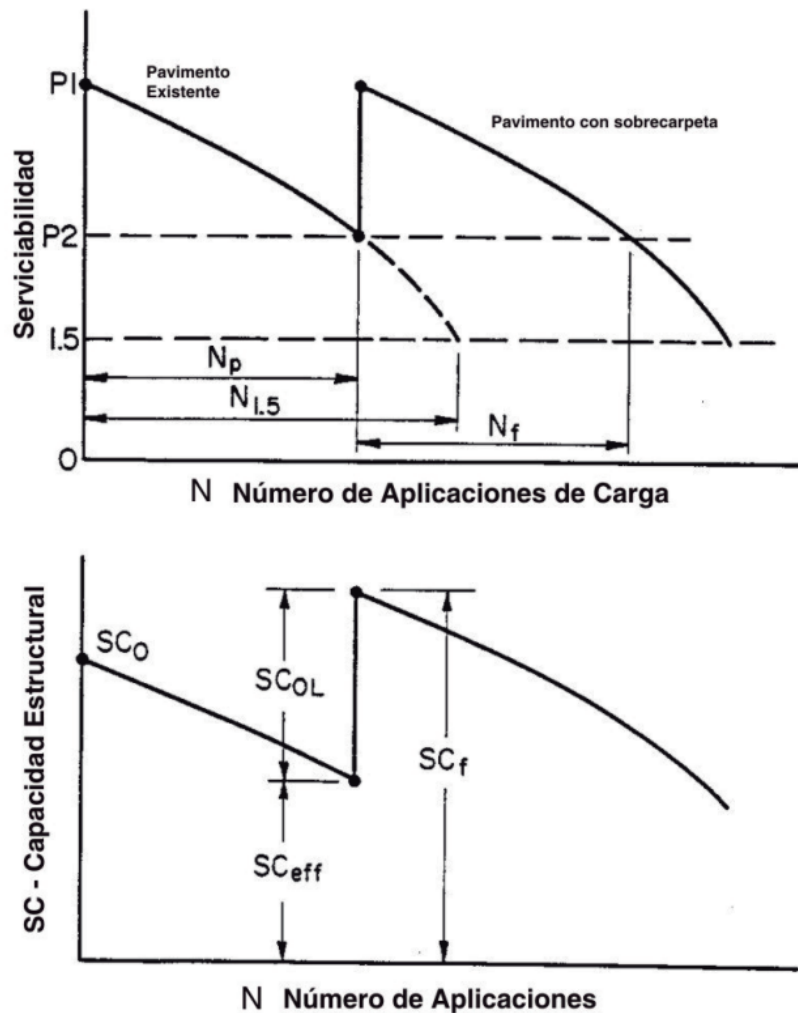


Figura 2.24: Pérdida de la capacidad estructural en función del tiempo o tráfico [1]

El proceso para pavimentos flexibles es el siguiente:

- Determinación de SN_f mediante la ecuación de diseño AASHTO para estructuras nuevas.
- Determinación de SN_{eff} para caracterizar la capacidad estructural existente, se obtiene con ensayos.
- Determinación de SN_{ol} .

Los métodos para determinar el SN_{eff} se detallan a continuación.

2.4.4.2 Inspección visual y ensayos de materiales

Esta metodología propone analizar las condiciones del pavimento observando las condiciones de deterioros y de drenaje, en ocasiones requiere ensayos de laboratorio. El objetivo es comparar los cambios que ha tenido el pavimento con respecto a su construcción inicial, por ello se debe revisar la historia completa del pavimento.

El SN_{eff} viene dado por la siguiente expresión:

$$SN_{eff} = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3 \tag{2.39}$$

Donde:

D_1, D_2, D_3 : Espesores de cada capa.

m_2, m_3 : Coeficientes de drenaje de acuerdo a las condiciones del pavimento.

a_1, a_2, a_3 : Coeficientes estructurales que son menores a los de un diseño nuevo, se indican en la figura 2.25.

MATERIAL	SURFACE CONDITION	COEFFICIENT	
AC Surface	Little or no alligator cracking and/or only low-severity transverse cracking	0.35 to 0.40	
	< 10 percent low-severity alligator cracking and/or < 5 percent medium- and high-severity transverse cracking	0.25 to 0.35	
	> 10 percent low-severity alligator cracking and/or < 10 percent medium-severity alligator cracking and/or > 5-10 percent medium- and high-severity transverse cracking	0.20 to 0.30	
	> 10 percent medium-severity alligator cracking and/or < 10 percent high-severity alligator cracking and/or > 10 percent medium- and high-severity transverse cracking	0.14 to 0.20	
	> 10 percent high-severity alligator cracking and/or > 10 percent high-severity transverse cracking	0.08 to 0.15	
	Stabilized Base	Little or no alligator cracking and/or only low-severity transverse cracking	0.20 to 0.35
		< 10 percent low-severity alligator cracking and/or < 5 percent medium- and high-severity transverse cracking	0.15 to 0.25
> 10 percent low-severity alligator cracking and/or < 10 percent medium-severity alligator cracking and/or > 5-10 percent medium- and high-severity transverse cracking		0.15 to 0.20	
> 10 percent medium-severity alligator cracking and/or < 10 percent high-severity alligator cracking and/or > 10 percent medium- and high-severity transverse cracking		0.10 to 0.20	
> 10 percent high-severity alligator cracking and/or > 10 percent high-severity transverse cracking		0.08 to 0.15	
Granular Base or Subbase		No evidence of pumping, degradation, or contamination by fines	0.10 to 0.14
		Some evidence of pumping, degradation, or contamination by fines	0.00 to 0.10

Figura 2.25: Coeficientes estructurales o de capa recomendados para capas de pavimentos existentes [1]

2.4.4.3 Ensayos no destructivos de deflexión

Los ensayos no destructivos de deflexión se emplean para determinar el módulo resiliente de la subrasante y proveer una estimación del SN_{eff} . La capacidad estructural del pavimento está en función del espesor y su rigidez total [1].

$$SN_{eff} = 0.0045 D (E_p)^{1/3} \quad (2.40)$$

Donde:

D : Espesor total del paquete estructural (pulgadas).

E_p : Módulo efectivo de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante (psi).

2.4.4.4 Método de vida remanente

Esta metodología plantea que la pérdida estructural está directamente ligada a las cargas del tráfico que el pavimento ha soportado hasta el momento de la rehabilitación. Para definir la vida remanente del pavimento, se debe calcular la cantidad de tráfico que el pavimento ha soportado hasta la fecha (N_p) y la cantidad de tráfico que podría soportar el pavimento hasta llegar a una serviciabilidad de 1.5 [1].

$$RL = 100 \left(1 - \frac{N_p}{N_{1.5}} \right) \quad (2.41)$$

Donde:

RL : Vida remanente del pavimento (%).

N_p : Tráfico total hasta la fecha.

$N_{1.5}$: Tráfico total hasta la falla.

Mediante la figura 2.26 se determina el factor de condición del pavimento. El número estructural efectivo se determina con la ecuación 2.42.

$$SN_{eff} = CF \cdot SN_o \quad (2.42)$$

Donde:

CF : Factor de condición.

SN_o : Número estructural inicial.

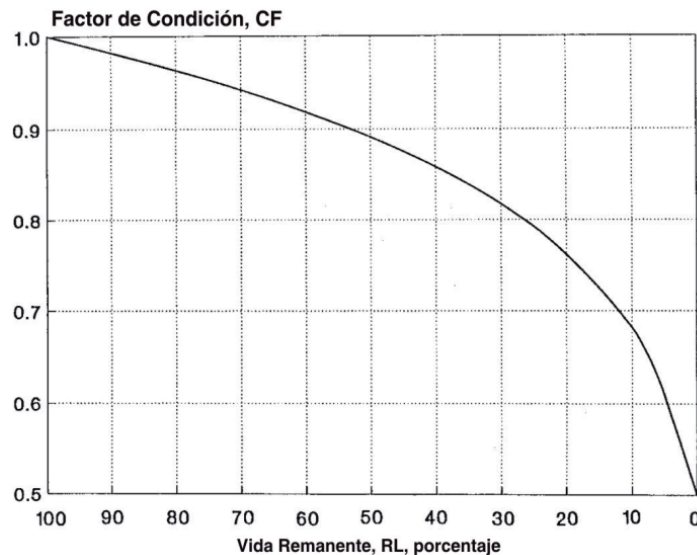


Figura 2.26: Factor de condición [1]

2.4.4.5 Determinación del módulo efectivo E_p

El módulo efectivo E_p se obtiene a partir de los resultados del ensayo FWD. El módulo resiliente retrocalculado de la subrasante se determina con la ecuación 2.43.

$$M_R = \frac{0.24P}{d_r r} \quad (2.43)$$

Donde:

M_R : Módulo resiliente de la subrasante retrocalculado (psi).

P : Carga aplicada en el plato (lbs).

d_r : Deflexión a la distancia r medida desde el centro de la carga (pulgadas).

r : Distancia desde el centro de carga (pulgadas).

La distancia r debe cumplir con la condición de que $r \geq 0.7 a_e$. El valor de a_e se determina con la ecuación 2.44.

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2} \quad (2.44)$$

Donde:

a_e : Radio del bulbo de presión en la interface pavimento subrasante (pulgadas).

a : Radio del plato de carga (pulgadas).

D : Espesor total del pavimento por encima de la subrasante (pulgadas).

E_p : Módulo efectivo de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante (psi).

M_R : Módulo resiliente de la subrasante (psi).

Para calcular el módulo efectivo se emplea la siguiente expresión mediante iteraciones.

$$d_0 = 1.5pa \left[\frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{E_p} \right] \quad (2.45)$$

Donde:

d_0 : Deflexión medida en el centro del plato de carga y ajustada a una temperatura de 20 °C (pulgadas).

p : Presión en el plato de carga (psi).

a : Radio del plato de carga (pulgadas).

E_p : Módulo efectivo de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante (psi).

M_R : Módulo resiliente de la subrasante (psi).

Para corregir la deflexión d_0 es necesario determinar la temperatura de la mezcla durante el ensayo. Los factores según el tipo de base que posea la estructura se muestran en las figuras 2.27 y 2.28.

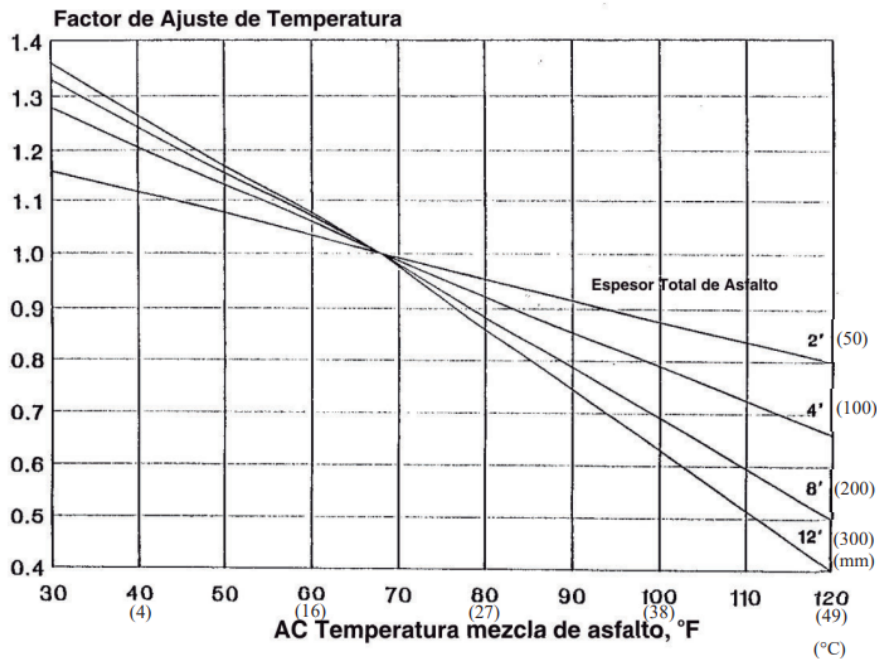


Figura 2.27: Factor de ajuste para pavimentos con base granular o tratada con asfalto [1]

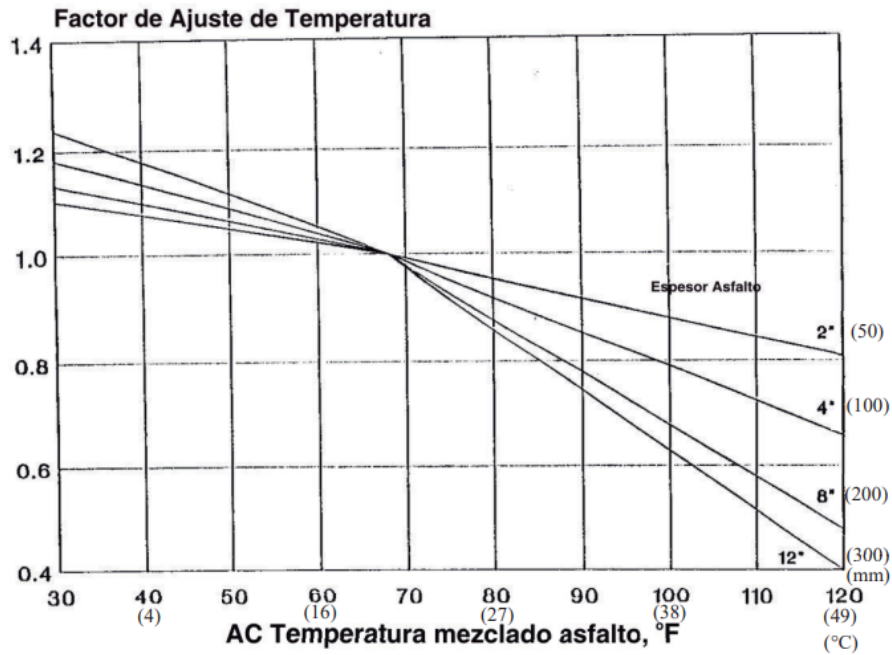


Figura 2.28: Factor de ajuste para pavimentos con base estabilizada con cemento o puzolanas [1]

2.4.4.6 Determinación del espesor de la sobrecarpeta

La expresión para calcular el espesor de la sobrecarpeta es la siguiente:

$$D_{ol} = \frac{SN_{ol}}{a_{ol}} = \frac{SN_f - SN_{eff}}{a_{ol}} \tag{2.46}$$

Donde:

D_{ol} : Espesor de la sobrecarpeta.

SN_{ol} : Número estructural requerido por la sobrecarpeta.

a_{ol} : Coeficiente estructural del concreto asfáltico de la sobrecarpeta.

2.5 Análisis estructural

Los métodos de diseño para pavimentos están basados en el análisis de esfuerzos y deformaciones que se producen en las diferentes capas, producto de las cargas repetidas del tráfico.

Al momento de diseñar la estructura del pavimento es importante controlar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones, especialmente en la subrasante. En la figura 2.29 se muestran los puntos principales para el análisis.

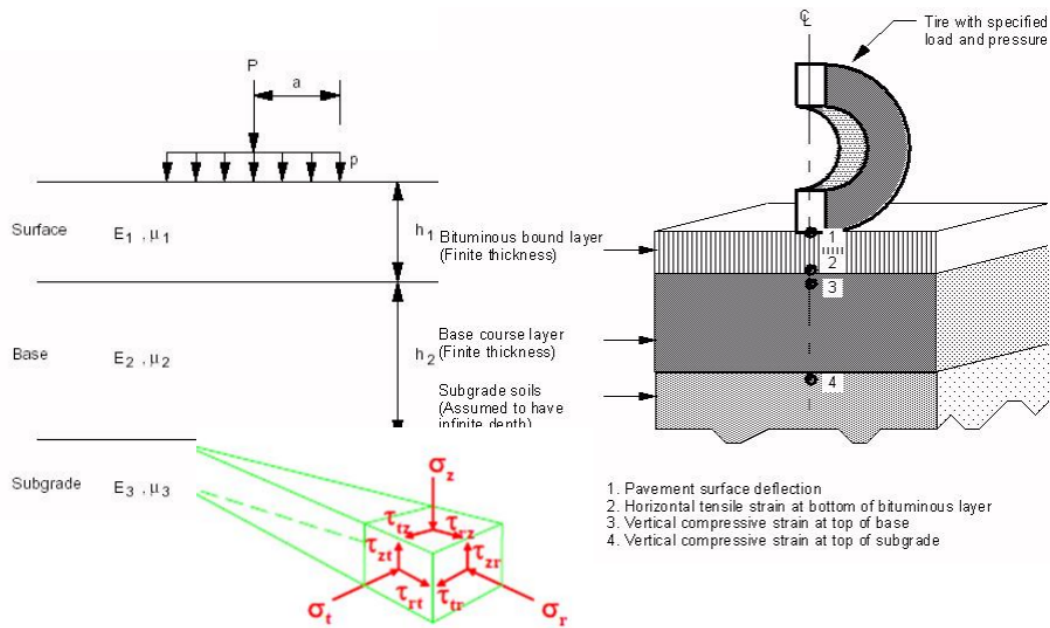


Figura 2.29: Puntos de análisis de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento. Adaptada de Pavement analysis and design [9]

Se han desarrollado algunas metodologías para analizar el comportamiento estructural del pavimento, estas se detallan más adelante.

2.5.1 Análisis lineal

Esta es la manera más simple de caracterizar el comportamiento de un pavimento flexible bajo la carga de los neumáticos. Se considera un semi-espacio homogéneo con un área infinitamente grande y una subrasante de profundidad infinita. Para el análisis de esfuerzos y deformaciones en los pavimentos se utiliza la teoría propuesta por Boussinesq en 1885 para una sola capa referente a cargas concentradas sobre estratos elásticos y la teoría de Burmister planteada en 1943 para el sistema multicapas. Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones se calculan asumiendo que la concentración de la carga se da sobre un área circular [9].

Los parámetros que intervienen en el análisis de esfuerzos y deformaciones en un medio semi-infinito son (ver figura 2.30):

- Radio del área circular donde se aplica la carga, **a**.
- Presión uniformemente distribuida, **q**.

- Módulo elástico del suelo, E .
- Coeficiente de Poisson, ν .
- A una profundidad z y una distancia r del eje de simetría se produce el esfuerzo vertical σ_z , esfuerzo radial σ_r y el esfuerzo tangencial σ_t , así como esfuerzos de corte $\tau_{rz} = \tau_{zr}$.

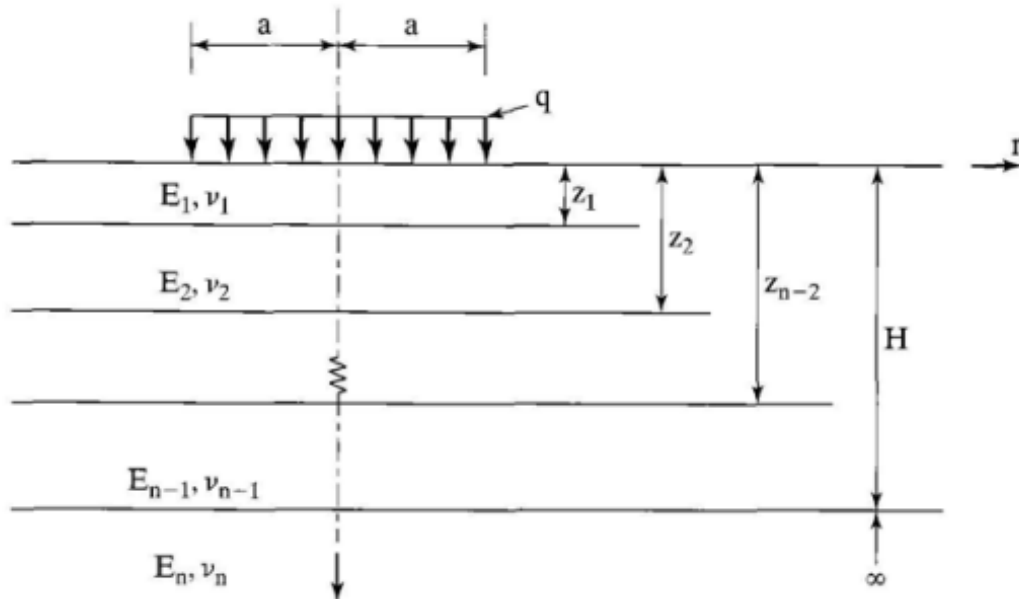


Figura 2.30: Parámetros que intervienen en el análisis lineal en un sistema multicapa [9]

2.5.1.1 Esfuerzos y desplazamientos

El proceso basado en la teoría de Burmister para determinar los esfuerzos y desplazamientos en un sistema multicapa bajo una carga circular se explica en el apéndice B del libro de Huang, 2004. En la teoría elástica para cada una de las capas se considera una función de tensión que satisface una ecuación diferencial.

$$\nabla^4 \phi = 0 \tag{2.47}$$

Para sistemas con una distribución de tensiones axialmente simétrica se tiene la ecuación 2.48, en donde r y z son las coordenadas cilíndricas.

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} + \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} + \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \tag{2.48}$$

Una vez que se tiene la función de tensión, se pueden calcular los esfuerzos y desplazamientos (deflexiones) mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (2.49)$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right] \quad (2.50)$$

$$\sigma_t = \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \nabla^2 \phi - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r} \right] \quad (2.51)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (2.52)$$

$$\omega = \frac{1 + \nu}{E} \left[(1 - 2\nu) \nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] \quad (2.53)$$

$$u = -\frac{1 + \nu}{E} \left[\frac{\nabla^2 \phi}{\partial r \partial z} \right] \quad (2.54)$$

Como la ecuación diferencial es de cuarto orden se deben determinar cuatro constantes de integración (A_i, B_i, C_i, D_i) a partir de las condiciones de contorno y de continuidad. Como la función de espacio no existe a una profundidad infinita, las constantes A_n y C_n son cero. Por lo que, la capa subrasante posee dos constantes.

Las condiciones de contorno son:

- El esfuerzo vertical bajo el área circular es igual a q .
- No existe esfuerzo cortante en la superficie.

Las condiciones de continuidad (ver ecuaciones 2.63 a 2.66) en cada una de las $n-1$ interfaces son:

- Continuidad del esfuerzo vertical.
- Continuidad del desplazamiento vertical.
- Continuidad del esfuerzo cortante.
- Continuidad del desplazamiento radial.

La solución de la ecuación diferencial se muestra a continuación y se puede verificar mediante sustitución.

$$\phi_i = \frac{H^3 J_0(mp)}{m^2} [A_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - B_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} + C_i m \lambda e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i m \lambda e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})}] \quad (2.55)$$

Donde:

$$p = \frac{r}{H}$$

$$\lambda = \frac{z}{H}$$

H : Distancia desde la superficie hasta la parte superior de la capa de espesor infinito.

J_0 : Función de Bessel de orden cero.

m : parámetro.

A_i, B_i, C_i, D_i : Constantes de integración por capa para cada parámetro m .

i : Número de capa, toma valores desde 1 a n .

Reemplazando la ecuación 2.55 en las ecuaciones de esfuerzos y desplazamientos (deflexiones) se tienen las siguientes ecuaciones:

$$(\sigma_z)_i^* = -m J_0(mp) \{ [A_i - C_i(1 - 2v_i - m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i + D_i(1 - 2v_i + m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} \quad (2.56)$$

$$(\sigma_r)_i^* = \left[m J_0(mp) - \frac{J_1(mp)}{p} \right] \{ [A_i + C_i(1 + m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i - D_i(1 - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} \\ + 2v_i m J_0(mp) [C_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})}] \quad (2.57)$$

$$(\sigma_t)_i^* = \frac{J_1(mp)}{p} \{ [A_i + C_i(1 + m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i - D_i(1 - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} \\ + 2v_i m J_0(mp) [C_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})}] \quad (2.58)$$

$$(\tau_{rz})_i^* = m J_1(mp) \{ [A_i + C_i(2v_i + m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - [B_i - D_i(2v_i - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} \quad (2.59)$$

$$(\omega^*)_i = -\frac{1 + v_i}{E_i} H J_0(mp) \{ [A_i - C_i(2 - 4v_i - m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} \} \\ - [B_i + D_i(2 - 4v_i + m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \quad (2.60)$$

$$(u^*)_i = \frac{1 + \nu_i}{E_i} J_1(mp) \{ [A_i + C_i(1 + m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - [B_i - D_i(1 - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} \quad (2.61)$$

Donde:

σ_z : Esfuerzo vertical.

σ_r : Esfuerzo radial.

σ_t : Esfuerzo tangencial.

τ_{rz} : Esfuerzo cortante.

ω : Desplazamiento vertical.

u : Desplazamiento radial.

J_0, J_1 : Funciones Bessel de orden cero y primer orden.

$$R = q \alpha \int_0^\infty \frac{R^*}{m} J_1 m \alpha dm \quad (2.62)$$

En la ecuación 2.62 R^* es la respuesta aproximada, y R es la respuesta total usando una transformación inversa de Hankel. Huang (2004) propone calcular las respuestas del sistema multicapas de la siguiente manera:

- Asignar valores m desde 0 hasta un número positivo de gran valor, los valores están relacionados a los puntos donde las funciones de Bessel son cero [9].
- Determinar las constantes de integración (A_i, B_i, C_i, D_i) de cada capa para cada valor m [9].
- Sustituir las constantes en la ecuación de respuesta (2.56 a 2.61) [9].
- Determinar la respuesta total por un método de integración numérica [9].

La solución de los sistemas de capas está basada en la asunción que todas las capas son friccionantes, con el mismo esfuerzo vertical, esfuerzo de corte, y desplazamientos verticales y radiales en cada punto a lo largo de la interfaz [9].

$$(\sigma_z^*)_i = (\sigma_z^*)_{i+1} \quad (2.63)$$

$$(\tau_{rz}^*)_i = (\tau_{rz}^*)_{i+1} \quad (2.64)$$

$$(\omega^*)_i = (\omega^*)_{i+1} \quad (2.65)$$

$$(u^*)_i = (u^*)_{i+1} \quad (2.66)$$

2.5.1.2 Deformaciones

Después de haber calculado los esfuerzos, las deformaciones se obtienen con las siguientes expresiones.

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (2.67)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (2.68)$$

$$\epsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] \quad (2.69)$$

2.5.1.3 Superposición de esfuerzos por cargas de neumáticos

Cuando se analiza el comportamiento del pavimento ante cargas múltiples se requiere aplicar el principio de superposición (ver figura 2.31).

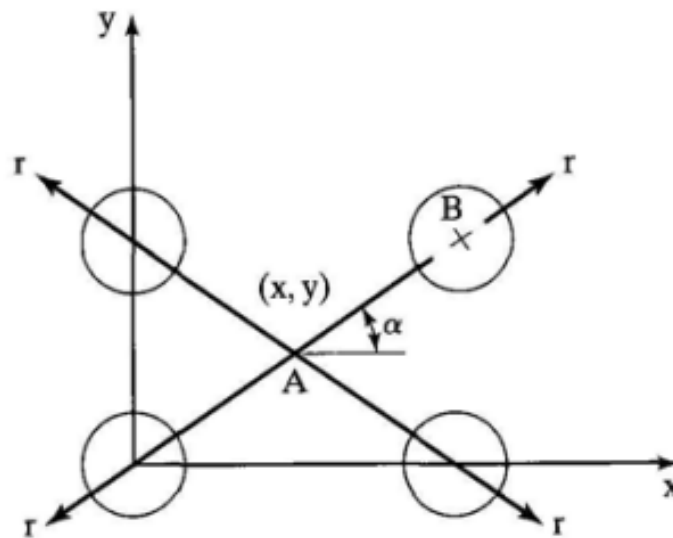


Figura 2.31: Geometría en planta de un eje tándem [9]

La figura 2.31 muestra un eje tándem visto en planta, para este caso el esfuerzo y desplazamiento vertical bajo el punto A se obtiene realizando la sumatoria de los esfuerzos y desplazamientos que produce cada neumático debido a que todos tienen la misma dirección. Por otra parte, el esfuerzo radial, tangencial y cortante que produce cada carga no pueden sumarse porque no tienen la misma dirección. Estos deben descomponerse en sus componentes x e y como se muestra en la figura 2.32.

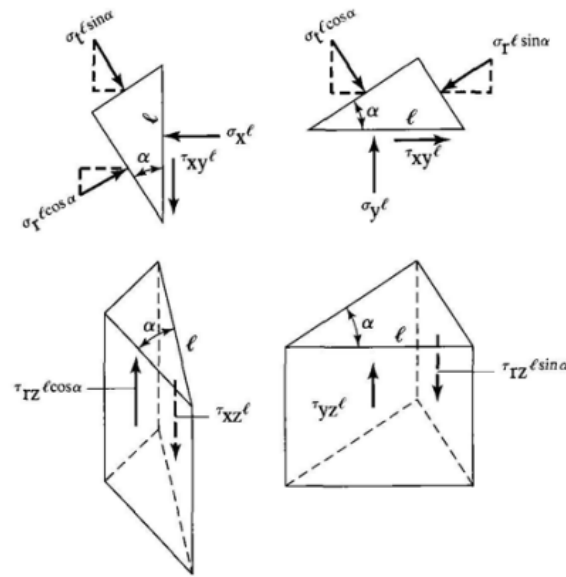


Figura 2.32: Descomposición de los esfuerzos en coordenadas cilíndricas a coordenadas cartesianas o rectangulares [9]

Realizando la sumatoria de fuerzas igual a cero en cada dirección se obtienen las siguientes ecuaciones.

$$\sigma_x = \sigma_r \cos^2\alpha + \sigma_t \sin^2\alpha \tag{2.70}$$

$$\sigma_y = \sigma_r \sin^2\alpha + \sigma_t \cos^2\alpha \tag{2.71}$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_r - \sigma_t) \sin\alpha \cos\alpha \tag{2.72}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{rz} \sin\alpha \tag{2.73}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{rz} \sin\alpha \tag{2.74}$$

Luego de encontrar los esfuerzos de cada carga se obtiene mediante superposición el esfuerzo total generado por las múltiples cargas.

Para calcular los esfuerzos principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ se emplea la teoría de Cauchy (tensor de esfuerzos) y se resuelve la ecuación cúbica que se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 + \tau_{xy}^2)\sigma \\ - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{yz}\tau_{xz}\tau_{xy} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0 \end{aligned} \tag{2.75}$$

Las deformaciones principales se determinan con la siguiente formulación:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \tag{2.76}$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_{tn} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \gamma_{xy}^2} \tag{2.77}$$

Donde:

ϵ_{tn} : Deformación tensional principal horizontal.

$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$: Deformación en la dirección x.

$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$: Deformación en la dirección y.

$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}$: Deformación cortante en el plano x en la dirección y.

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \tag{2.78}$$

2.5.2 Análisis no-lineal

Huang en 1968 planteó un método iterativo para mostrar la no linealidad de los materiales granulares, para ello dividió el semi-espacio en siete capas (ver figura 2.33).

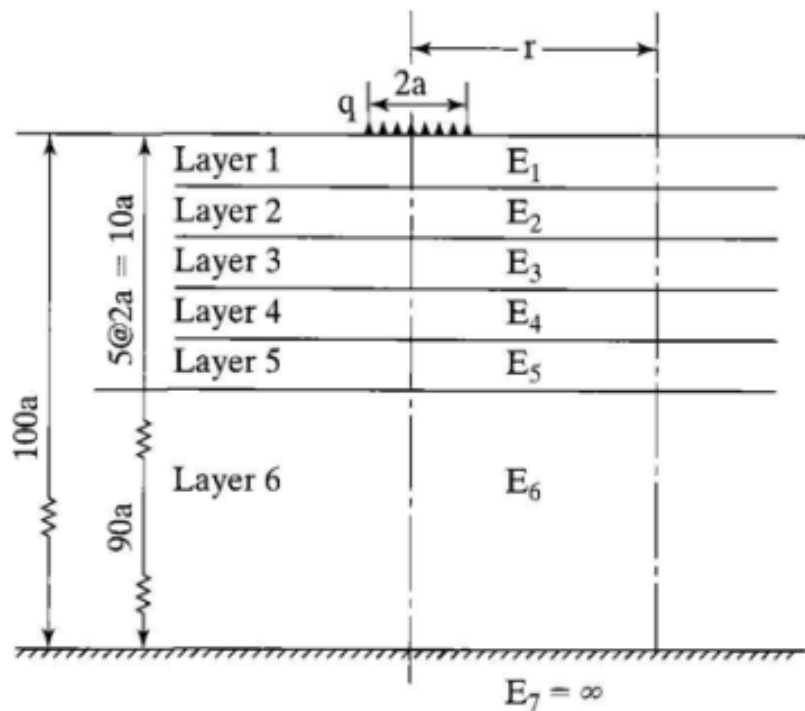


Figura 2.33: División del semi-espacio en siete capas [9]

Determinó los esfuerzos en el punto medio de cada capa y empleó la ecuación 2.79 para obtener el módulo elástico.

$$E = E_0 (1 + \beta\theta) \quad (2.79)$$

Donde:

θ : Esfuerzo invariante.

E : Módulo elástico bajo el esfuerzo invariante generado.

E_0 : Módulo elástico inicial.

β : Constante del suelo que indica la variación del módulo elástico de acuerdo al incremento del esfuerzo invariante.

El esfuerzo invariante considera los efectos de la carga aplicada y el esfuerzo en reposo.

$$\theta = \sigma_z + \sigma_r + \sigma_t + \gamma z(1 + 2K_0) \quad (2.80)$$

Donde:

$\sigma_z, \sigma_r, \sigma_t$: Esfuerzo vertical, radial y tangencial debido a la carga.

γ : Peso específico del suelo.

z : Profundidad a la que se calcula el esfuerzo invariante.

K_0 : Coeficiente de presión de tierras en reposo.

Para la determinación de los esfuerzos geoestáticos se asume que el sistema de capas no tiene nivel freático.

2.5.2.1 Determinación del módulo elástico para materiales de tipo granular

Dentro del programa KENPAVE se utiliza la siguiente correlación para determinar el módulo elástico.

$$E = K_1 \theta^{K_2} \quad (2.81)$$

El esfuerzo invariante está dado por la ecuación 2.80.

En base a análisis estadísticos, Rada y Witczak (1981) presentaron la media y desviación estándar para el módulo resiliente de varios materiales granulares, como se muestra en la tabla 2.20.

Tabla 2.20: Constantes no-lineales K_1 y K_2 para materiales granulares [9].

Tipo de Material	K_1 (psi)	K_2
Arena limosa	1620	0.62
Arena-Grava	4480	0.53
Mezcla de arena y agregado	4350	0.59
Piedra triturada	7210	0.45

En 1986 se publicó que los módulos resilientes de los agregados de base y subbase en el AASHO Road Test tienen un valor de K_2 igual a 0.6 y K_1 puede variar entre 3200 y 8000 psi, de acuerdo a la humedad. Otros valores para estos parámetros se muestran en la tabla 2.21.

Tabla 2.21: Valores de K_1 y K_2 para materiales granulares no tratados [9].

Referencia	Material	K_1 (psi)	K_2
Hicks (1970)	Grava parcialmente triturada, roca triturada	1600-5000	0.57-0.73
Hicks and Finn (1970)	Base sin tratar en San Diego Test Road	2100-5400	0.61
Allen (1973)	Grava, piedra triturada	1800-8000	0.32-0.70
Kalcheff and Hicks (1973)	Piedra triturada	4000-9000	0.46-0.64
Boyce et al. (1976)	Piedra caliza triturada bien clasificada	8000	0.67
Monismith and Witczak (1980)	En materiales de base y subbase en servicio	2900-7750	0.46-0.65

2.5.2.2 Determinación del módulo elástico para suelos de grano fino

En este caso, el módulo resiliente disminuye cuando aumenta el esfuerzo desviador σ_d . En los ensayos de laboratorio el esfuerzo $\sigma_2 = \sigma_3$, por lo que el esfuerzo desviador resulta:

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \tag{2.82}$$

En los sistemas multicapa el σ_3 es considerado como la media entre σ_2 y σ_3 .

$$\sigma_d = \sigma_1 - 0.5(\sigma_2 + \sigma_3) + \gamma z(1 - K_0) \tag{2.83}$$

La figura 2.34 muestra la relación que existe entre el esfuerzo desviador y el módulo resiliente para suelos finos.

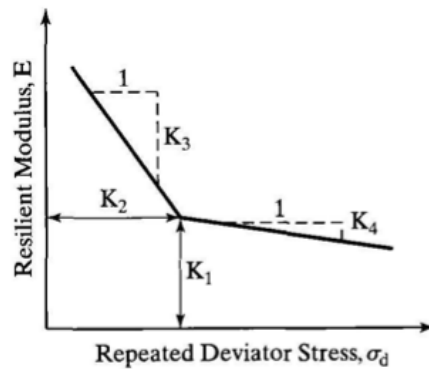


Figura 2.34: Relación entre el esfuerzo desviador y el módulo resiliente en suelos de grano fino [9]

Por lo que, las ecuaciones que rigen este comportamiento son:

$$E = K_1 + K_3(K_2 - \sigma_d) \text{ si } \sigma_d < K_2 \tag{2.84}$$

$$E = K_1 - K_4(\sigma_d - K_2) \text{ si } \sigma_d > K_2 \tag{2.85}$$

La figura 2.35 muestra la relación entre el esfuerzo desviador y el módulo resiliente para cuatro tipos de subrasante.

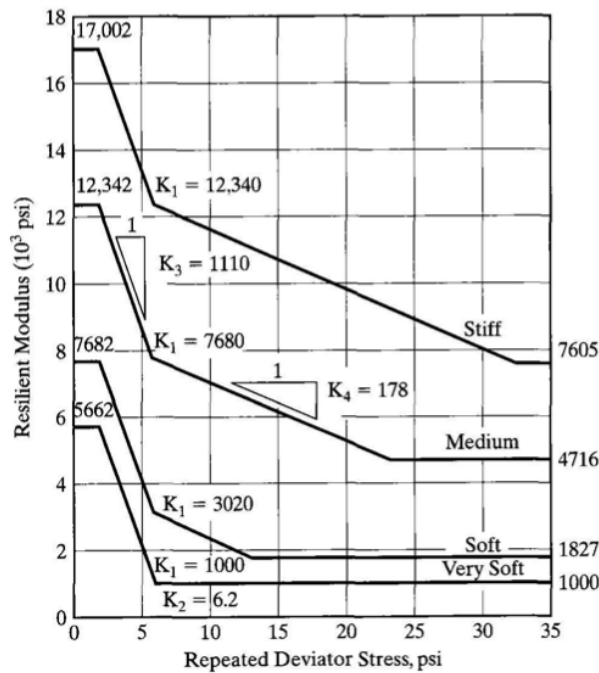


Figura 2.35: Relación entre el esfuerzo desviador y el módulo resiliente para cuatro tipos de subrasante [9]

2.5.2.3 Punto de análisis de esfuerzos para la capa no-lineal

El punto de análisis de esfuerzos en la capa no-lineal está dado por:

- Pendiente de distribución de carga, *SLD*.
- Profundidad, *ZCNOL*.
- Coordenada radial para un solo neumático, *RCNOL* o coordenada *x* e *y* para múltiples neumáticos, (*XCNOL*, *YCNOL*).

De acuerdo a la profundidad las coordenadas *r*, *x* e *y* se calculan como sigue:

$$r = RCNOL + (SLD)(ZCNOL) \tag{2.86}$$

$$x = XPTNOL + (SLD)(ZCNOL) \tag{2.87}$$

$$y = YPTNOL + (SLD)(ZCNOL) \tag{2.88}$$

Para obtener los esfuerzos, deformaciones y deflexiones se debe realizar el análisis en los puntos mostrados en la figura 2.36 para múltiples neumáticos y para un solo neumático bajo el eje de simetría para considerar todos los puntos que sean críticos.

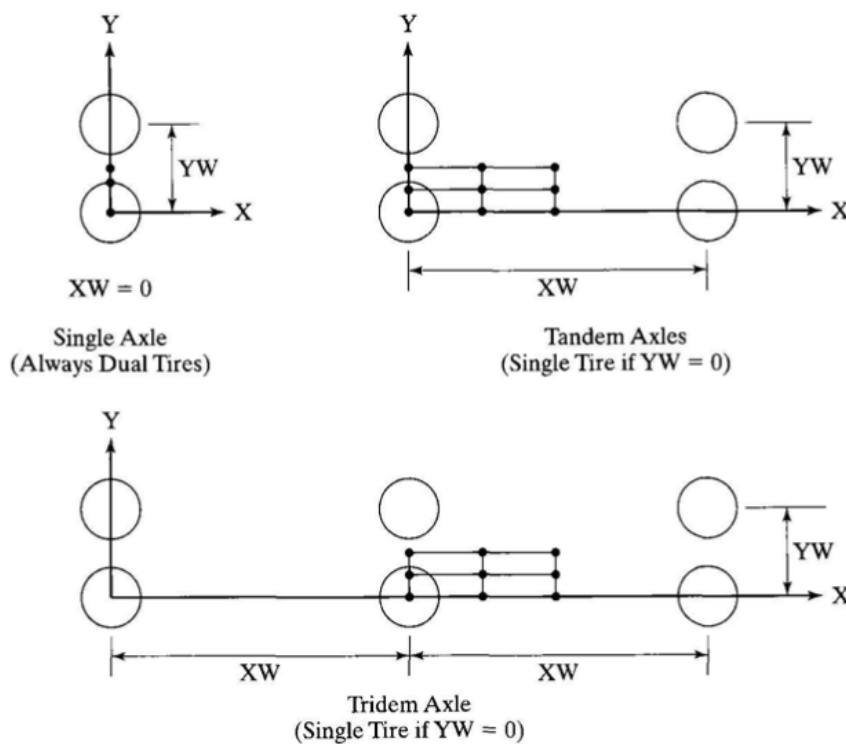


Figura 2.36: Puntos de análisis de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en múltiples neumáticos [1]

Si se necesita valores promedios el punto de análisis es el borde de la carga y la pendiente SLD es 0.5, suponiendo que la carga se distribuye hacia las capas inferiores con una pendiente de 0.5.

Para el programa se utiliza el método 1 indicado en el libro de Huang para realizar el cálculo del módulo elástico por iteraciones.

2.5.3 Análisis viscoelástico

La mezcla asfáltica en caliente es un material con un comportamiento viscoelástico y que depende del tiempo de carga, por ello se puede analizar la estructura del pavimento mediante la teoría de la viscoelasticidad. El módulo E se considera viscoelástico y dependiente del tiempo, mientras que el coeficiente de Poisson se asume elástico e independiente del tiempo [9]. El método empleado en el programa para caracterizar el material es mediante la curva de fluencia $D(t)$, la expresión que la define es:

$$D(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma} \quad (2.89)$$

Donde:

$\epsilon(t)$: Deformación dependiente del tiempo para un esfuerzo constante.

Para un esfuerzo constante la curva de fluencia es recíproca al módulo de elasticidad. En un modelo generalizado, la curva de fluencia puede ser expresada como:

$$D(t) = \frac{1}{E_0} \left(1 + \frac{1}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{T_i}\right) \right] \quad (2.90)$$

Al contar con la curva de fluencia (Creep Compliance), las constantes viscoelásticas pueden ser determinadas por el método de residuales sucesivos empleando la transformada de Laplace. Sin embargo, el uso de un método alternativo conocido como el método de colocación es más conveniente al determinar resultados bastante aproximados. En este método, no se determinan las constantes E_i y T_i por el método de residuos, sino que se asumen de manera arbitraria, y los valores correspondientes de E_i son calculados al resolver un sistema de ecuaciones lineales [9]. El mismo método puede ser utilizado para determinar las respuestas viscoelásticas de las soluciones elásticas que se tengan como dato de entrada.

2.5.3.1 Series de Dirichlet

El diseño del pavimento se basa en cargas de tipo dinámicas (cargas móviles) para un período corto de duración. La curva de fluencia $D(t)$ causada por una deformación viscosa resulta despreciable por lo que la ecuación 2.90 puede ser expresada como:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n G_i \exp\left(\frac{-t}{T_i}\right) \tag{2.91}$$

Donde, si T_n tiende al infinito, entonces:

$$G_i = -\frac{1}{E_i}$$

$$G_n = \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i}$$

Estos coeficientes G serán determinados de la solución del sistema de ecuaciones lineales planteado por las conformidades de fluencia en los tiempos medidos. En el análisis de cargas móviles, debido a la corta duración, se utilizan tiempos de retardo para resolver el sistema de ecuaciones lineales [9]. En un ejemplo en el que se cuente con 11 tiempos de medición, para ajustar el sistema a los 7 tiempos de retardo, se debe realizar una pre-multiplicación por la matriz transversal en ambos lados del sistema de ecuaciones para reducir el número de ecuaciones a 7.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \exp\left(-\frac{t_1}{T_1}\right) & \dots & \exp\left(-\frac{t_{11}}{T_1}\right) \\ \dots & \text{matriz}7x11 & \dots \\ \exp\left(-\frac{t_1}{T_7}\right) & \dots & \exp\left(-\frac{t_{11}}{T_7}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp\left(-\frac{t_1}{T_1}\right) & \dots & \exp\left(-\frac{t_1}{T_7}\right) \\ \dots & \text{matriz}11x7 & \dots \\ \exp\left(-\frac{t_{11}}{T_1}\right) & \dots & \exp\left(-\frac{t_{11}}{T_7}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ \cdot \\ G_7 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \exp\left(-\frac{t_1}{T_1}\right) & \dots & \exp\left(-\frac{t_{11}}{T_1}\right) \\ \dots & \text{matriz}7x11 & \dots \\ \exp\left(-\frac{t_1}{T_7}\right) & \dots & \exp\left(-\frac{t_{11}}{T_7}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ \cdot \\ D_7 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2.92}$$

2.5.3.2 Superposición tiempo-temperatura

Se ha demostrado que las mezclas asfálticas sometidas a incrementos de temperatura experimentan una deformación acelerada como si el tiempo de escala se comprimiera. En la figura 2.37 se muestra la curva de fluencia vs. tiempo en escala logarítmica para diferentes temperaturas [9].

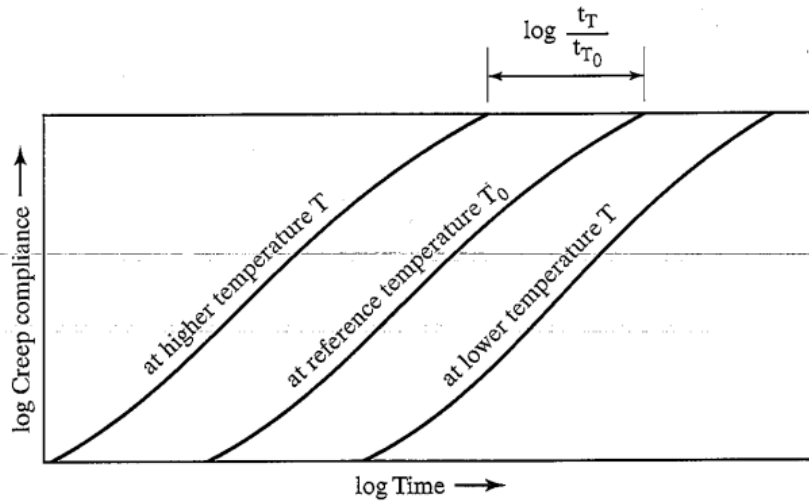


Figura 2.37: Curva de fluencia vs. tiempo a diferentes temperaturas [9]

Se puede apreciar como la curva de fluencia disminuye para temperaturas menores comparado con las temperaturas mayores. Esta relación de temperaturas se puede establecer con un factor de tiempo-temperatura definido como a_T [9].

$$a_T = \frac{t_T}{t_{T_0}} \tag{2.93}$$

Varios resultados de laboratorio en mezclas asfálticas han demostrado que el logaritmo de esta constante cambia de manera lineal con la temperatura. De la figura 2.38, la línea de pendiente beta varía de 0.061 a 0.17 con un promedio de 0.113 [9].

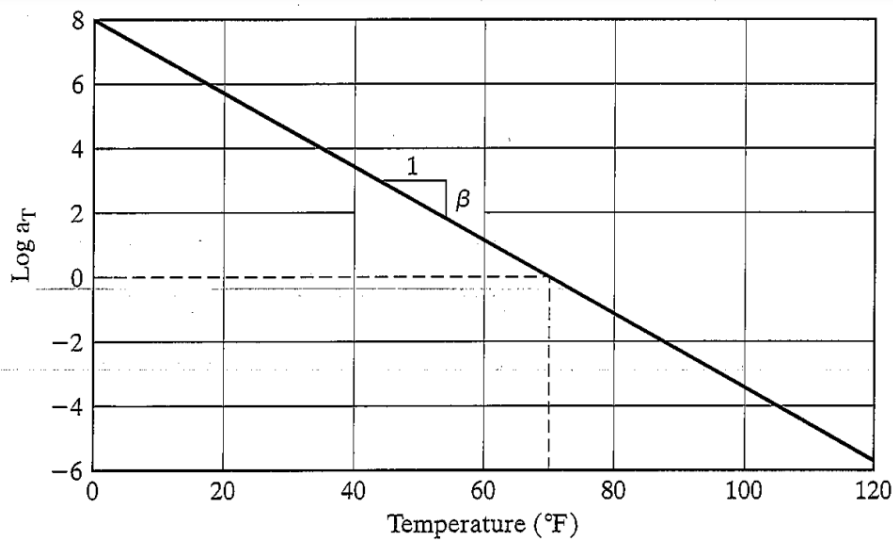


Figura 2.38: Factor de cambio vs. temperatura [9]

Se obtienen las siguientes relaciones donde la temperatura tiene unidades inglesas.

$$\beta = \frac{\log\left(\frac{t_T}{t_{T_0}}\right)}{T - T_0} \quad (2.94)$$

$$t_T = t_{T_0} \exp[2.3026\beta(T - T_0)] \quad (2.95)$$

Si la conformidad de fluencia se basa en la temperatura de referencia T_0 , se tiene:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n G_i \exp\left(\frac{-t}{T_i}\right) \quad (2.96)$$

2.5.3.3 Cargas estáticas

- Al ser las conformidades de fluencia recíprocos a los módulos elásticos se determinan las respuestas del pavimento para cada uno de los tiempos de igual manera que un análisis de tipo lineal, y trabajar con el módulo elástico de cada tiempo en las capas viscoelásticas [9].

2.5.3.4 Cargas dinámicas

- **Colocación para las soluciones viscoelásticas:** las soluciones viscoelásticas pueden ser aproximadas al utilizar el mismo método de colocación para determinar los coeficientes para las series de Dirichlet [9]. Aquí las series de Dirichlet están enfocadas a aproximar la respuesta del pavimento:

$$R = \sum_{i=1}^7 C_i \exp\left(\frac{-t}{T_i}\right) \quad (2.97)$$

Donde:

R : Respuesta del pavimento para cada uno de los tiempos de medición (esfuerzo vertical, radial, tangencial, deformación, deflexiones).

C : Son los coeficientes que se determinan del sistema de ecuaciones.

T_i : Tiempos de retardo.

t : Tiempos de medición.

- **Análisis de cargas móviles:** se utiliza un método de análisis en el que asume que la intensidad de la carga cambia con el tiempo de acuerdo con una función de semiverseno que se muestra en la figura 2.39.

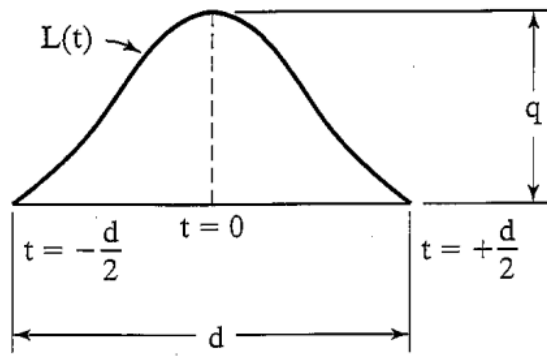


Figura 2.39: Carga dinámica en función del tiempo [9]

En el tiempo igual a cero, la función de carga se expresa como:

$$L(t) = q \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d} \right) \tag{2.98}$$

Donde:

q: Presión de contacto del neumático (psi).

d = $\frac{12a}{s}$: Es la duración de la carga expresada en segundos. La duración depende de la velocidad del vehículo y del radio de contacto del neumático.

a: Radio de las áreas de contacto (pulgadas).

s: Velocidad del vehículo en $\frac{km}{h}$.

Cada respuesta puede ser determinada al aplicar el principio de superposición de Boltzmann, cuya ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$R = \int_{-\frac{d}{2}}^0 R(t) \frac{dL}{dt} dt \tag{2.99}$$

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{q\pi}{d} \sin \left(\frac{2\pi t}{d} \right) \tag{2.100}$$

Al sustituir la derivada de la función semiverseno y el equivalente de la respuesta en términos de las series de Dirichlet de las ecuaciones 2.99 y 2.100, y resolver la integral definida, se obtiene la siguiente relación para la respuesta viscoelástica.

$$R = -\frac{q\pi^2}{2} \sum_{i=1}^n C_i \frac{1 + \exp\left(\frac{-d}{2T_i}\right)}{\pi^2 + \left(\frac{d}{2T_i}\right)^2} \tag{2.101}$$

Donde:

q : Presión de carga en el área de contacto (psi).

C_i : Coeficientes de Dirichlet para cada respuesta.

d : Duración de la carga (s).

T_i : Tiempos de retardo (s).

2.5.4 Análisis de daño

Para el análisis de daño se presenta algunos criterios de falla, donde el propósito es predecir el número de repeticiones de carga que puede soportar el pavimento antes de llegar a la falla.

2.5.4.1 Agrietamiento por fatiga

Este criterio de falla se rige a la siguiente expresión:

$$N_f = f_1(\epsilon_{tn})^{-f_2}(E_1)^{-f_3} \tag{2.102}$$

Donde:

N_f : Número permitido de repeticiones de carga para evitar grietas por fatiga.

ϵ_{tn} : Deformación por tracción en la parte inferior de la capa asfáltica.

E_1 : Módulo elástico dinámico de la capa asfáltica (psi).

f_1, f_2, f_3 : Constantes determinadas a partir de ensayos de fatiga en laboratorio, ver tabla 2.22.

Tabla 2.22: Valores de f_1, f_2 y f_3 [9].

Referencia	f_1	f_2	f_3
Instituto del Asfalto	0.0796	3.291	0.854
Shell	0.0685	5.671	2.363

2.5.4.2 Deformación permanente

Este criterio de falla viene dado por la siguiente expresión:

$$N_d = f_4(\epsilon_c)^{-f_5} \tag{2.103}$$

Donde:

N_d : Número permitido de repeticiones de carga para evitar deformación permanente.

ϵ_c : Deformación por compresión en la parte superior de la subrasante.

f_4, f_5 : Constantes determinadas a partir de ensayos en campo o en laboratorio, ver tabla 2.23.

Tabla 2.23: Valores de f_4, f_5 [9].

Referencia	f_4	f_5
Instituto del Asfalto	$1.365 \cdot 10^{-9}$	4.477
Shell	$6.15 \cdot 10^{-7}$	4.0
Universidad de Nottingham	$1.13 \cdot 10^{-6}$	3.571

Este criterio es válido siempre y cuando la deformación permanente sea el producto de una subrasante débil y no de las capas superiores [9].

2.5.4.3 Puntos de máxima tracción y compresión en la estructura del pavimento según el tipo de eje

- Eje Simple: para este caso se analizan los puntos al borde y debajo del neumático, además en la mitad del eje [9].
- Eje Tándem: en un eje tándem se analiza el daño primario que se produce bajo el eje figura 2.40a, también un daño secundario generado en el punto medio entre los dos ejes 2.40b, producto de la combinación de los mismos. La suma de ambos resulta ser el daño total [9].

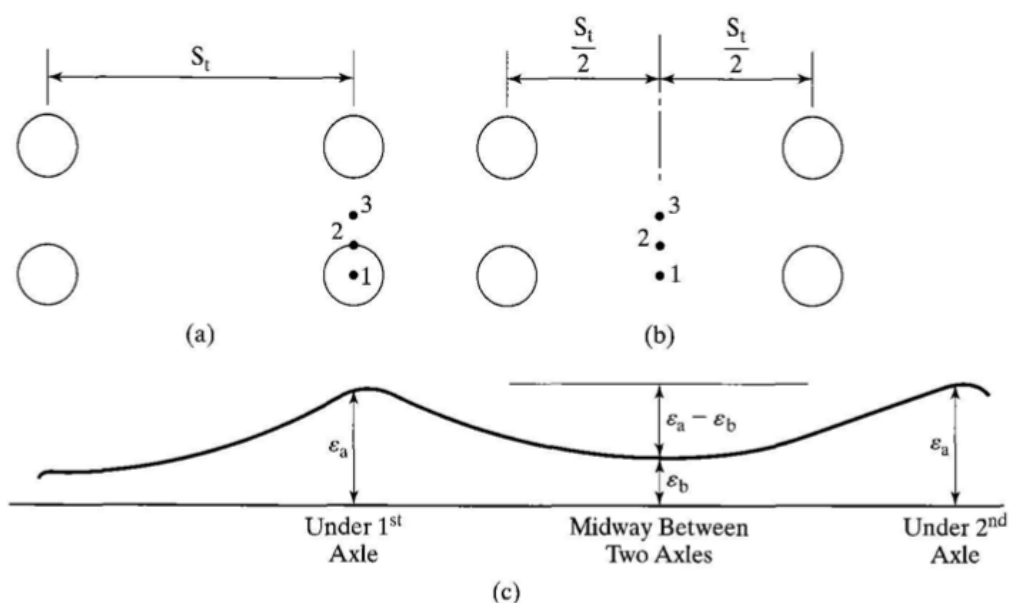


Figura 2.40: Análisis de daño de un eje tándem [9]

- Eje Trídem: para esta configuración se analiza así mismo un daño primario y secundario como en el caso del eje tándem. El daño secundario se calcula en el punto medio de dos ejes figura 2.41b [9].

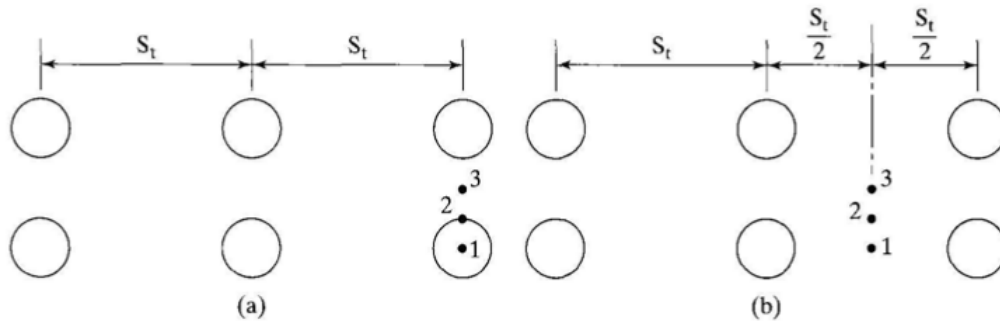


Figura 2.41: Análisis de daño de un eje trídem [9]

2.5.4.4 Deflexión admisible

El Instituto del Asfalto establece la siguiente ecuación para determinar la deflexión admisible:

$$\Delta_{adm} = 25.64N^{-0.2383} \tag{2.104}$$

Donde:

Δ_{adm} : Deflexión admisible en la superficie del pavimento.

N : Número de ejes equivalentes (ESAL).

2.5.4.5 Relación de daño

Es la relación que existe entre el número de repeticiones previsto según el conteo vehicular y permitido en base a los criterios de falla. Se debe determinar para cada período (mes) del año y para cada grupo de carga. Al realizar la sumatoria para obtener la relación de daño total D_r , si este valor es mayor a 1 se concluye que el pavimento alcanza la falla.

Por último el período de vida útil es el inverso de la relación de daño $\frac{1}{D_r}$ para cada criterio de falla, siendo el menor de los dos el que controla el diseño [9].

Capítulo 3

3. Metodología

En este capítulo se presenta el desarrollo del programa realizado en el lenguaje Python, su implementación y validación de cada módulo, que en conjunto permiten determinar el sistema de capas y analizar su comportamiento estructural basado en esfuerzos, deformaciones y deflexiones, para que así, el usuario pueda determinar una alternativa de diseño del pavimento. El programa contempla una interfaz gráfica con 4 módulos, el primero referente al tráfico, el segundo a los materiales, el tercer módulo permite diseñar la estructura del pavimento y sobrecarpetas con mezcla asfáltica, mientras que el cuarto módulo sirve para calcular los esfuerzos, deformaciones y deflexiones que se generan en el pavimento debido a las cargas aplicadas según un análisis lineal, no-lineal y viscoelástico, además de realizar un análisis de daño por fatiga, ahuellamiento y deflexión permisible. A través de la interfaz gráfica de usuario, el diseñador puede ingresar los datos de entrada para el análisis, realizar los cálculos respectivos y obtener los resultados en el computador en forma de tablas, valores únicos (numéricos o de tipo "string") y gráficos 2D. El programa permite exportar archivos de diferentes formatos, y algunos de estos archivos pueden también ser cargados al programa para simulaciones futuras. En la figura 3.1 se indican los módulos principales comprendidos dentro del programa.

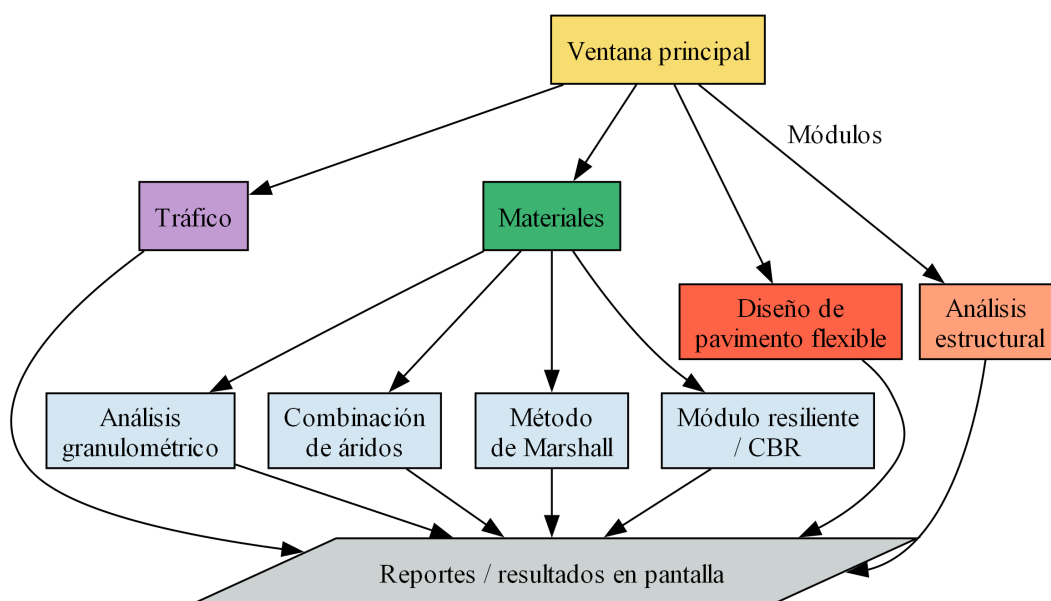


Figura 3.1: Módulos comprendidos dentro de la ventana principal

3.1 Implementación del programa

El primer paso es establecer los objetivos principales que tiene cada módulo disponible en el programa. Todas las funciones que contempla cada módulo servirán como base para diseñar la interfaz gráfica de usuario (GUI) que conforma cada ventana, y la conexión de acciones para los eventos que realice el usuario a través de la interacción con los elementos UI de cada interfaz. Se realizó este proceso con la ayuda de dos herramientas: el editor del código fuente (Spyder) y el programa (QtDesigner).

- **Spyder:** es una herramienta computacional diseñada para escribir y editar el código fuente para el desarrollo de algoritmos y/o programas (IDE). Spyder forma parte de la distribución Anaconda que consiste en un conjunto de herramientas orientadas a la programación en Python y ciencia de datos.
- **QtDesigner:** es una herramienta computacional que permite a los desarrolladores crear aplicaciones de manera visual, facilitando el aspecto que tiene cada ventana y la posición de los elementos UI que lo conforman. El diseñador del UI es presentado con una interfaz gráfica de usuario, en la que puede crear una nueva ventana y agregar los elementos arrastrándolos y colocándolos en la posición deseada dentro de esta (drag & drop). En la figura 3.2 se muestra la ventana principal de QtDesigner.

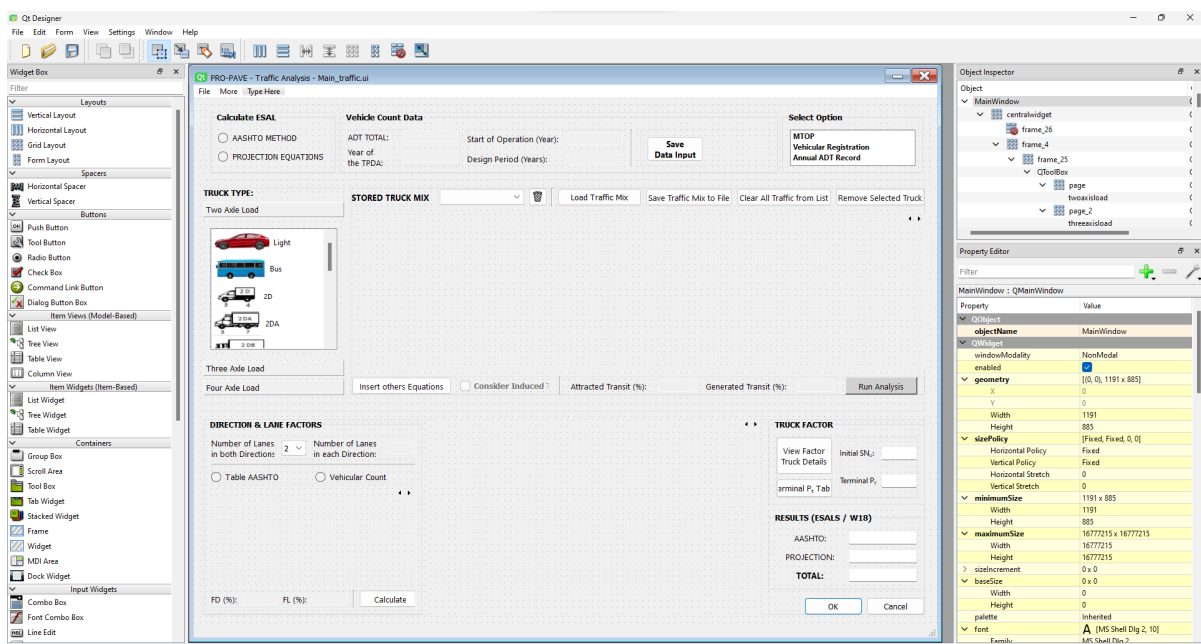


Figura 3.2: Interfaz gráfica de QtDesigner. La ventana de tráfico contiene imágenes de varias fuentes en objetos de lista [14, 16]

- **Librerías/herramientas principales:** para desarrollar el programa se recurrió a la implementación de varias librerías y herramientas disponibles actualmente en Python. Algunas de las principales son las siguientes:
 - **PyQt5:** provee a Python con un conjunto de herramientas necesarias para poder desarrollar aplicaciones. Se pueden crear ventanas principales y de diálogo, como también varios elementos UI utilizando el lenguaje de programación Python. La compatibilidad del UI diseñado en QtDesigner y el código principal debe incluir este conjunto de herramientas para poder desarrollar un producto que sea útil.
 - **Numpy:** esta librería resulta de gran ayuda para realizar operaciones numéricas entre vectores y matrices de manera más eficaz. Todas las operaciones con mayor grado de complejidad han sido desarrolladas con la ayuda de esta librería.
 - **Matplotlib:** esta librería permite a los usuarios graficar datos mediante líneas, barras, figuras y complementar los gráficos con etiquetas y ecuaciones.
 - **Pandas:** permite la manipulación de grandes grupos de datos ordenados en filas y columnas “dataframes” para su posterior análisis. Los métodos incluidos dentro de esta librería han sido de gran uso para poder también importar y exportar archivos a una o más interfaces dentro de su clase principal para su posterior uso.
 - **FPDF:** consiste en una librería orientada a generar archivos de tipo PDF para un uso futuro externo al programa. Aquí el usuario es proporcionado con un conjunto de herramientas que le permiten personalizar un reporte estándar de los datos de entrada, operaciones realizadas, y resultados que complementa el programa.
 - **Multiproceso y Multithreading:** ayudan a reducir el tiempo de ejecución de tareas dentro del programa, se ha recurrido a estas herramientas que permiten un mayor uso del poder de la computadora que el tradicional. En la ejecución estándar del código fuente, la computadora realiza las tareas de manera secuencial conforme está estructurado el código, por lo que algunas partes del código han de tomar un mayor tiempo de ejecución antes de pasar a la siguiente parte. Estas partes del código (cuellos de botella) que consumen un retraso son identi-

ficadas y reestructuradas con estas herramientas para hacer el código más eficiente. Ambas técnicas pueden ser utilizadas para lograr el paralelismo, que permite a los programas realizar múltiples tareas en el mismo tiempo de ejecución que al realizarlo de manera secuencial. “Multithreading” es utilizado para realizar tareas de manera concurrente de tipo I/O (entrada/salida), un ejemplo es descargar archivos simultáneamente, que, en el programa desarrollado, ha sido utilizado para generar gráficos de ecuaciones matemáticas (formato LaTeX) y de tipo 2D simultáneamente, reduciendo el tiempo de ejecución. En cuanto a operaciones complejas, se utiliza la herramienta “Multiprocessing”. Esta herramienta está enfocada en realizar operaciones que sean independientes de otros procesos que ocurran en el programa. Ambas técnicas son utilizadas en el programa por medio del método “futures” de la librería “concurrent”.

3.2 Módulo 1: Tráfico

El módulo de tráfico tiene por objeto realizar todas las operaciones relacionadas para poder obtener las repeticiones del tráfico, que servirá como dato de entrada para determinar una alternativa de diseño del pavimento flexible. En la figura 3.3 se presenta el diagrama de flujo del módulo de tráfico.

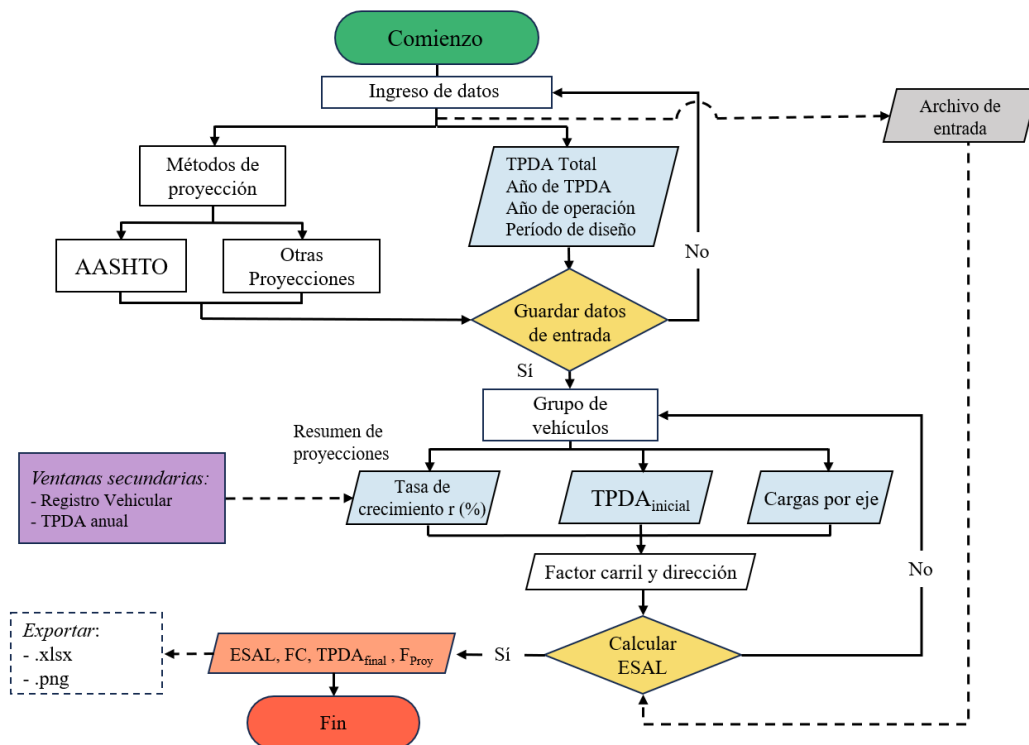


Figura 3.3: Diagrama de flujo del módulo de tráfico

Para el ingreso de datos es necesario seleccionar el método de proyección y las variables de entrada bajo el grupo de “Datos de conteo vehicular”.

Funciones:

- **Determinar factor carril y de dirección:** estos factores son determinados en base a dos opciones: valores según la guía de diseño de la AASHTO 93 y por conteo vehicular. Para la opción según la AASHTO, el usuario puede colocar un factor guiándose en los límites, o utilizar el botón calcular para utilizar el valor promedio de estos límites.
- **Factor camión:** este factor se determina según la ecuación 2.6 presentada en el capítulo 2. El factor es usado para la función principal, que es calcular el ESAL del grupo de vehículos proyectado.
- **Determinar ESAL:** corresponde a la función principal para determinar el ESAL usando la ecuación de la AASHTO (ecuación 2.7) y usando las ecuaciones de proyección (ecuación 2.8). Al ejecutar esta función, el usuario es presentado ante una ventana de diálogo para generar un gráfico de barras de los resultados de cada tipo de camión/vehículo.

Datos de entrada:

- **Datos de conteo vehicular:** corresponde al TPDA total, año del TPDA, año del comienzo de la operación de la vía y período de diseño (en años) de la vía a ser diseñada.
- **Tasa de crecimiento:** cada grupo de vehículos cuenta con una tasa de crecimiento, la cual es utilizada para proyectar el tráfico futuro en el período de diseño.
- **Grupo de camiones/vehículos:** se presenta una caja de herramientas con una lista del grupo de camiones/vehículos que están disponibles para realizar el análisis. Estos se encuentran separados por ejes y son utilizados para determinar el factor camión de cada uno en referencia al eje equivalente.
- **TPDA por camión/vehículo:** este dato corresponde al TPDA determinado según estudios de conteo vehicular realizados para la vía a diseñar.

- **Pesos por camión/vehículo:** corresponde a los pesos por cada eje comprendido en el camión/vehículo. Estos pesos sirven como dato de entrada para calcular el factor camión.
- **Factor de dirección y carril:** estos factores son utilizados en la función principal para realizar el análisis en el carril de diseño.

Datos de salida:

- **Factor camión:** corresponde al factor resultante del tipo de camión/vehículo y los pesos asignados por eje.
- **TPDA final:** este dato representa el tráfico promedio diario anual para el año de proyección ingresado dentro de "Datos de conteo vehicular". Adicionalmente, se presenta un gráfico del TPDA inicial y final de cada grupo de camiones/vehículos ingresados para el análisis.
- **Factor de proyección:** es determinado en base al período de diseño y la tasa de crecimiento, y es único para cada grupo de camiones/vehículos. El factor de proyección es calculado únicamente con la opción del método de proyección según la AASHTO en el análisis de tráfico.
- **ESAL:** corresponde al valor principal a determinar que será utilizado en el diseño del pavimento flexible.

Componentes adicionales:

- **Ventanas para determinar la tasa de crecimiento:** una vez que el usuario determina un método de proyección para determinar el ESAL, en la interfaz se permite el uso de opciones para determinar las tasas de crecimiento cuando el usuario no tiene definido una tasa de crecimiento para cada grupo de camiones/vehículos ingresados para el análisis.
- **Tráfico inducido:** para el cálculo del ESAL se puede considerar el tráfico inducido, el cual corresponde a la suma del tráfico atraído y generado.
- **Grupo de camiones almacenados:** dentro del programa se puede guardar un grupo de camiones/vehículos con sus cargas por eje que haya sido configurado

para simulaciones futuras. La configuración es guardada en un archivo .xlsx dentro de la carpeta del programa.

3.3 Módulo 2: Materiales

Se presentan 4 submódulos que están enfocados a caracterizar ciertas propiedades de los materiales capa de rodadura (mezcla asfáltica), base/subbase y el suelo de subrasante. Estos submódulos son: “Análisis granulométrico”, “Combinación de áridos”, “Diseño de la mezcla asfáltica – Método de Marshall” y “Módulo resiliente – Subrasante” (ver figura 3.1).

3.3.1 Análisis granulométrico

Este submódulo tiene por objeto determinar la curva granulométrica y todos los parámetros relacionados a esta. Aquí el usuario puede escoger el tipo de material para realizar el análisis granulométrico con un número definido de tamices. En la figura 3.4 se presenta el diagrama de flujo para el submódulo de análisis granulométrico.

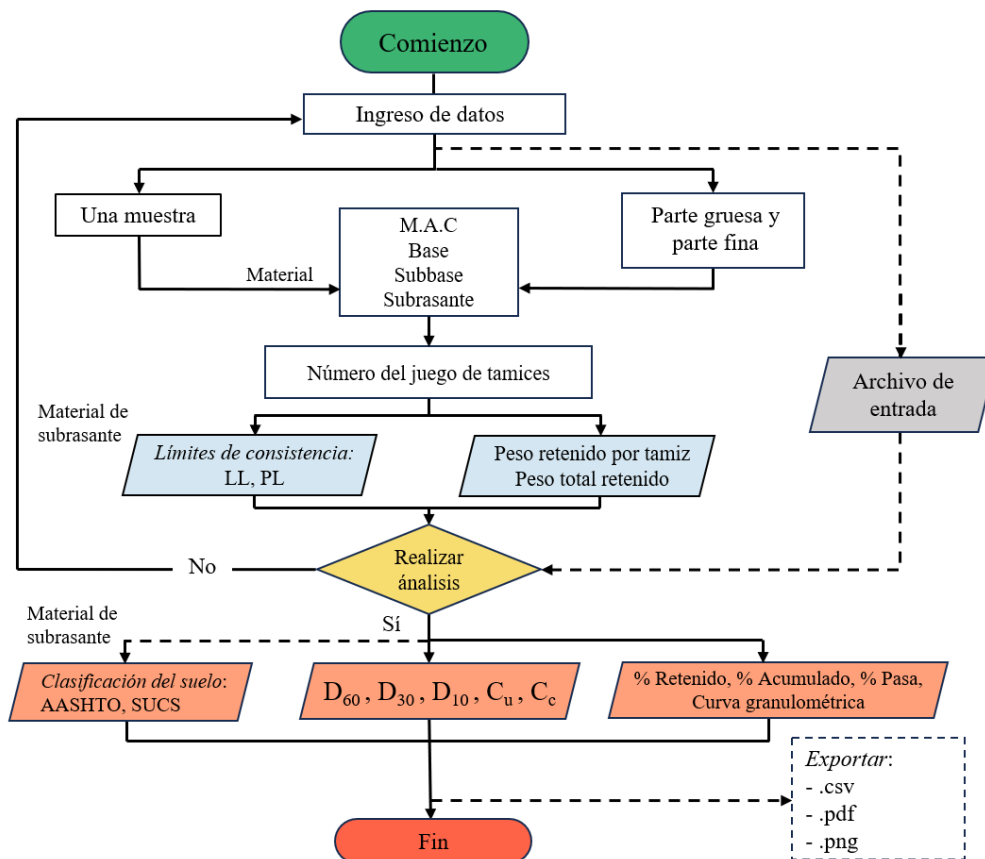


Figura 3.4: Diagrama de flujo del módulo de materiales para el análisis granulométrico (submódulo 1)

Funciones:

- **Determinación de porcentajes retenido, acumulado y pasante:** la función principal dentro del módulo determina los porcentajes para cada tamiz utilizado durante el tamizado, y así con estos resultados determinar la curva granulométrica.

Datos de entrada:

- **Tamices y pesos retenidos:** al asignar un número definido de tamices, deben ingresarse los tamices utilizados en el tamizado, en milímetros, y los pesos retenidos para cada uno de estos tamices. Los pesos retenidos se consideran como corregidos previo al análisis.
- **Peso total retenido:** se asigna la suma de todos los pesos retenidos para poder determinar los porcentajes retenido, acumulado y pasante.
- **Límites de consistencia:** se debe ingresar el límite líquido LL y el límite plástico PL al trabajar con materiales de subrasante para realizar la clasificación del suelo.

Datos de salida:

- **Tablas de porcentajes:** se obtienen los porcentajes retenidos, acumulado y pasante para el juego de tamices y los pesos retenidos ingresados.
- **Parámetros adicionales:** con la tabla de porcentajes obtenidos, se obtiene los diámetros D_{60} , D_{30} y D_{10} , así como los coeficientes de uniformidad C_u y concavidad C_c que sirven principalmente para la clasificación del suelo.
- **Clasificación del suelo:** para el caso de materiales de subrasante, una vez obtenido los parámetros adicionales, se obtiene la clasificación del suelo según SUCS y AASHTO.

3.3.2 Combinación de áridos

En este submódulo se determinan los porcentajes que pasan para un número definido de áridos y se permiten combinar hasta 5 áridos. El porcentaje que pasa de la combinación es presentado también de forma gráfica, con los límites superior e inferior

a cumplir. De no cumplir con estos rangos, se debe realizar nuevamente el análisis cambiando los parámetros de entrada hasta obtener un resultado satisfactorio. En la figura 3.5 se presenta el diagrama de flujo para el submódulo combinación de áridos.

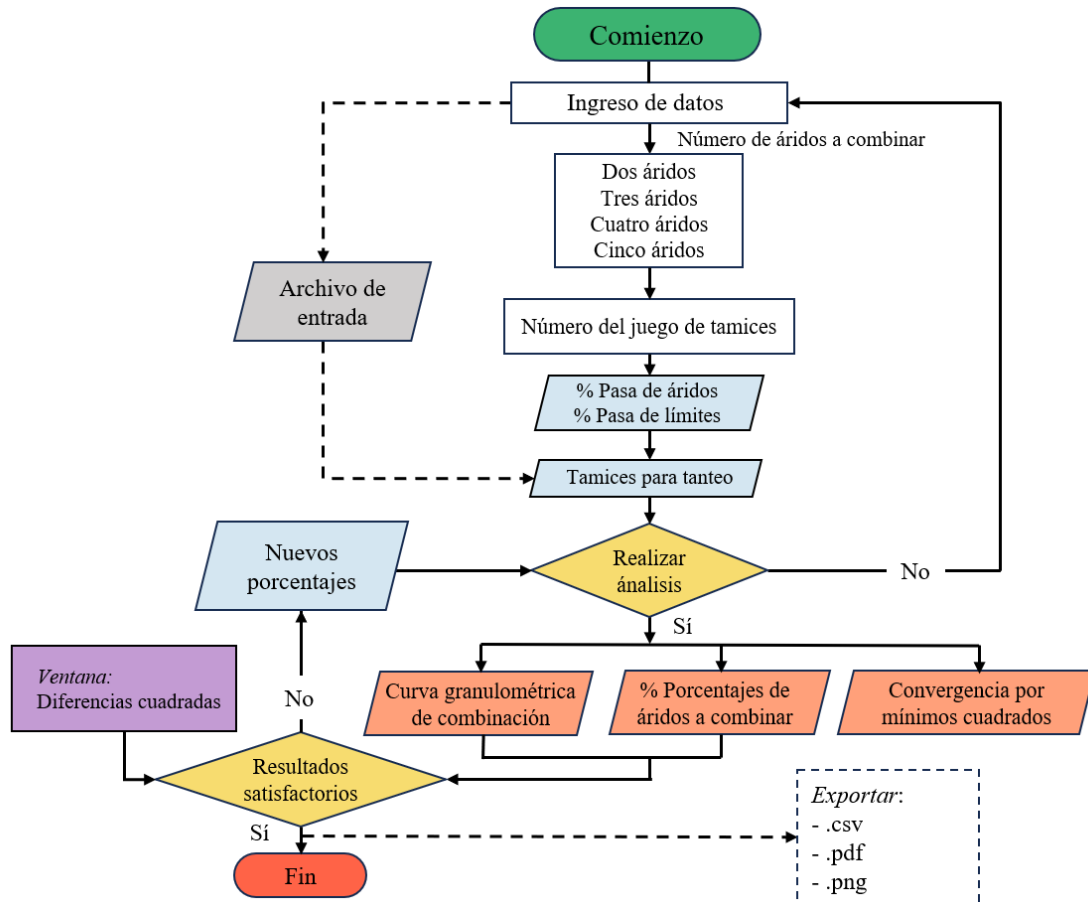


Figura 3.5: Diagrama de flujo del módulo de materiales para la combinación de áridos (submódulo 2)

Funciones:

- **Combinación de áridos por tanteo – método analítico:** en base a los porcentajes pasantes del número de áridos a combinar, y los tamices seleccionados, se determina la curva granulométrica de la combinación de áridos. Los porcentajes pueden ser modificados de manera manual por parte de usuario para obtener un resultado a manera de tanteo.
- **Combinación de áridos por mínimos cuadrados:** en esta función el objetivo es determinar los porcentajes en un rango positivo de valores. En caso de obtener resultados negativos, se presenta una ventana informando al usuario que el método de mínimos cuadrados no converge y debe utilizarse otro método

para la combinación.

Datos de entrada:

- **Tamices y porcentajes pasantes:** se ingresa el juego de tamices y los porcentajes que pasan de cada árido a combinar.
- **Límite superior e inferior:** estos porcentajes serán utilizados para determinar una curva promedio con la cual se realizará la combinación por los métodos de tanteo y mínimos cuadrados.
- **Tamices para el método de tanteo:** se deben de ingresar los tamices que serán utilizados para resolver el sistema de ecuaciones en el método de tanteo para determinar los porcentajes resultantes.

Datos de salida:

- **Porcentajes que pasan de la curva combinada:** estos porcentajes son mostrados en la ventana principal para ambos métodos (si converge por mínimos cuadrados).
- **Porcentajes de cada árido:** estos porcentajes son mostrados en un cuadro de resultados el cual se va actualizando en el caso de realizarse varias simulaciones dentro del programa.
- **Estado de convergencia:** para el método de mínimos cuadrados, en el cuadro de resultados, se informa al usuario si el método ha dado o no, resultados aceptables.

Complementos adicionales:

- **Diferencias cuadradas:** adicionalmente, está disponible una opción que determina por diferencias cuadradas un valor total entre la curva de combinación calculada y la curva promedio de las curvas de los límites superior e inferior ingresados. Este valor puede ser interpretado por el usuario para entender de manera numérica, que tan precisa es la curva de combinación comparado con la curva promedio, a diferencia de observar visualmente estas curvas.

3.3.3 Diseño de la mezcla asfáltica – Método de Marshall

En este submódulo se realizan todos los cálculos para determinar el contenido óptimo de asfalto a ser utilizado en las capas de rodadura o en bases bituminosas. Aquí el usuario ingresa los datos obtenidos del ensayo de Marshall de todas las muestras para determinar los valores promedios de cada porcentaje, las cuales se utilizan para determinar las curvas de tendencia. Con las curvas de tendencia se determina el contenido de asfalto óptimo tal que cumpla con los criterios de diseño establecidos por la AIM (Asphalt Institute Method) y NAPA (National Asphalt Pavement Association).

En la figura 3.6 se presenta el diagrama de flujo para el submódulo del diseño de la mezcla asfáltica.

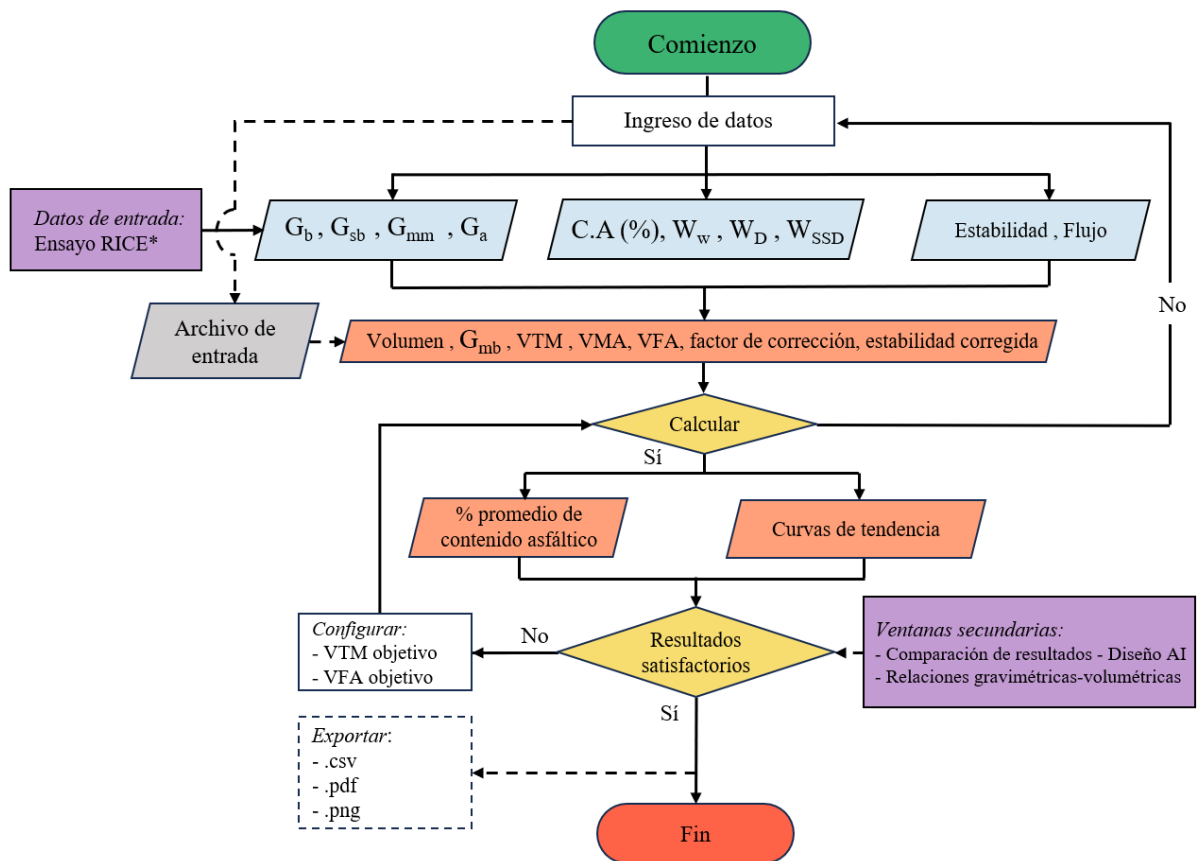


Figura 3.6: Diagrama de flujo del módulo de materiales para el diseño de la mezcla asfáltica (submódulo 3)

Funciones:

- **Determinación de datos de entrada adicionales:** estos valores adicionales son determinados en base a la tabla de valores de entrada (ver figura 3.6) y los valores de peso específico del asfalto (G_b), peso específico del agregado (G_{sb}) y peso específico aparente del agregado (G_{sa}) o peso específico máximo teórico de una muestra (G_{mm}).
- **Estabilidad corregida:** la estabilidad no corregida ingresada en la tabla de entrada de datos del programa.
- **Valores promedio para cada porcentaje de contenido asfáltico:** con los datos de entrada determinados, se calculan los valores promedio de estabilidad corregida, G_{mb} , Flujo, VTM, VMA y VFA representativos de cada porcentaje de contenido asfáltico.
- **Curvas de tendencia:** estas curvas son determinadas en base a los valores promedio calculados anteriormente. Estas curvas son de tipo polinómico de segundo grado.

Datos de entrada:

- Peso específico del asfalto G_b .
- Peso específico del agregado G_{sb} .
- Peso específico aparente del agregado G_{sa} .
- Peso específico máximo teórico G_{mm} .
- Estabilidad no corregida.
- Contenido asfáltico por muestra.
- Peso al aire de espécimen seco W_D .
- Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco W_{SSD} .
- Peso del espécimen saturado sumergido W_w .
- Fluencia (0.01 pulgadas).

Datos de salida:

- Volumen de la muestra.
- Porcentaje de vacíos en la probeta (VTM).
- Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).
- Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA).
- Factor de corrección para la estabilidad.
- Estabilidad corregida.
- Contenido de asfalto óptimo.

Complementos adicionales:

- **Datos del ensayo RICE:** se presenta una ventana de diálogo para ingresar los resultados de este ensayo y determinar el peso específico máximo teórico G_{mm} de cada muestra.
- **Relaciones gravimétricas/volumétricas:** una vez que se ha determinado el contenido de asfalto óptimo, se permite al usuario interactuar con una ventana de diálogo donde se presenta todas estas relaciones específicas de cada muestra utilizada para en el ensayo Marshall.
- **Contenido óptimo:** se presenta al usuario una ventana, en la que puede comparar los resultados del contenido de asfalto óptimo con los valores permisibles según los criterios del Instituto del Asfalto.

3.3.4 Cálculo del módulo resiliente – Subrasante

Este submódulo tiene por objeto determinar el módulo resiliente representativo en el período de un año del material de subrasante. En la figura 3.7 se presentan los diagramas de flujo para el cálculo del módulo resiliente y CBR como ventana secundaria para estimar el módulo resiliente.

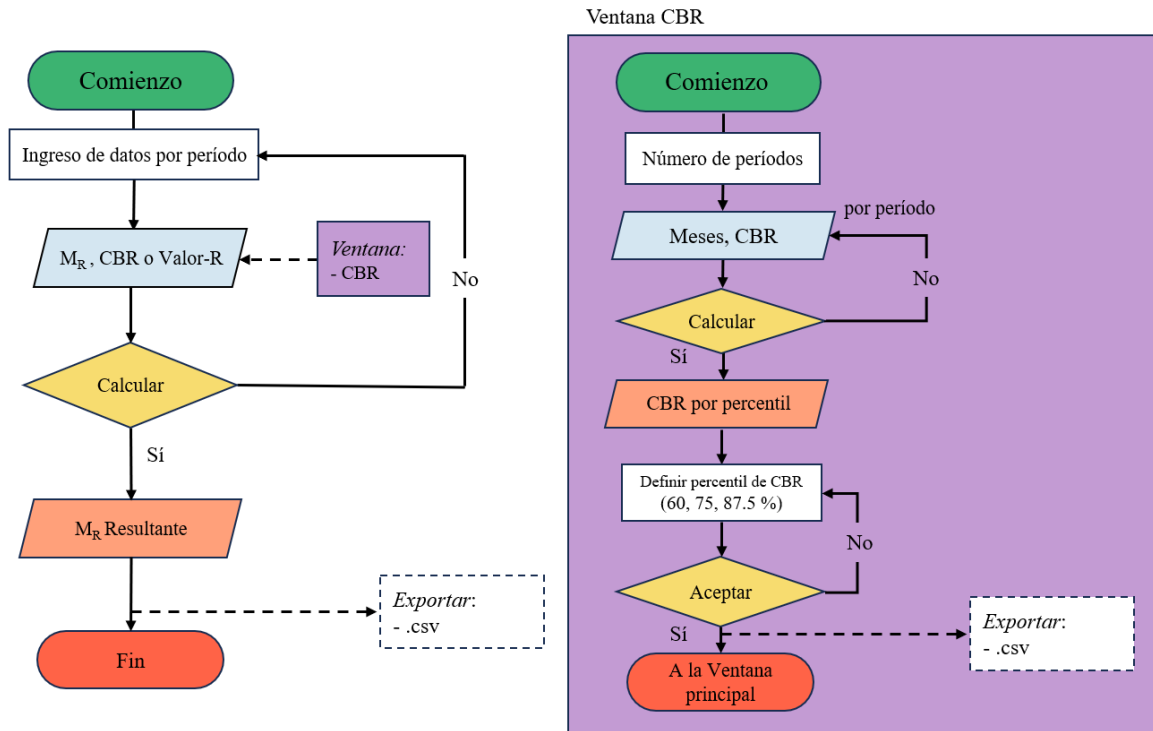


Figura 3.7: Diagramas de flujo del módulo de materiales para el cálculo del módulo resiliente para la subrasante y CBR (submódulo 4)

3.3.4.1 Ventana principal – Módulo resiliente

Funciones:

- **Determinar el módulo resiliente:** el módulo resiliente de cada mes o mitad de mes es ingresado o calculado a partir de correlaciones para determinar el daño relativo (ver ecuación 2.14) y el daño relativo promedio. Con este valor se calcula el valor resultante de módulo resiliente en la subrasante.

Datos de entrada:

- Módulo resiliente.
- CBR (%).
- Valor-R.

Datos de salida:

- Módulo resiliente resultante en el período de un año.

3.3.4.2 Ventana secundaria – Cálculo del CBR

Funciones:

- **Asignación de períodos:** se muestra una ventana de diálogo en la que el usuario puede asignar cada mes del año a cada período a realizar el análisis.
- **Cálculo de CBR por percentiles:** en la función principal se calcula los CBR por cada período para los percentiles 87.5%, 75% y 60%.
- **Aceptar resultados:** en esta función el usuario ingresa como argumento el percentil con el que se tomarán los valores del CBR para ser trasladados a la ventana principal. En la ventana principal, se asignan los resultados con la ayuda de un diccionario (percentil, período y valor de CBR) por mes según corresponda.

Datos de entrada:

- Resultados de CBR por período.
- Meses por período.

Datos de salida:

- CBR representativo por período para los percentiles 87.5%, 75% y 60%.

3.4 Módulo 3: Diseño del pavimento flexible

Este módulo comprende el diseño para una estructura nueva de pavimento (submódulo 1) y el diseño de sobrecarpetas en caso de que el pavimento requiera un tipo de rehabilitación (submódulo 2).

3.4.1 Diseño de la estructura inicial de pavimento flexible

En este submódulo se tiene por objeto determinar un sistema de capas, tales que puedan soportar las cargas del tráfico estandarizadas como ESAL. En la figura 3.8 se presenta el diagrama de flujo a seguir para el diseño inicial de una nueva estructura de pavimento flexible.

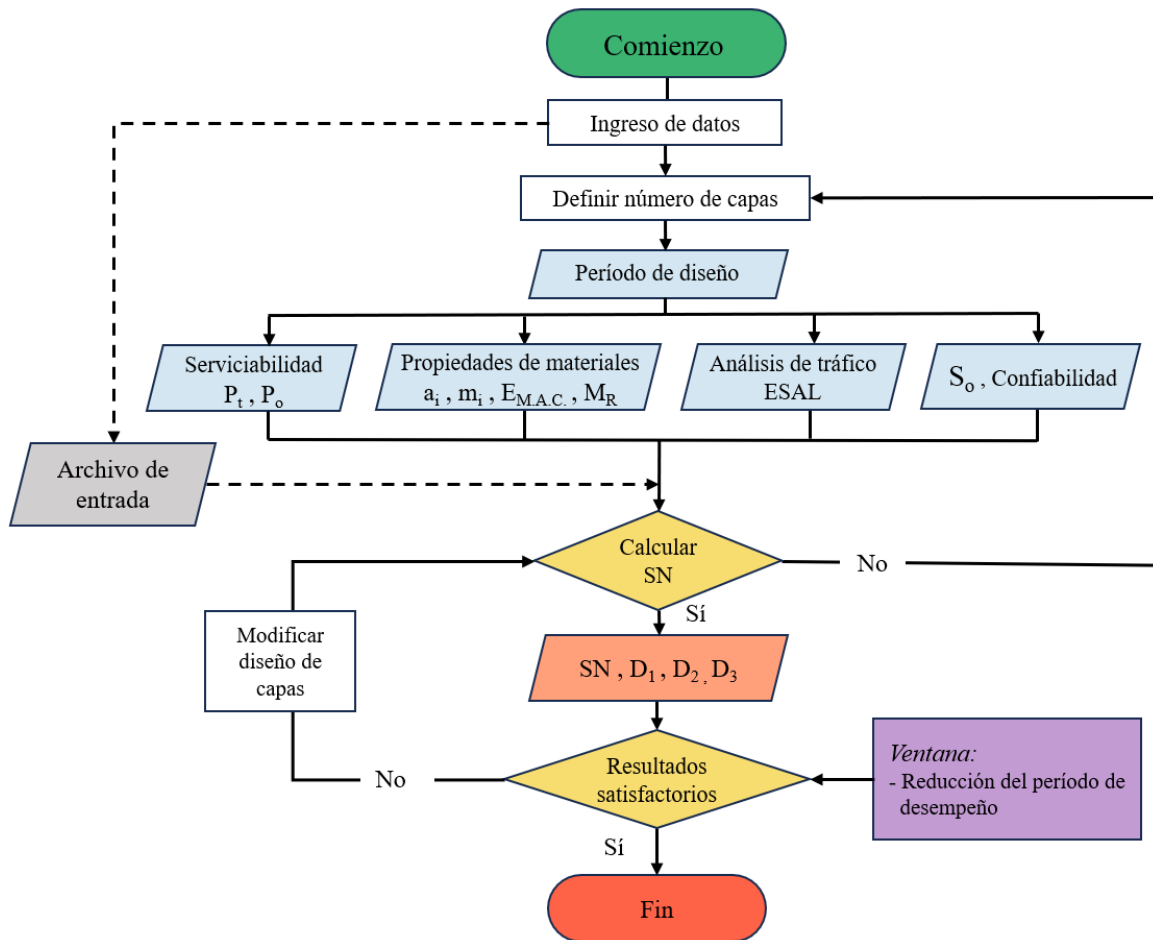


Figura 3.8: Diagramas de flujo del módulo de diseño para determinar la estructura inicial del pavimento flexible (submódulo 1)

Funciones:

- **Determinación del número estructural:** una vez definidos todos los parámetros de entrada, con la ecuación 2.28, se determina el número estructural (SN) de manera implícita por un método de raíz escalar. Con el número estructural definido, se obtienen los espesores del sistema de capas de pavimento usando las ecuaciones 2.30, 2.31, 2.32, 2.33 y 2.34 como primera aproximación.
- **Reconfiguración de los espesores:** con el número estructural determinado, el usuario puede ingresar valores de manera manual para las capas del pavimento, y el programa calcula inmediatamente una nueva combinación para los espesores restantes basados en el ingresado.

Datos de entrada:

- **ESAL:** este valor representa el número de repeticiones que se espera que soporte el pavimento durante su período de desempeño. Puede ser calculado dentro del programa con la ayuda del módulo de tráfico o ingresado de manera directa por el usuario.
- **Desviación estándar y confiabilidad:** para el pavimento flexible se recomienda valores entre 0.40 y 0.50. Para la confiabilidad, se presenta en el programa una tabla de referencia basado en el tipo de vía y su clasificación (ver figura 4.35).
- **Serviciabilidad:** índices de serviciabilidad inicial y final.
- **Coefficientes estructurales o de capa:** para las capas de rodadura, base y subbase, estos coeficientes pueden ser estimados en base a varios parámetros característicos que representen su resistencia, por ejemplo, el módulo elástico dinámico para la mezcla asfáltica, el valor de CBR para las capas de base (granular) y subbase. Dentro del programa se han obtenido ecuaciones de correlación para la mayoría de los parámetros basados en las figuras 2.17, 2.18, 2.19, 2.20 y 2.21.
- **Coefficientes de drenaje:** el programa presenta una tabla de referencia de la guía de diseño de la AASHTO 93 que se basa en la calidad de drenaje y porcentaje drenado (ver tabla 2.18).

Datos de salida:

- Número estructural.
- Espesores de las capas del pavimento.

Complementos adicionales:

- **Establecer relación espesor entre capas:** al usar esta opción los espesores del pavimento son determinados basándose en la tabla 2.19, y, a la vez cumpliendo una relación mínima de 1.5 entre la capa superior e inferior.

- **Período de desempeño considerando condiciones ambientales:** el período de desempeño se determina al realizar el siguiente proceso iterativo descrito por la guía de diseño AASHTO 93:
 - **Paso 1:** elegir el número estructural apropiado para la estructura del pavimento inicial [1].
 - **Paso 2:** elegir un período de desempeño inicial esperado para las condiciones ambientales [1].
 - **Paso 3:** determinar la pérdida de serviciabilidad para las condiciones ambientales en el período elegido [1].
 - **Paso 4:** reducir la pérdida de serviciabilidad para las condiciones ambientales y tráfico (ver ecuación 2.37) [1].
 - **Paso 5:** estimar el ESAL correspondiente a la pérdida de serviciabilidad por el tráfico [1].
 - **Paso 6:** estimar el año correspondiente para el ESAL determinado en el paso 5 [1].
 - **Paso 7:** comparar el período de desempeño escogido en el paso 2 con el calculado en el paso 6. Si la diferencia es mayor a un año, se calcula un período de desempeño promedio para realizar una nueva iteración, en caso de ser menor, se llega a la convergencia y se utiliza el promedio entre este valor y el de la última iteración como el período de desempeño predicho del pavimento diseñado [1].

3.4.2 Diseño de sobrecarpetas con mezcla asfáltica

En este submódulo se determina el espesor de la sobrecarpeta en base a tres métodos que pueden ser utilizados individualmente o en conjunto para el cálculo. Esto da al usuario varios resultados sobre el mismo parámetro que le ayuda a tomar una decisión sobre la variabilidad respecto a los datos proporcionados y también la validación de la respuesta generada si esta es similar entre los métodos utilizados. En las figuras 3.9 y 3.10 se presentan los diagramas de flujo para el diseño de sobrecarpetas con mezcla asfáltica.

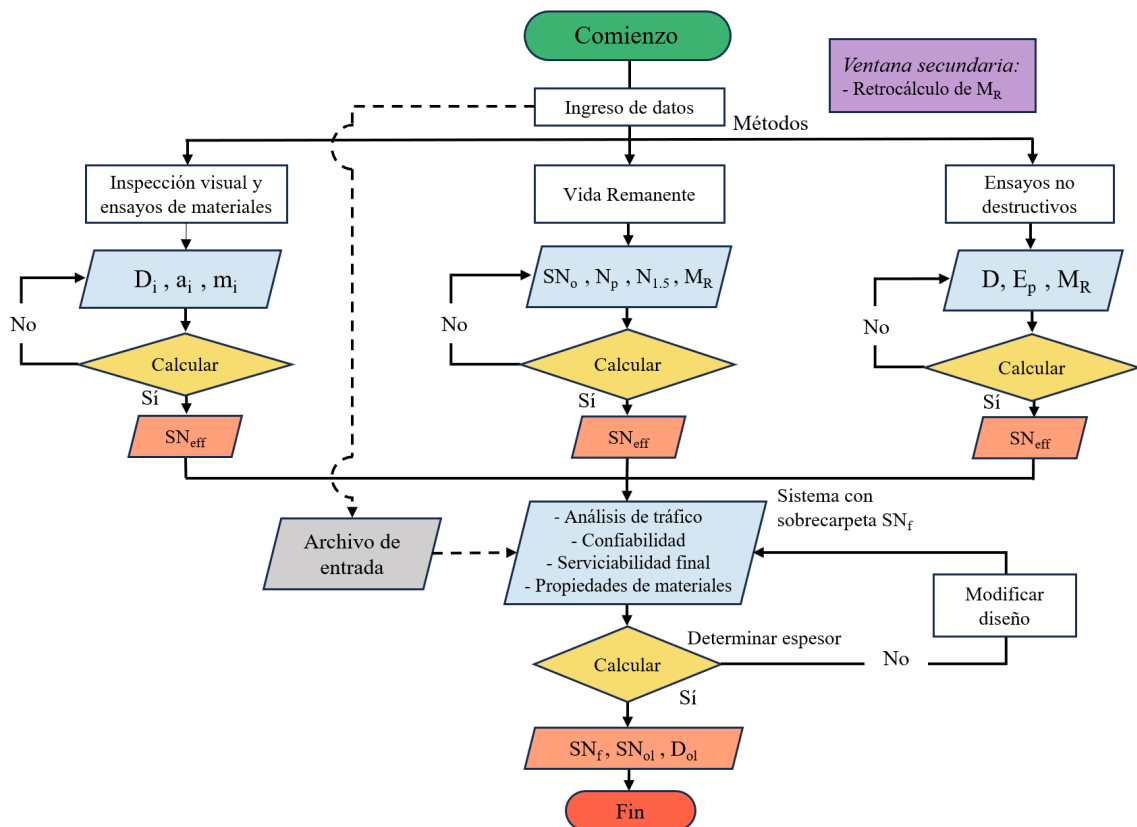


Figura 3.9: Diagramas de flujo del módulo de diseño para determinar el espesor de la sobrecarpeta con mezcla asfáltica (submódulo 2)

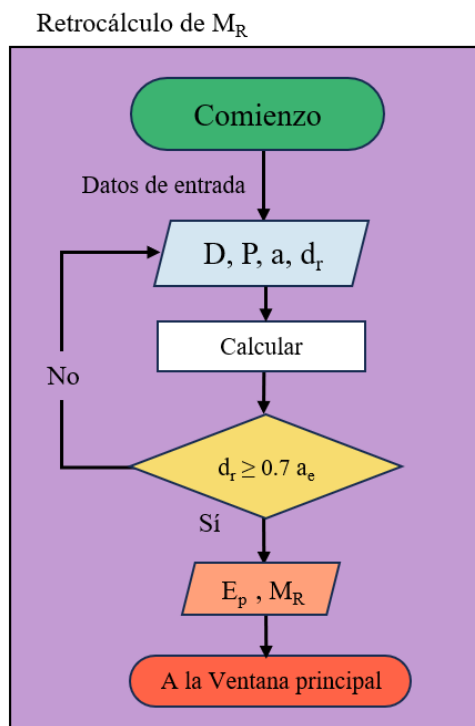


Figura 3.10: Diagrama de flujo para el M_R retrocalculado

Funciones:

- **Determinar SN_{eff} por el método de inspección visual y ensayos de materiales:** en este método se utiliza la ecuación 2.39 para obtener el número estructural efectivo. Los coeficientes estructurales y de drenaje son ingresados por el usuario, y también se incorpora la tabla 2.18 y figura 2.25 como recomendaciones.
- **Determinar SN_{eff} por el método de ensayos no destructivos:** para este método puede utilizarse la ventana de retrocálculo del módulo resiliente para obtener E_p y M_R . El número efectivo es determinado con la ecuación 2.40.
- **Determinar SN_{eff} por el método de vida remanente:** se obtiene un porcentaje de vida remanente basado en el número de repeticiones a la fecha (N_p) y hasta la falla ($N_{1.5}$). Con este valor se determina el factor de condición (ver figura 2.26) para el cual, se ha determinado una ecuación de relación con la vida remanente.

Datos de entrada:

- Módulo elástico dinámico de la sobrecarpeta (E_{MAC}).
 - Coeficiente estructural o de capa de la sobrecarpeta (a_i).
 - ESAL para el nuevo período de diseño.
 - Desviación estándar y confiabilidad.
 - Módulo resiliente actual de la subrasante (M_R).
 - Índices de serviciabilidad (P_t, P_o).
- Inspección visual y ensayos de materiales:**
- Coeficientes estructurales o de capa actuales del pavimento.
 - Coeficientes de drenaje.
 - Espesores de las capas del pavimento.

- Ensayos no destructivos (NDT):

- Módulo efectivo del paquete estructural (E_p).
- Módulo resiliente actual de la subrasante (M_R).
- Espesor total del paquete estructural.

- Vida remanente:

- ESAL para una serviciabilidad final de 1.5 ($N_{1.5}$) y ESAL actual (N_p).
- Desviación estándar y confiabilidad para el pavimento actual.
- Módulo resiliente actual de la subrasante (M_R).
- Índice de serviciabilidad inicial (P_o).

Datos de salida:

- Número estructural efectivo (SN_{eff}).
- Numero estructural final (SN_f).
- Espesor de la sobrecarpeta (D_{ol}).

Complementos adicionales:

- **Retrocálculo del módulo resiliente:** el submódulo cuenta con una ventana de diálogo para retrocalcular el módulo resiliente de la subrasante (M_R) y el módulo efectivo del paquete estructural (E_p) basándose en las ecuaciones 2.43, 2.44 y 2.45. En la parte derecha de la figura 3.9 se muestra el diagrama de flujo de este complemento para el retrocálculo del módulo resiliente.

Datos de entrada:

- Datos de deflexión a una distancia de 0 y 12, 24 o 36 plg de distancia.
- Carga aplicada sobre el plato.
- Radio del plato de carga.
- Espesor total del paquete estructural
- Factor de corrección y ajuste por temperatura.

3.5 Módulo 4: Análisis estructural del pavimento

En este módulo se determinan los esfuerzos y deformaciones del pavimento basándose en la teoría de Burmister (1943), la cual es utilizada para realizar cuatro tipos de análisis: lineal, no-lineal, viscoelástico y combinado. En la figura 3.11 se presenta el diagrama de flujo para el módulo de análisis estructural del pavimento flexible.

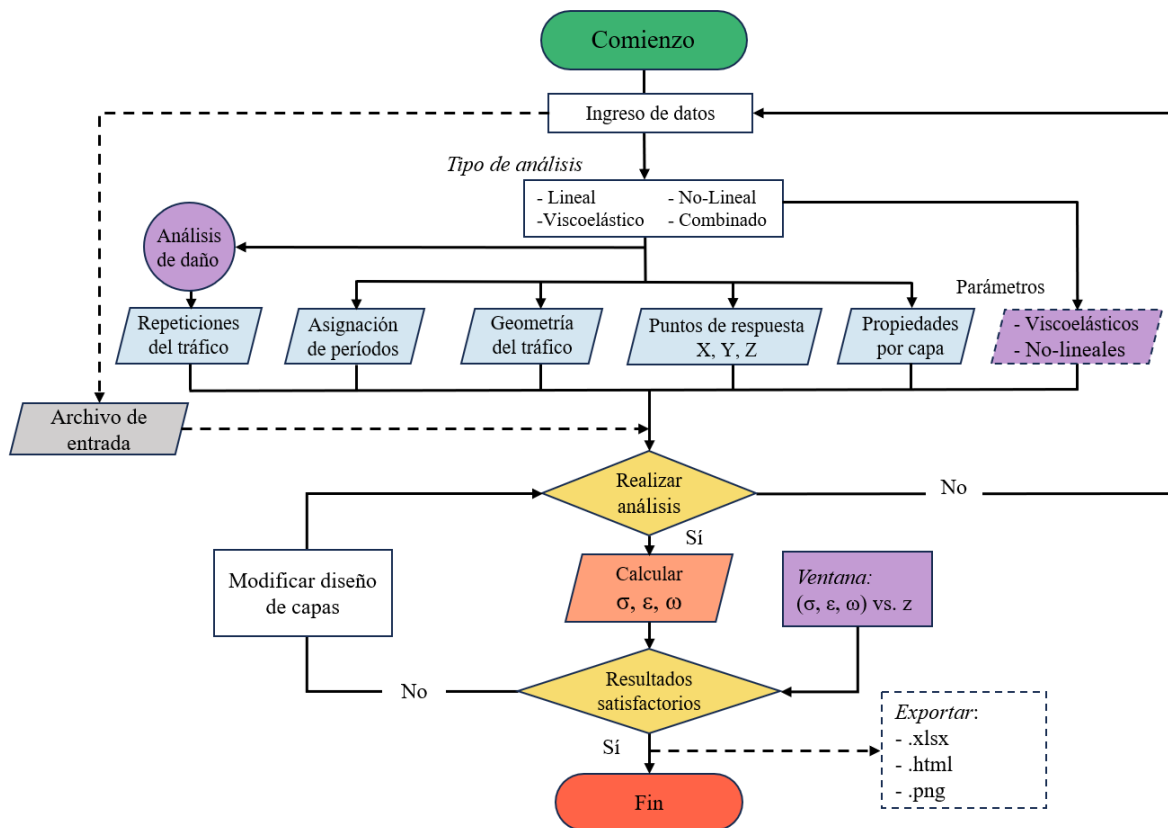


Figura 3.11: Diagrama de flujo del submódulo de análisis estructural del pavimento flexible

Funciones:

- **Visualización de la geometría del pavimento y configuración de ejes:** dentro de este módulo se puede visualizar la geometría del pavimento y la configuración de carga de manera inmediata conforme el usuario ingresa los datos. En el programa se permite el ingreso de hasta 5 ejes para realizar el análisis estructural. Al contar con diferentes configuraciones de ejes, se genera un objeto único para la visualización de cada uno, y usando "multithreading", se grafican los resultados de manera concurrente para disminuir el tiempo de ejecución que al realizar este proceso de manera secuencial (ver figura 3.12).

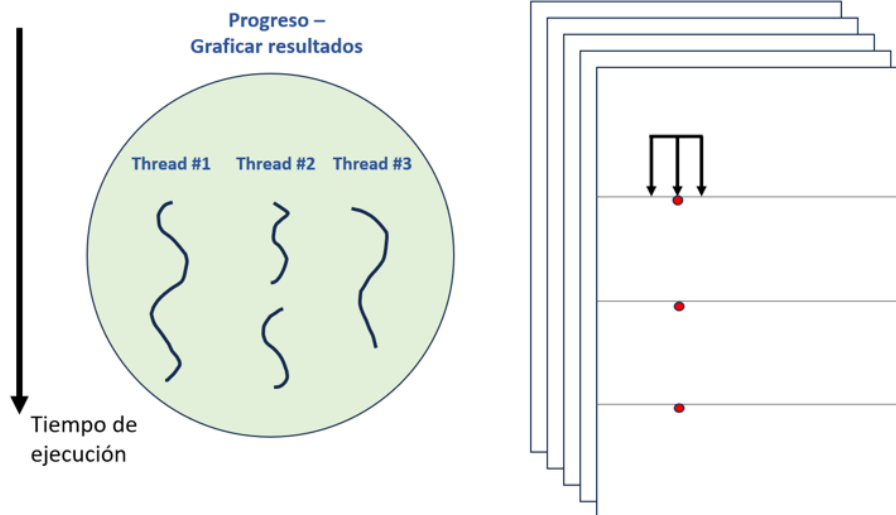


Figura 3.12: Uso de “multithreading” para graficar resultados de manera concurrente en ejecución. Adaptada de “A process with two threads of execution, running on a single processor” Fuente: Wikipedia

- **Determinación de esfuerzos y deformaciones:** una vez ingresados todos los datos de entrada, el programa se enfoca primero en determinar las constantes de integración A_i , B_i , C_i y D_i que serán utilizados para realizar la integración numérica a partir de la ecuación 2.62. El número del grupo de constantes está determinado según el número de iteraciones máximas a realizar. Las constantes dependen de las siguientes variables:

- Módulos elásticos por temporada.
- Coeficientes de Poisson.
- Distancia radial del punto de análisis respecto al centro del área de contacto.
- Radio del área de contacto.

Al contabilizar todas estas variables para los ejes disponibles y el análisis aplicado, el tiempo de ejecución para determinar estos coeficientes aumenta considerablemente por lo que es necesario realizar el proceso utilizando el paralelismo para disminuir el tiempo de ejecución de esta tarea. El “multiprocessing” es utilizado para determinar estos coeficientes tomando una parte del conjunto de datos de entrada para realizar el proceso de manera independiente (ver figura 3.13). Con los coeficientes determinados, se realiza una nueva instancia para el

cálculo de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones para cada eje, para cada período y según el tipo de análisis.

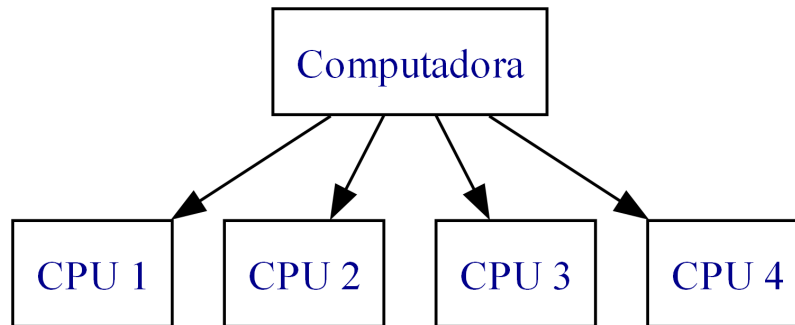


Figura 3.13: Uso de “multiprocessing” para determinar las constantes de integración A_i , B_i , C_i y D_i

- **Análisis no-lineal:** para este análisis se utilizan los datos de entrada no-lineales para determinar de manera iterativa los módulos elásticos de cada capa no-lineal. Estos módulos E serán utilizados en el análisis lineal para determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones del sistema de capas del pavimento.
- **Análisis viscoelástico:** para realizar este análisis se requiere de los datos de la curva de fluencia, la cual es determinada dentro de la ventana “Configurar viscoelástico”. El usuario debe declarar si las cargas son estáticas o dinámicas (móviles) para realizar el análisis.
- **Análisis combinado:** comprende la determinación de los módulos elásticos E para las capas no-lineales y el análisis viscoelástico para la capa de rodadura.

Datos de entrada:

- Número de períodos.
- Geometría de los ejes.
- Puntos de análisis (x, y, z) .
- Número de capas.
- Espesor y coeficientes de Poisson de las capas.
- Módulos elásticos por cada período de cada capa.
- Repeticiones del tráfico por cada eje introducido (Análisis de daño).

- Análisis no-lineal:

- Número de capas no-lineales.
- Coordenadas (x, y, z) para el cálculo de los módulos elásticos no-lineales.
- Tipo de material y coeficientes no-temporales (K_2, K_3 y K_4).
- Coeficientes temporales K_1 .
- Módulos elásticos máximos y mínimos permisibles (Material de tipo fino).

- Análisis viscoelástico:

- Número de capas viscoelásticas.
- Temperatura de referencia para lectura para la curva de fluencia.
- Temperaturas por cada período.
- Tipo de carga: estática o dinámica (tiempo de duración de ser dinámica).

Datos de salida:

- Esfuerzos, deformaciones y deflexiones para cada eje y por cada período.
- Valores de curva de fluencia para cada período.
- Módulos elásticos para las capas no-lineales.
- Módulos elásticos estáticos o dinámicos para las capas viscoelásticas.

Complementos adicionales:

- **Análisis de daño:** con los datos de esfuerzos, deformaciones y deflexiones se utilizan las ecuaciones 2.102, 2.103 y 2.104 para determinar los números de repeticiones permisibles en el período de diseño del pavimento.
- **Gráficos de resultados para las respuestas del pavimento:** se permite interactuar con una ventana con gráficos de esfuerzo, deformación y deflexión verticales vs. profundidad, como también el bulbo de presiones de un área de contacto. Esto da al usuario una interpretación visual de como se comporta el sistema de capas del pavimento antes las cargas del tráfico.

Capítulo 4

4. Procedimiento para la ejecución del programa

En este capítulo se presenta la secuencia a seguir dentro del programa para una correcta ejecución de cada módulo comprendido. El programa cuenta con la opción de configurar el idioma en inglés y español, además en el módulo de materiales se permite generar reportes de tipo PDF.

Se presentan en el anexo B los formatos estándar del submódulo de “análisis granulométrico”, “combinación de áridos” y “método de Marshall” para la simulación del diseño vial realizado por el Gobierno Provincial de Loja presentado en el capítulo 5.

En la figura 4.1 se presenta la ventana principal del programa.



Figura 4.1: Ventana principal del programa. La ventana contiene imágenes AI creadas usando el modelo GPT-3 [16]

4.1 Módulo 1: Tráfico

Este módulo permite calcular el número de ejes equivalentes en el carril de diseño y en el período de diseño (ESAL). La interfaz cuenta con dos opciones para determinar los ESAL, el primero según la AASHTO usando la ecuación 2.7 y el segundo mediante ecuaciones de proyección del tráfico usando la ecuación 2.8. En la figura 4.2 se indica la ventana del módulo 1.

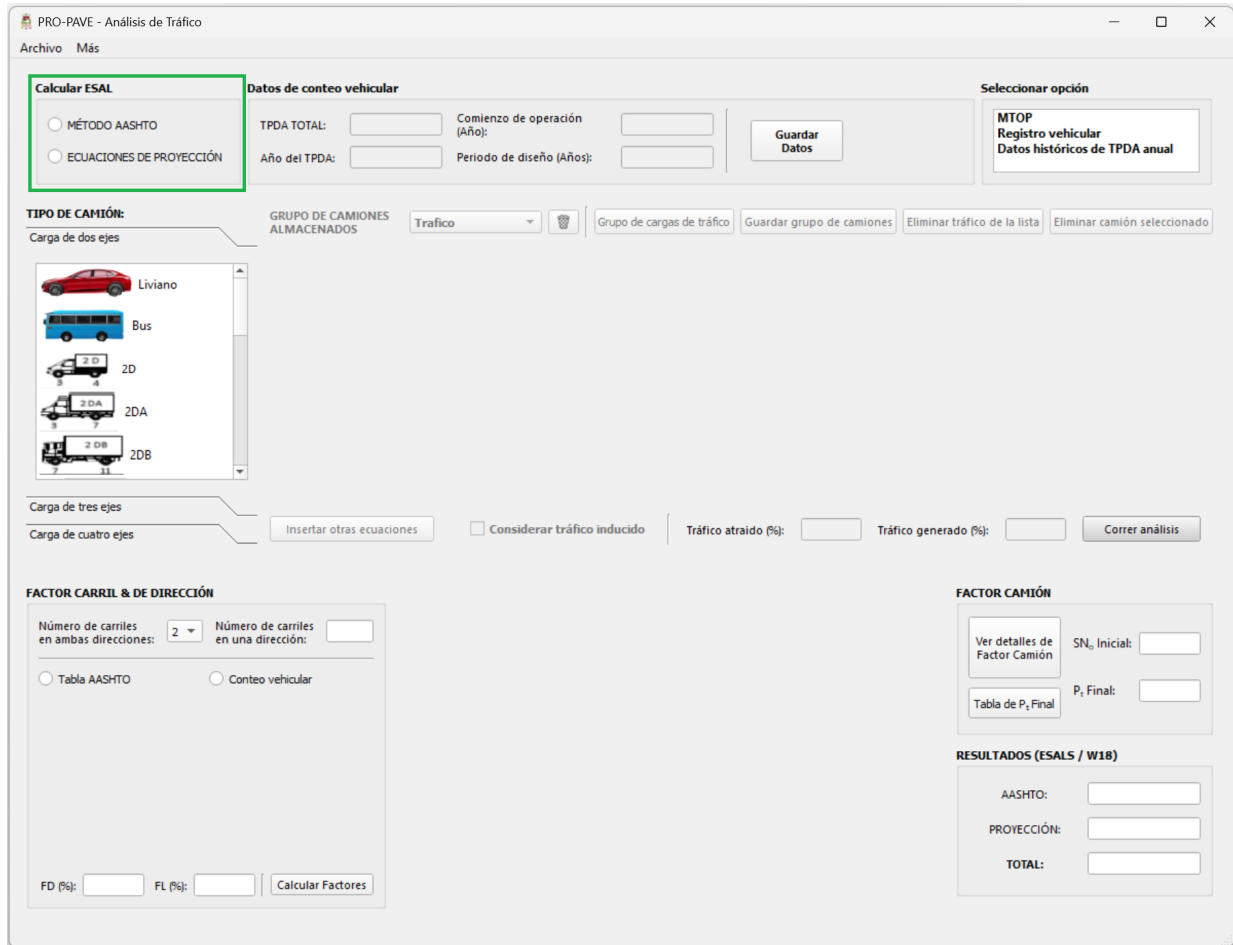


Figura 4.2: Interfaz gráfica del módulo 1 - Tráfico. La ventana contiene imágenes de varias fuentes en objetos de lista [14, 16]

4.1.1 Ejecución para ingresar datos con la opción AASHTO

Al seleccionar la opción AASHTO se despliega una tabla para ingresar la información referente a tipo de vehículo con su respectivo TPDA y su tasa de crecimiento (ver figura 4.3).

Datos de Tráfico		Cargas de Tráfico					
TIPO	TPDA (Actual)	Tasa de Crecimiento (%)	Porcentaje (%)	TPDA (Inicial)	TPDA (Final)	Factor de Proyección (FP)	W18 (ESAL)

Datos de Tráfico		Cargas de Tráfico			
Tipo	Eje 1 (Ton)	Eje 2 (Ton)	Eje 3 (Ton)	Eje 4 (Ton)	Factor Camión (FC)

Figura 4.3: Tabla para ingresar datos vehiculares y cargas por eje, método AASHTO

Los tipos de vehículos que permite usar el programa se muestran según el número de ejes en función de la clasificación dictaminada por el MTOP (ver figura 4.4).

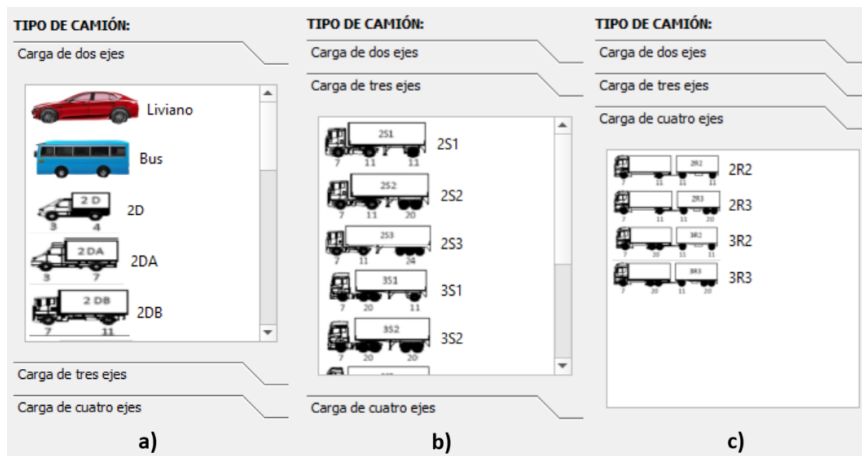


Figura 4.4: Tipos de vehículos: a) Dos ejes b) Tres ejes c) Cuatro ejes. Objetos de lista contienen imágenes de varias fuentes [14, 16]

Al momento de cargar los vehículos automáticamente se incluyen las cargas por eje, que servirán para obtener el factor camión de cada vehículo. Adicionalmente, en la parte superior de la ventana (ver figura 4.5) se debe ingresar y guardar los siguientes parámetros:

- Tráfico promedio diario anual (TPDA) total de la vía.
- Año del conteo vehicular.
- Inicio de operación de la vía.
- Período de diseño de la estructura del pavimento.

Datos de conteo vehicular

TPDA TOTAL: Comienzo de operación (Año):

Año del TPDA: Periodo de diseño (Años):

Guardar Datos

Figura 4.5: Parámetros para el diseño de la estructura, método AASHTO

Uno de los parámetros importantes dentro del análisis del tráfico es la tasa de crecimiento vehicular. Por ello, en caso de no conocer este dato dentro del programa se ha incluido tres opciones para determinarlo (ver figura 4.6).

Seleccionar opción

MTOP
 Registro vehicular
 Datos históricos de TPDA anual

Figura 4.6: Opciones para determinar la tasa de crecimiento vehicular

La primera recomienda datos de un estudio ejecutado por el MTOP en el año 2009 según el tipo de vehículo (ver figura 4.7).

Tabla MTOP

Tasas de crecimiento de para cada tipo de vehículo:
* Valores extrapolados

Periodo	Livianos	Buses	Camiones
2010-2015	4.47	2.22	2.19
2015-2020	3.97	1.97	1.94
2020-2025	3.57	1.78	1.74
2025-2030	3.25	1.62	1.58
2030-2035*	3.09	1.46	1.42
2035-2040*	2.93	1.30	1.26

Referencia: MTOP - Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2009.

Figura 4.7: Tasas de crecimiento vehicular en el Ecuador

La segunda se basa en información de matriculación vehicular en la localidad donde se está llevando a cabo el estudio vial. Para habilitar la ventana de "Registro de Matrícula" es necesario ingresar y guardar los datos de inicio de funcionamiento de la vía y el período de diseño. Al dar clic en la opción se habilita la siguiente ventana (ver figura 4.8).

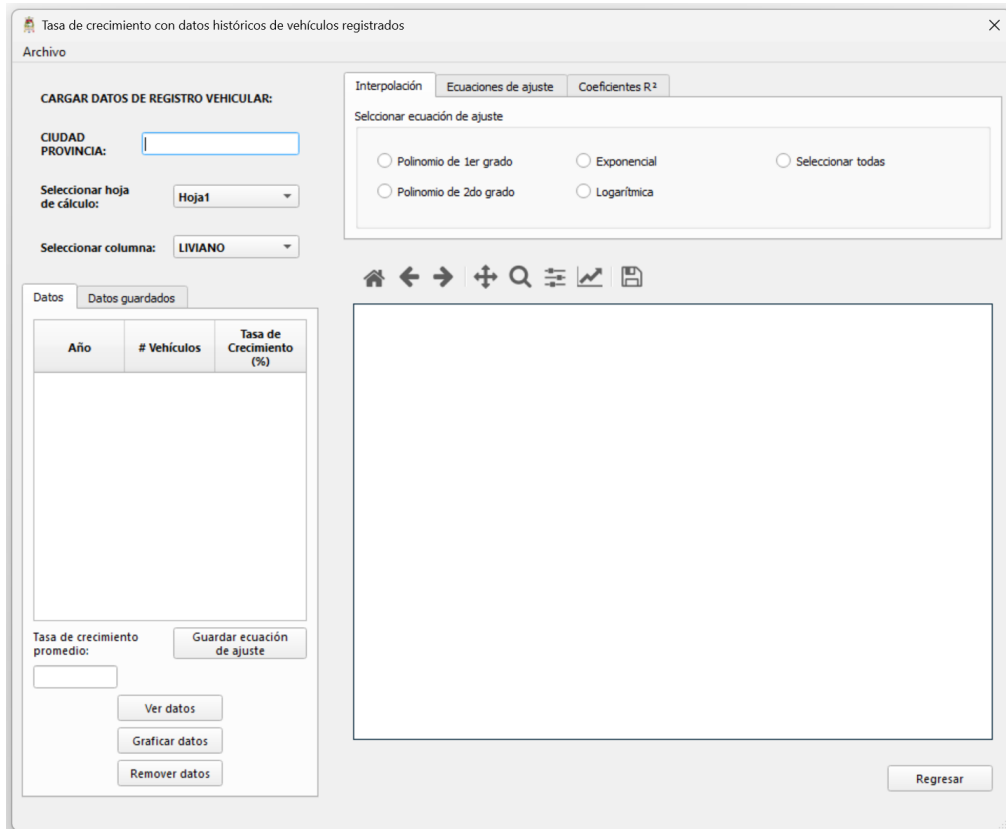


Figura 4.8: Interfaz para determinar tasa de crecimiento vehicular según registros de matriculación

En esta ventana se ingresa la provincia o ciudad a la cual corresponden los datos de matriculación, y se puede cargar la información mediante un archivo Excel con formato .xls o .xlsx. La información dentro del archivo debe cumplir criterios para ser cargada correctamente dentro del programa (ver figura 4.9), el número de filas, columnas y hojas no está limitado.

INDICE	AÑO	LIVIANO	2D	2DA	2DB	3A
1						
2						
3						

Figura 4.9: Formato de hoja de cálculo para cargar datos de matriculación

Una vez cargado el archivo se elige la hoja correspondiente a los datos y el vehículo del cual se necesita calcular la tasa de crecimiento. Dentro del programa se pueden visualizar y graficar los datos cargados para estudiar la tendencia de los mismos a lo largo del tiempo.

Existe la posibilidad de ejecutar análisis de regresión lineal, polinómica de grado 2, exponencial y logarítmica (ver figura 4.10). Luego del análisis, se escoge el que mejor se ajusta según la observación y el coeficiente de correlación R^2 .

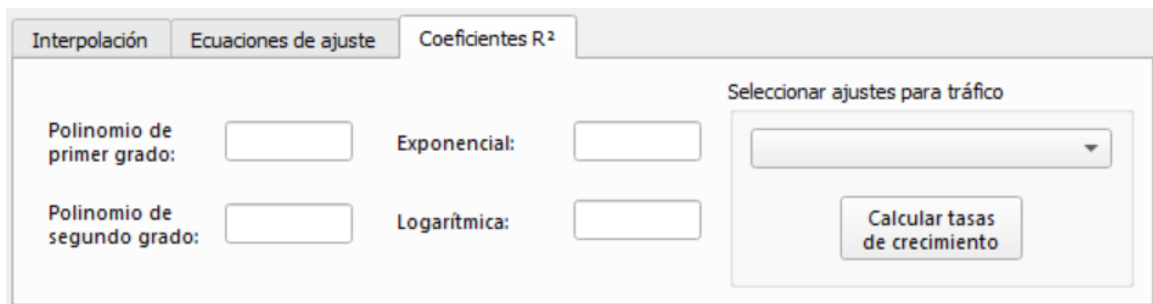


Figura 4.10: Parámetros de interpolación

Decidida la regresión con la que se va a trabajar se calcula la tasa de crecimiento, este cálculo corresponde a un promedio de las tasas de crecimiento anuales en los años de vida útil del pavimento, es decir, desde el año en el que inicia el funcionamiento hasta completar el período de diseño de la estructura.

El proceso de cálculo según los promedios anuales se adoptó al comparar con la metodología aplicada en un "Estudio de Factibilidad y Diseño Definitivo de la vía Gonzanamá - Purunuma, cantón Gonzanamá" entregado al Gobierno Provincial de Loja, donde se obtuvieron resultados similares mediante los dos métodos. El método empleado en el estudio vial utiliza la tasa de crecimiento de cada año para determinar el TPDA proyectado mediante la ecuación 2.1. Con los datos de TPDA para cada año dentro del período de diseño se creó una regresión exponencial para determinar la tasa de crecimiento, la cual resulta similar a la tasa de crecimiento con la que trabaja el programa.

Finalmente se debe guardar la tasa de crecimiento para cada vehículo. Estos datos se muestran como resumen en la ventana principal (ver figura 4.11).

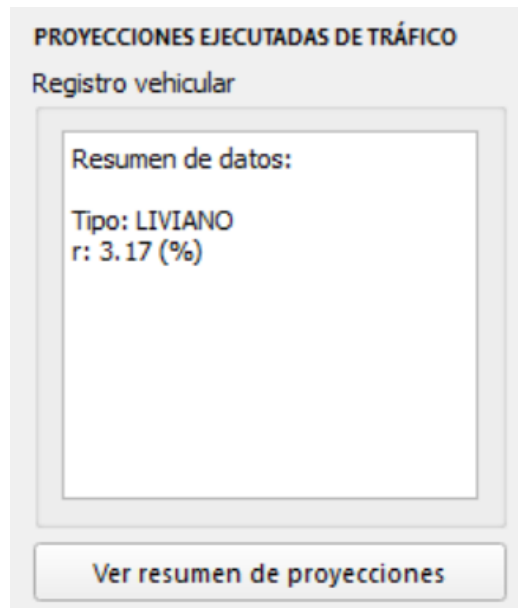


Figura 4.11: Resumen de tasas de crecimiento en la ventana principal de tráfico

4.1.2 Ejecución para ingresar datos con ecuaciones de proyección

Si se elige la opción "Ecuaciones de Proyección" se despliega la tabla para completar la información referente a tipo de vehículo con su respectiva ecuación. Si se conoce la ecuación de proyección, esta puede ser ingresada, caso contrario, se tiene la opción para determinar mediante datos históricos de TPDA para cada tipo de vehículo. Como se puede observar en la figura 4.12, se tiene la opción de trabajar con una ecuación calculada o ingresada para cada vehículo.

Datos de Tráfico		Cargas de Tráfico		
Tipo	Ecuación de Proyección	TPDA (Inicial)	TPDA (Final)	W18 (ESAL)
1 Liviano	Calculado Otro			

Figura 4.12: Tabla para ingresar datos, método "Ecuaciones de proyección"

Si se trabaja con la primera alternativa, se debe determinar la ecuación de proyección con anterioridad, a partir de los datos históricos de TPDA. Para ello se abre la ventana "Datos históricos de TPDA anual" que presenta la siguiente interfaz (ver figura 4.13).

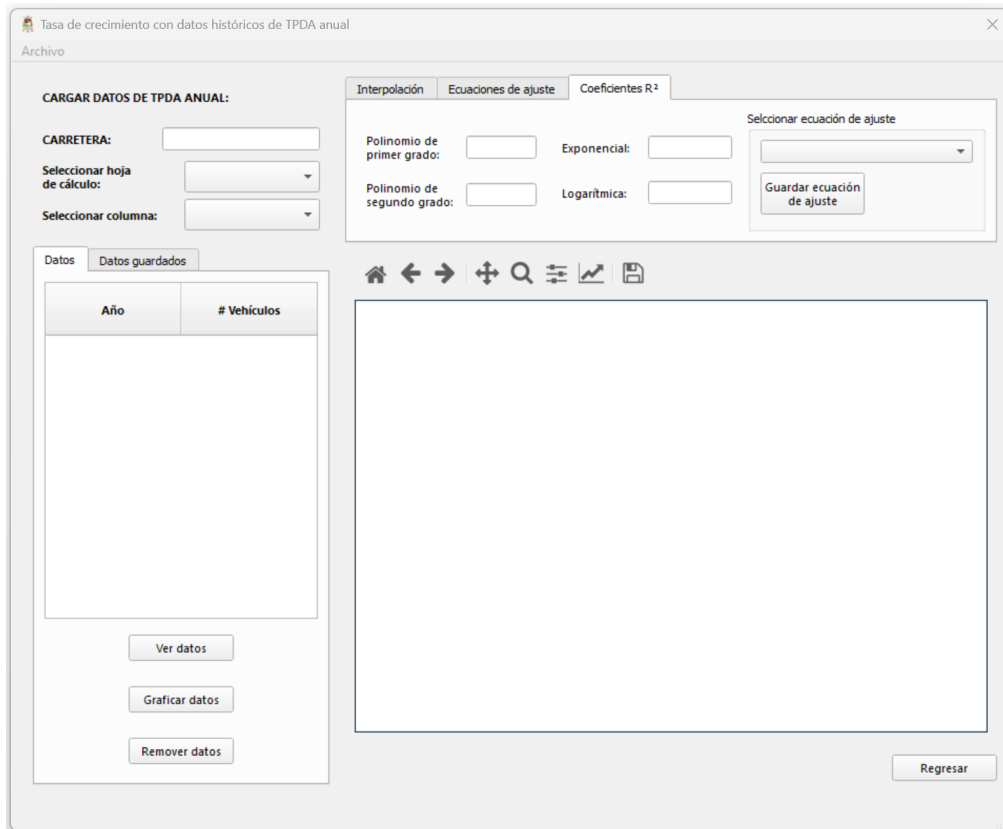


Figura 4.13: Interfaz gráfica para obtener ecuaciones de proyección

Se puede ingresar el nombre de la vía y cargar el archivo con el registro anual en un formato similar al indicado en la figura 4.9, luego se elige la hoja y columna con la que se va a trabajar.

Posteriormente se ejecuta el análisis de regresión con las diferentes opciones que presenta el programa y se guarda la que mejor se ajusta a los datos ingresados, las ecuaciones guardadas se visualizan en la ventana principal (ver figura 4.12). El programa internamente guarda: el tipo de vehículo, la ecuación de proyección y el año cero de los datos ingresados, que corresponde al límite inferior de la integral al momento de obtener los ESALs.

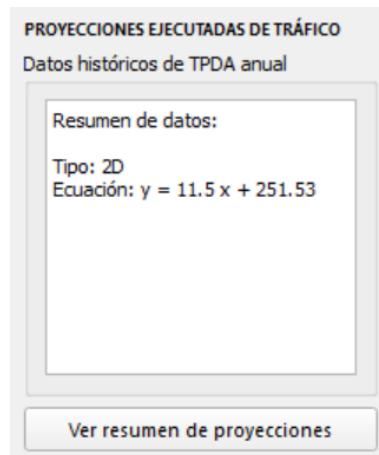


Figura 4.14: Resumen de ecuaciones de proyección

Si ya se ejecutó el cálculo de las ecuaciones de proyección previamente, basta con elegir en la tabla principal, el tipo de vehículo y la opción "Calculada".

En caso de conocer la ecuación de proyección se debe colocar la opción "Otra", y para ingresarla se debe dar clic en el botón "Insertar otras ecuaciones", donde se desplegará la siguiente ventana (ver figura 4.15).

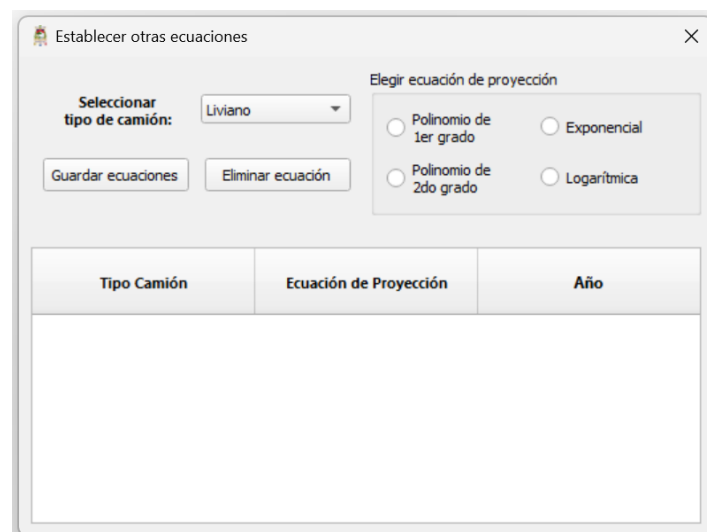


Figura 4.15: Interfaz gráfica para ingresar otras ecuaciones de proyección

En la interfaz de la figura 4.15 se debe colocar el tipo de ecuación que corresponde al vehículo seleccionado, reemplazar los coeficientes A , B o C por los valores disponibles y el año inicial del registro con el que se obtuvo tal ecuación. Es importante aclarar que no se debe hacer ninguna modificación al formato que se muestra en la tabla, es decir, solo hay que cambiar los coeficientes de cada ecuación. Una vez ingresada la ecuación se procede a guardar y se regresa a la ventana principal. Además, en la ventana principal se debe colocar el inicio de funcionamiento de la vía y el período de

diseño, en esta opción no es posible considerar el tráfico inducido.

4.1.3 Factores de Dirección y Carril

Dentro de la ventana principal de tráfico se incluye lo siguiente referente al cálculo del factor de dirección y carril (ver figura 4.16).

Figura 4.16: Factor de dirección y carril en la ventana principal de tráfico

Se debe definir primero si se utilizan los factores recomendados por la AASHTO, o si se calculan de acuerdo al conteo realizado en campo.

- **AASHTO:** para este caso solamente se indica el número de carriles de la vía en ambas direcciones y se calcula los factores automáticamente, pero también se puede modificar el factor de carril F_L en base a los rangos recomendados por la AASHTO de acuerdo al número de carriles en cada dirección, puesto que el programa en un inicio considera el valor medio del intervalo.
- **Conteo vehicular:** se debe ingresar el total de vehículos en cada dirección y el número de vehículos en el carril principal de acuerdo al conteo realizado en campo, con ello el programa determina los factores que correspondan.

4.1.4 Factor Camión

Para determinar el factor camión se debe conocer el número estructural del pavimento, pero esto conlleva a tener que realizar iteraciones entre los ESAL y el número estructural requerido. Estas iteraciones se realizan enlazando el módulo de diseño de pavimento con el módulo de tráfico, por lo tanto, se sigue el siguiente proceso:

- Primero se calculan los ESAL y se ingresan al módulo de diseño para calcular el SN requerido.
- Si el SN obtenido no es igual al planteado en el cálculo de ESAL, se debe determinar en el módulo de tráfico nuevamente los ESAL hasta que el valor SN converja.

También se debe ingresar el índice de servicio final P_t de acuerdo al tipo de vía.

Los resultados del factor camión total por cada vehículo se muestran en la tabla llamada "Cargas de tráfico" de la ventana principal, pero también se puede ver el factor camión por cada eje dando clic en "ver detalles de factor camión" (ver figura 4.17).

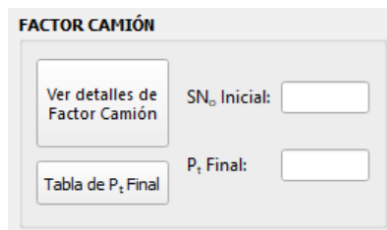


Figura 4.17: Determinación del factor camión

4.1.5 Aspectos generales

El programa cuenta con la opción de considerar el tráfico inducido, que corresponde a la suma del tránsito atraído y generado, estos valores se ingresan como porcentajes y se recomienda para ambos un valor del 5% (ver figura 4.18).

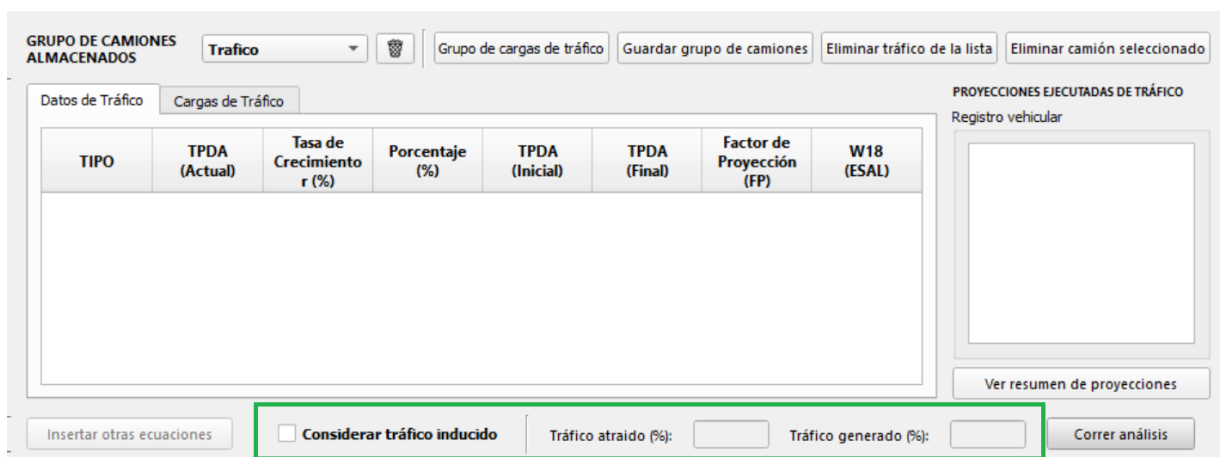


Figura 4.18: Consideración del tráfico inducido con la opción AASHTO

Adicionalmente, en la ventana principal se incluyen botones (ver figura 4.19) que permiten cargar un listado de vehículos guardados, guardar un nuevo listado de vehículos, eliminar listado de vehículos, limpiar todos los vehículos de la tabla y eliminar solamente el vehículo seleccionado.

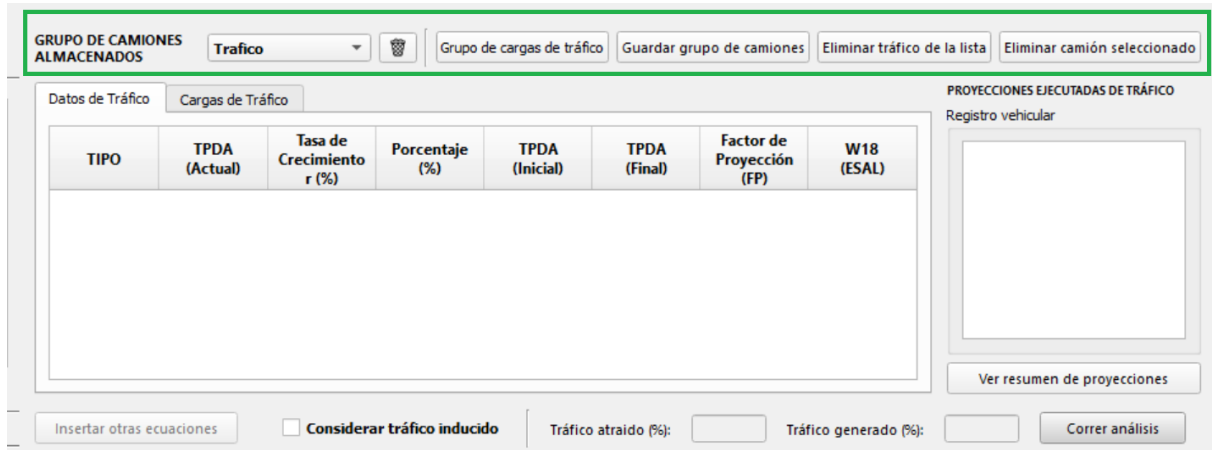


Figura 4.19: Botones para facilitar el manejo de la tabla principal

El resultado final de ESAL corresponden a la suma entre los calculados mediante AASHTO y ecuaciones de proyección. La interfaz presenta un diagrama de barras con el TPDA inicial y final de cada tipo de vehículo considerado para el diseño de la estructura del pavimento (ver figura 4.20), cuya imagen se puede guardar en formato .png.

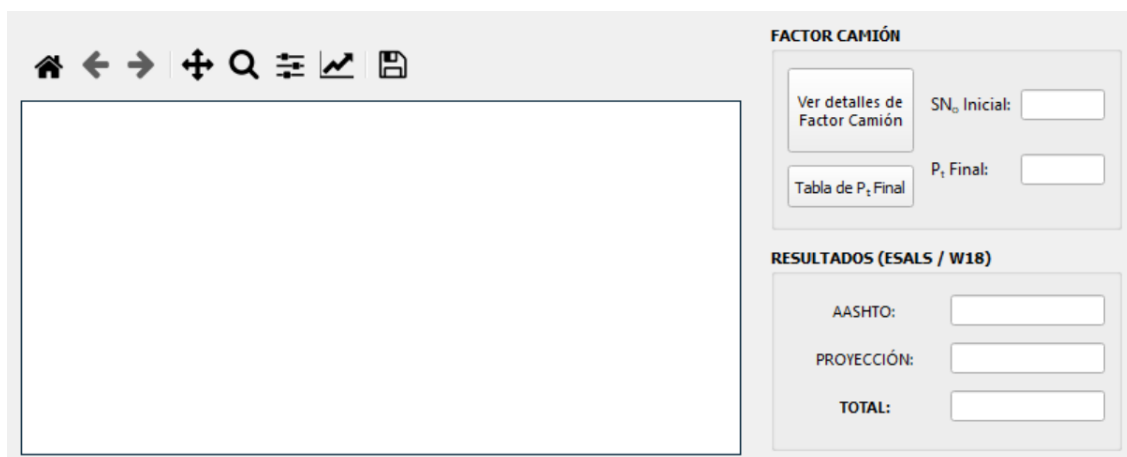


Figura 4.20: Resultados del módulo Tráfico

4.2 Módulo 2: Materiales

Este módulo abarca cuatro opciones: análisis granulométrico, combinación de áridos, obtención del asfalto óptimo según el método de Marshall y cálculo del módulo resistente para la subrasante.

4.2.1 Análisis granulométrico

Es posible definir la curva granulométrica de dos maneras:

- **Granulometría completa:** para empezar, se debe colocar los tamices utilizados en el ensayo granulométrico en mm para que automáticamente se carguen los tamices en pulgadas o número de tamiz, aunque también se puede ingresar de forma manual los valores. Los pesos retenidos se colocan en cada tamiz sin diferenciar entre la parte gruesa y fina, y se indica el peso total de la muestra analizada. Si la muestra de suelo corresponde a la subrasante, se deben incluir los valores de límite líquido LL y plástico PL para determinar el tipo de suelo según la clasificación SUCS y AASHTO. La figura 4.21 indica la ventana para determinar la granulometría sin diferenciar entre la parte gruesa y fina.

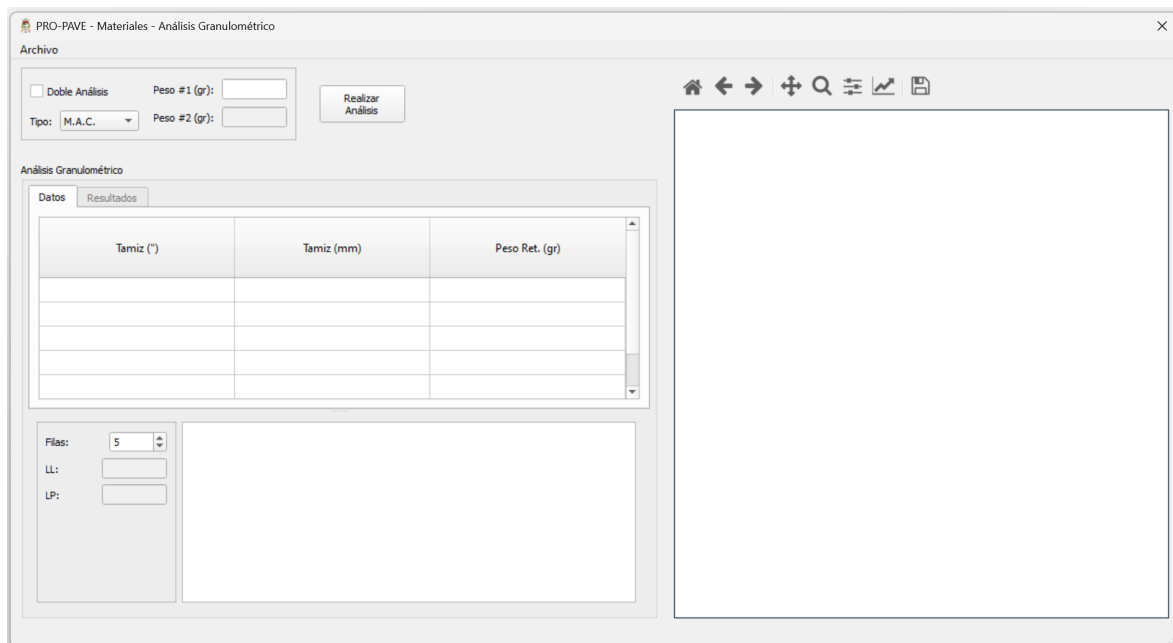


Figura 4.21: Interfaz gráfica para determinar la granulometría del material sin diferenciar entre parte gruesa y fina

- **Granulometría serie gruesa y fina:** para utilizar esta opción se debe activar el "Doble Análisis", de igual manera se cargan los tamices en mm para la serie

gruesa y para la serie fina con sus respectivos pesos retenidos. También se debe colocar el peso total de la muestra para ambas series. La figura 4.22 muestra la ventana para determinar la granulometría con la parte gruesa y fina.

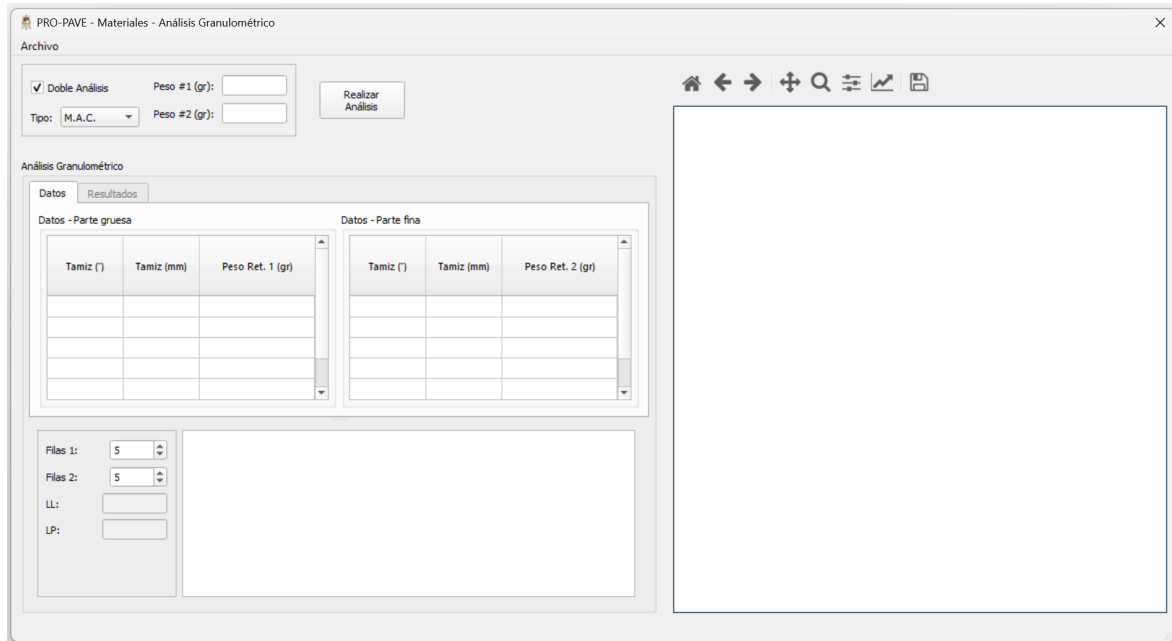


Figura 4.22: Interfaz gráfica para determinar la granulometría del material con parte gruesa y fina

En ambos casos el programa proporciona resultados del porcentaje de material que pasa cada tamiz y la curva granulométrica.

4.2.2 Combinación de áridos

El programa permite la combinación de hasta cinco áridos. La tabla principal se ajusta según la elección, y la cantidad de filas de la tabla puede variar de acuerdo al número de tamices utilizados en el análisis granulométrico de cada material. Lo ideal es copiar desde una hoja de cálculo, los valores correspondientes a la abertura de los tamices en mm y los porcentajes que pasan de cada material.

Para realizar la combinación de áridos se plantea la granulometría que debe cumplir la combinación de áridos, por ello, es necesario conocer los límites superiores e inferiores de las granulometrías indicados en la normativa.

La interfaz para realizar la combinación de los áridos es la siguiente (ver figura 4.23):

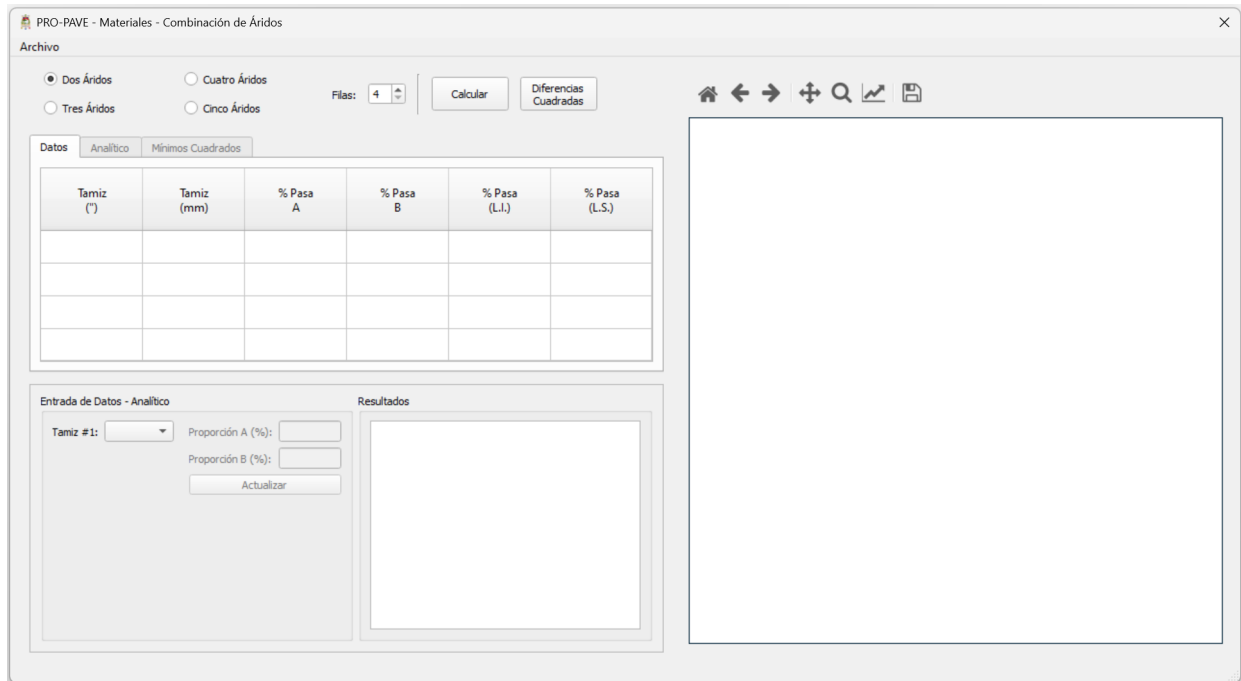


Figura 4.23: Interfaz gráfica para realizar la combinación de áridos

Se tienen dos opciones para realizar la combinación:

- **Método analítico o de tanteo:** para emplear este método se debe analizar el tamiz que proporciona mejores resultados de acuerdo a la teoría explicada en el capítulo 2. La interfaz presenta un breve historial de los resultados de porcentajes de cada tolva que calcula el programa al elegir cierto tamiz, y a su vez el usuario puede ingresar porcentajes que crea conveniente, para verificar gráficamente que cumplan con los límites granulométricos.
- **Método de mínimos cuadrados:** el método de mínimos cuadrados se realiza automáticamente una vez ingresados los datos necesarios y al dar clic en el botón "Calcular", sin embargo, este método proporciona resultados siempre que exista convergencia, caso contrario, los porcentajes calculados no son adecuados para la combinación de los áridos. Para visualizar los resultados de este método es necesario activar la opción "Mínimos cuadrados".

Los resultados de esta interfaz corresponden a los datos de la granulometría combinada de acuerdo a los porcentajes de cada tolva de material y la curva granulométrica que cumple con los límites dispuestos por la normativa.

4.2.3 Diseño de la mezcla asfáltica - Método de Marshall

La ventana principal se muestra en la figura 4.24.

Figura 4.24: Interfaz gráfica para determinar el porcentaje de asfalto óptimo según el método de diseño Marshall

Una vez realizados los respectivos ensayos en laboratorio se deben tener los siguientes datos:

- Peso específico del asfalto G_b .
- Gravedad específica de los agregados G_{sb} .
- Gravedad específica efectiva G_{se} . En caso de no contar con este valor se lo puede obtener dentro del programa, pero se requiere conocer el porcentaje de asfalto, peso específico del asfalto y la gravedad específica teórica máxima G_{mm} (ver figura 4.25).

Ingresados los parámetros indicados anteriormente se debe definir el número de mezclas asfálticas, pueden ser mínimo cinco y máximo siete. Para cada porcentaje de asfalto le corresponden tres probetas, y para cada una deben ingresarse los siguientes datos obtenidos en laboratorio:

The image shows a software dialog box with the title "Gravedad específica efectiva". It contains three input fields for data entry: "Contenido asfáltico (%)", "Gravedad específica del asfalto - Gb:", and "Gravedad específica teórica máxima - Gmm:". Below these fields, there is a "Calcular" button, a "Gse:" label followed by an empty input field, and "Aceptar" and "Cancelar" buttons at the bottom.

Figura 4.25: Determinar gravedad específica efectiva G_{se}

- Peso al aire del espécimen seco W_D .
- Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco W_{SSD} .
- Peso del espécimen saturado sumergido W_W .
- Estabilidad sin corregir.
- Fluencia (0.01 pulgadas).

El resto de parámetros que se muestran en la tabla se calculan automáticamente, y con ello se pueden obtener las gráficas requeridas para definir el contenido de asfalto óptimo, el programa utiliza la metodología de la AIM (Asphalt Institute Method) y de la NAPA (National Asphalt Pavement Association) para calcular este valor.

Para concluir si el contenido de asfalto óptimo es correcto, se debe cumplir con los criterios de la normativa en cuanto a estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos de aire, porcentaje de vacíos en el agregado mineral y porcentaje de vacíos rellenos de asfalto.

Dentro del programa se tiene la opción de comparar los parámetros calculados con el contenido de asfalto óptimo, para ello se activa la opción comparar, si los valores tienen un color verde significa que cumple con los criterios, si el color es rojo no cumple. Los rangos para cada criterio dependen del tráfico (bajo, medio y alto), ver figura 4.26.

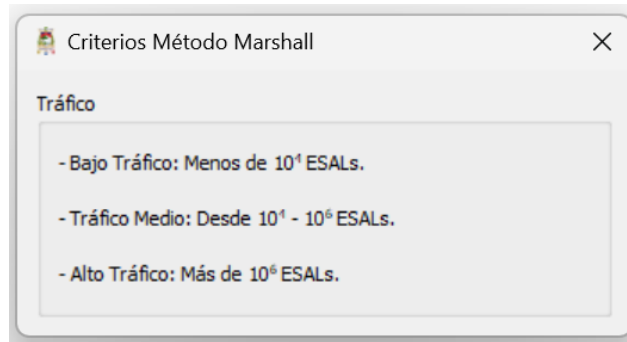


Figura 4.26: Tipo de tráfico

El programa también proporciona las relaciones gravimétricas y volumétricas de cada espécimen (ver figura 4.27).

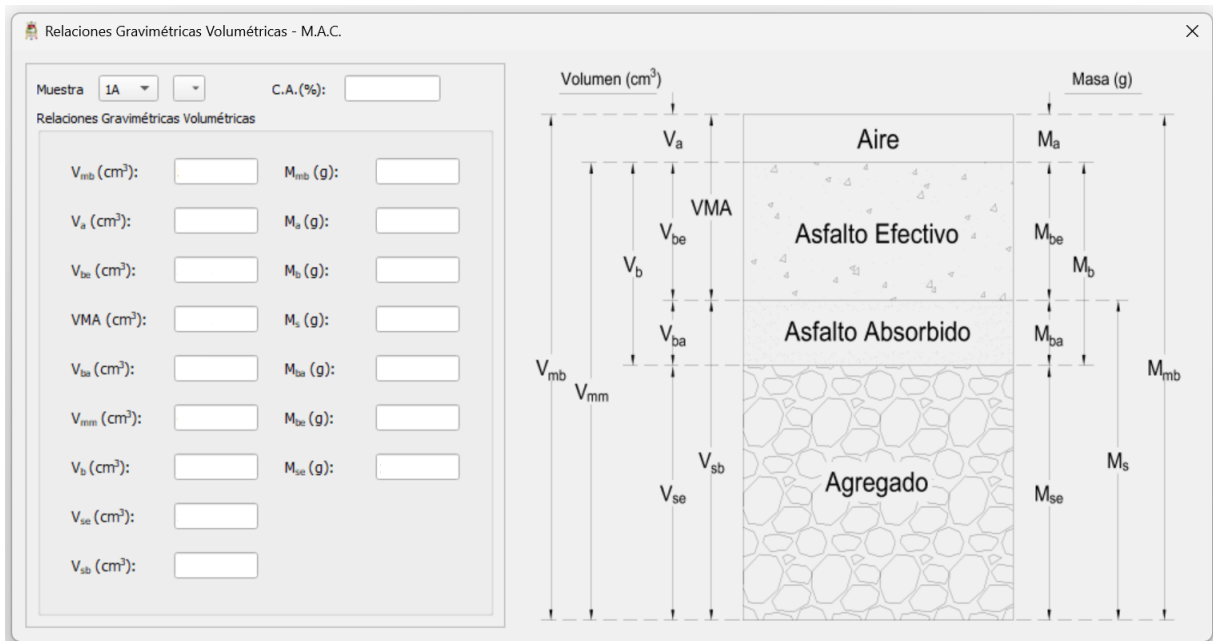


Figura 4.27: Relaciones gravimétricas y volumétricas de cada espécimen

4.2.4 Cálculo del módulo resiliente

En la ventana principal, referente al cálculo del módulo resiliente se presenta una tabla donde se puede cargar los datos de CBR, Valor-R o directamente los M_R mensuales (ver figura 4.28), esto va a depender de la información que se tiene a disposición.

Una vez cargados los datos, se ejecuta el programa para determinar el daño relativo, y a través de este calcular el módulo resiliente promedio de la subrasante.

Mes	CBR (%)	MR (psi)	Daño Relativo
Enero			
Febrero			
Marzo			
Abril			
Mayo			
Junio			
Julio			
Agosto			
Septiembre			
Octubre			
Noviembre			
Diciembre			

Figura 4.28: Interfaz gráfica para calcular el M_R de la subrasante

Por otra parte, dentro de esta interfaz se tiene la opción de calcular el CBR a partir de ensayos mensuales, puesto que el comportamiento del material de soporte cambia según las condiciones ambientales en cada período o mes del año. Para ejecutar la ventana se da clic en el botón "Estimar CBR" (ver figura 4.29).

Dentro de la ventana de la figura 4.30 primeramente se debe definir el número de períodos con sus respectivos meses (ver figura 4.31).

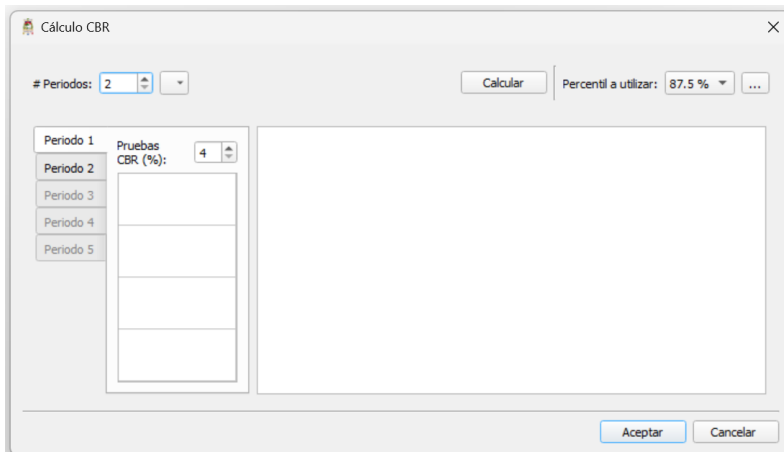


Figura 4.29: Interfaz gráfica para la estimación del CBR

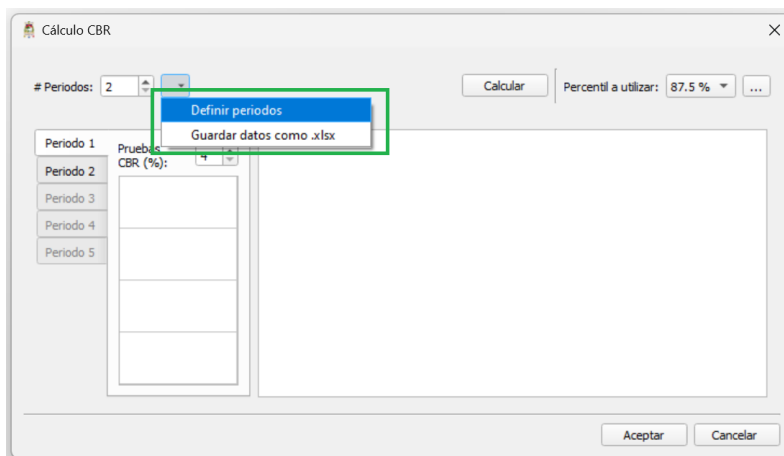


Figura 4.30: Definición de períodos

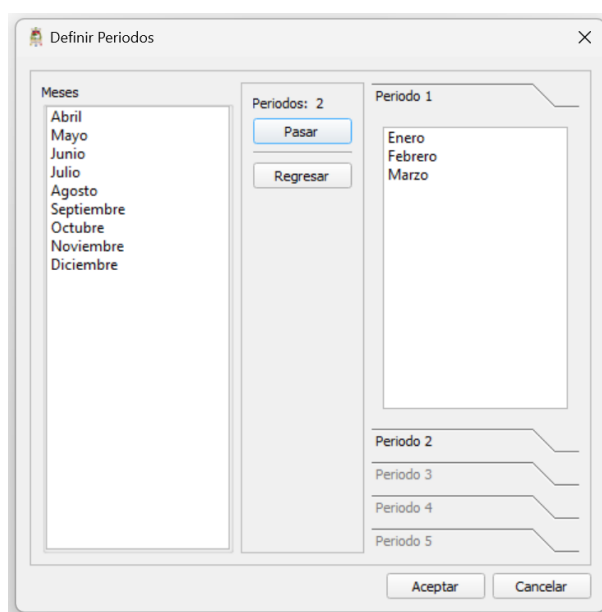
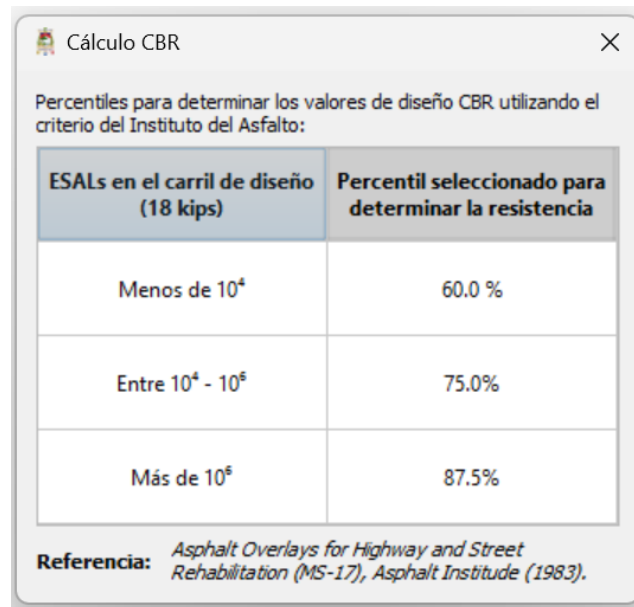


Figura 4.31: Ingreso de meses que corresponden a cada período

Una vez definidos los períodos, se regresa a la ventana para calcular el CBR y dentro de la misma se ingresa los resultados del CBR que corresponden a cada período y mes. Finalmente se selecciona el percentil para obtener el CBR de diseño en base al número de ESALs (ver figura 4.32).



Percentiles para determinar los valores de diseño CBR utilizando el criterio del Instituto del Asfalto:

ESALs en el carril de diseño (18 kips)	Percentil seleccionado para determinar la resistencia
Menos de 10^4	60.0 %
Entre 10^4 - 10^5	75.0%
Más de 10^5	87.5%

Referencia: *Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation (MS-17), Asphalt Institute (1983).*

Figura 4.32: Recomendaciones según el Instituto del Asfalto para elegir el percentil de acuerdo al número de ESALs

Al regresar a la ventana principal automáticamente se cargan los valores de CBR, los cuales servirán para obtener el módulo resiliente.

4.3 Módulo 3: Diseño de pavimento flexible y sobrecarpetas

Este módulo comprende el proceso de diseño para una estructura de pavimento nueva y el diseño de sobrecarpetas con mezcla asfáltica en caso de que el pavimento requiera una rehabilitación. Esta ventana se conecta con el módulo 1, puesto que el ESAL depende del número estructural.

Los parámetros obtenidos a partir del módulo 1 y 2 (cálculo del módulo resiliente para la subrasante), son necesarios para ejecutar el diseño del pavimento, sin embargo, si el ESAL y el M_R son valores conocidos, estos se ingresan directamente.

4.3.1 Diseño de la estructura de pavimento flexible

La interfaz gráfica para esta opción se muestra en la figura 4.33:

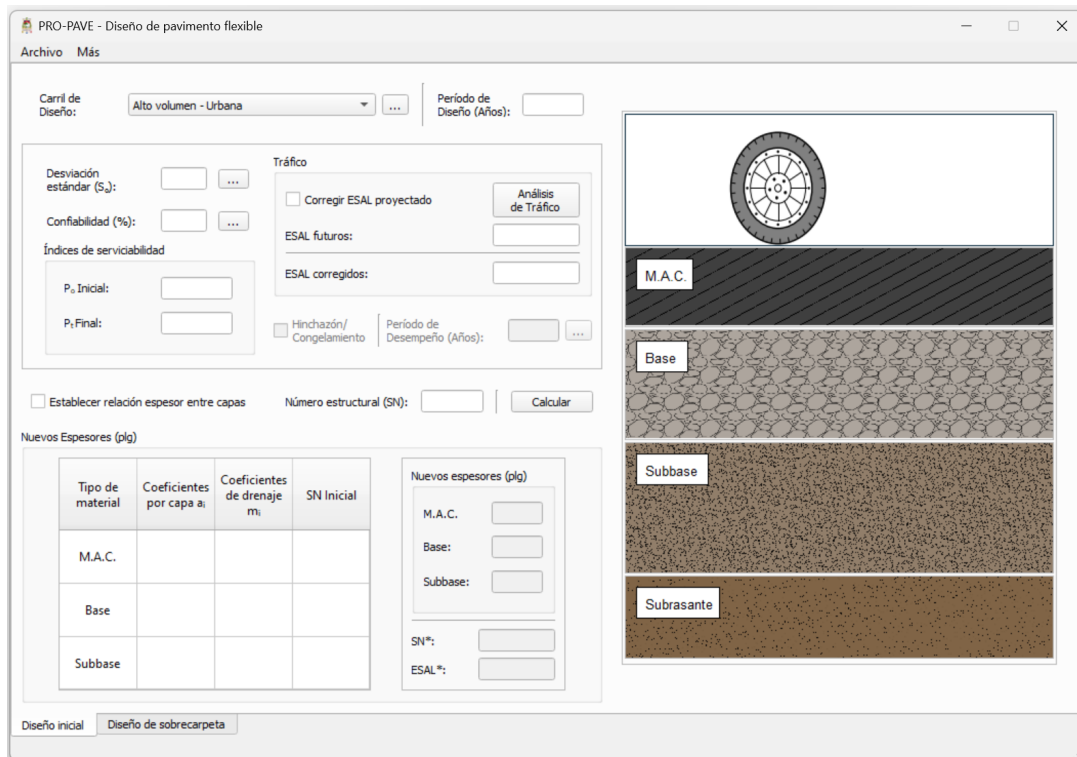


Figura 4.33: Interfaz gráfica para el diseño de pavimentos flexibles

Para iniciar con el uso de esta ventana se deben ingresar los siguientes parámetros:

- Período de diseño de acuerdo al tipo de vía (ver figura 4.34), que es el mismo utilizado en el cálculo del ESAL, por ello puede ser cargado desde el módulo de tráfico.

Condiciones de Carretera	Periodo de Analisis (Años)
Alto volumen - Urbana	30-50
Alto volumen - Rural	20-50
Bajo volumen - Pavimentada	15-25
Bajo volumen - Superficie de agregados	10-20

Referencia: American Association of State Highway and Transportation Officials and National Cooperative Highway Research Program, Eds., AASHTO guide for design of pavement structures, Washington, D.C.: AASHTO, 1993.

Figura 4.34: Período de diseño de acuerdo al tipo de vía

- Número de ejes equivalentes (ESAL), puede ser cargado desde el módulo de tráfico.
- Índices de serviciabilidad inicial P_o y final P_t .
- Desviación estándar S_o .
- Confiabilidad de acuerdo a la importancia de la vía, este valor también es utilizado para corregir el número de ESAL de ser necesario (ver figura 4.35).

Confiabilidad

Niveles de confiabilidad sugeridos para diferentes carreteras

Clasificación	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urban	Rural
Autopistas interprovinciales y otras	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras de tránsito	80 - 95	75 - 95
Carreteras locales	50 - 80	50 - 80

Nota: Resultados basados en una encuesta del grupo de trabajo de diseño de pavimentos de la AASHTO.

Clase: Autopistas interprovinciales y otras - Urbana

Referencia: American Association of State Highway and Transportation Officials and National Cooperative Highway Research Program, Eds., AASHTO guide for design of pavement structures. Washington, D.C.: AASHTO, 1993.

Figura 4.35: Confiabilidad de acuerdo al tipo de vía

- Número de capas, el programa presenta dos tipos de estructuras (ver figura 4.36), la primera incluye subrasante, subbase, base y capa de rodadura, mientras que la segunda no considera el material subbase.

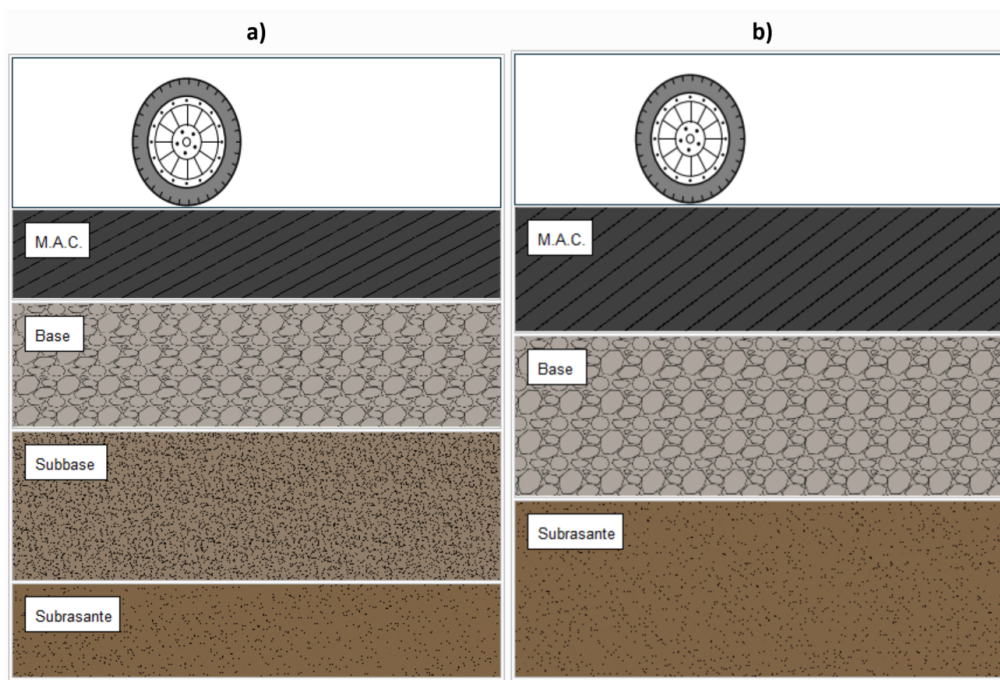


Figura 4.36: Tipos de estructura permitidas en el módulo de diseño

En cada capa se deben ingresar y calcular los parámetros que se indican a continuación.

- Módulo elástico de la capa de rodadura para determinar el coeficiente estructural (ver figuras 4.37 y 4.38).

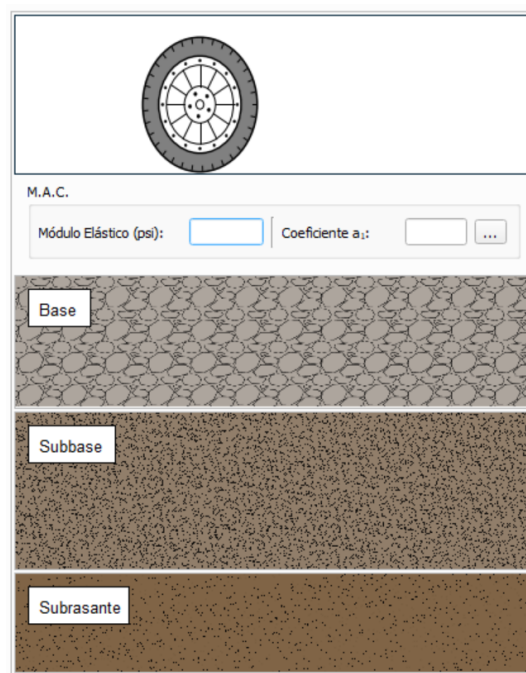


Figura 4.37: Parámetros para la capa de rodadura

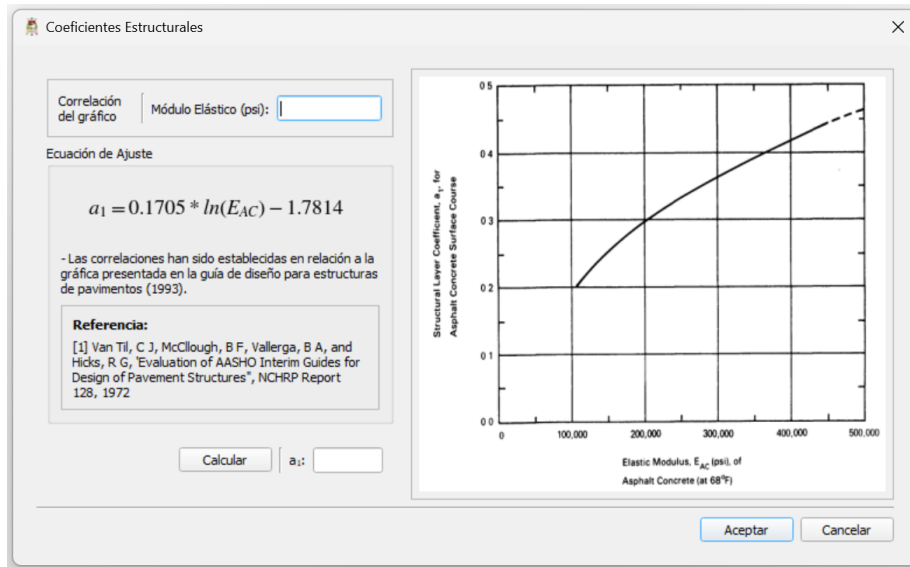


Figura 4.38: Correlación entre el módulo elástico y el coeficiente estructural de la capa de rodadura [6]

- Para determinar el coeficiente estructural del material base (ver figura 4.39) se debe ingresar el M_R , CBR o Valor-R en caso de ser base granular, M_R o la resistencia no confinada del material a los 7 días si es base tratada con cemento, y M_R o el valor de la estabilidad de Marshall si es base bituminosa (ver figuras 4.40, 4.41 y 4.42). Por último, el coeficiente de drenaje se toma de acuerdo a las recomendaciones de la AASHTO (ver figura 4.46).

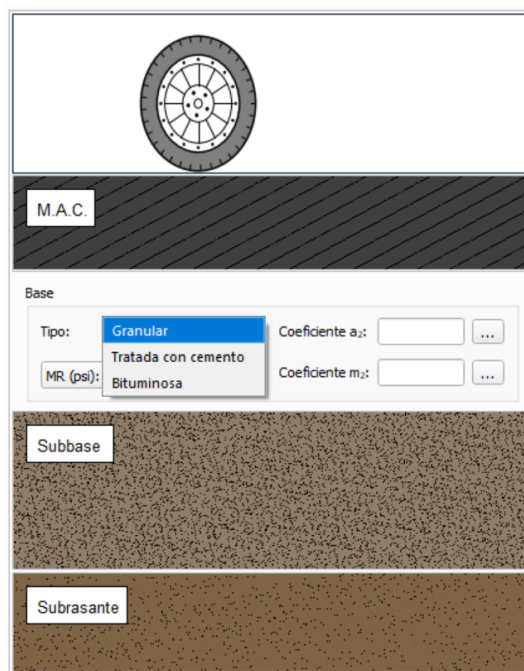


Figura 4.39: Parámetros para la capa base

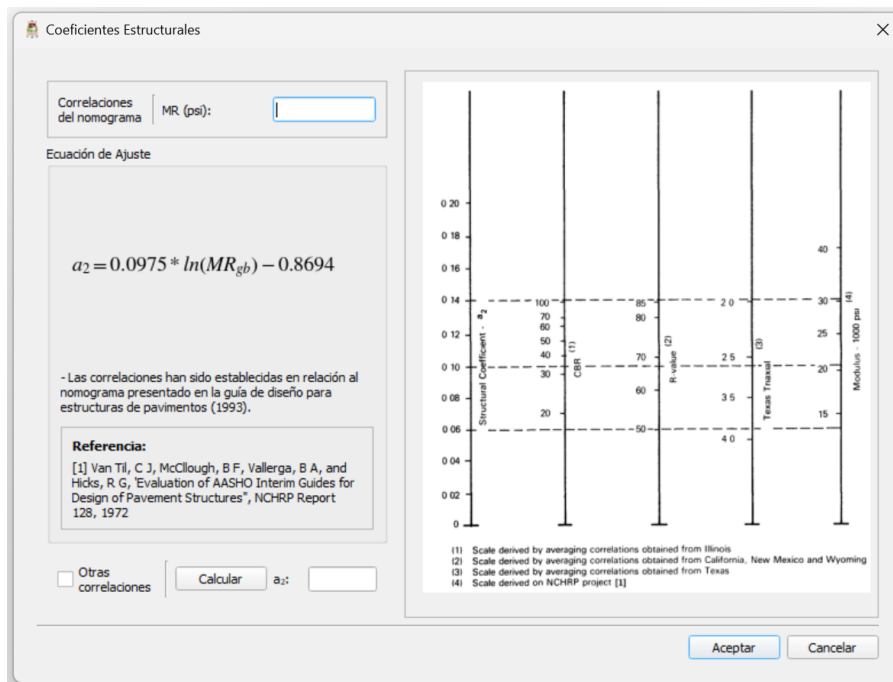


Figura 4.40: Correlación entre los parámetros de resistencia y el coeficiente estructural del material base granular [6]

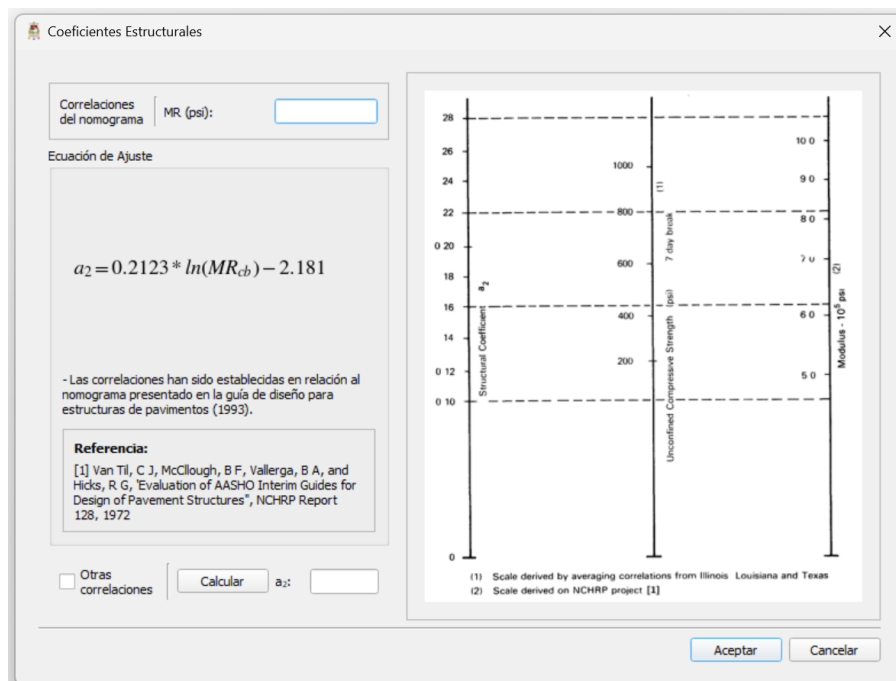


Figura 4.41: Correlación entre los parámetros de resistencia y el coeficiente estructural del material base tratada con cemento [6]

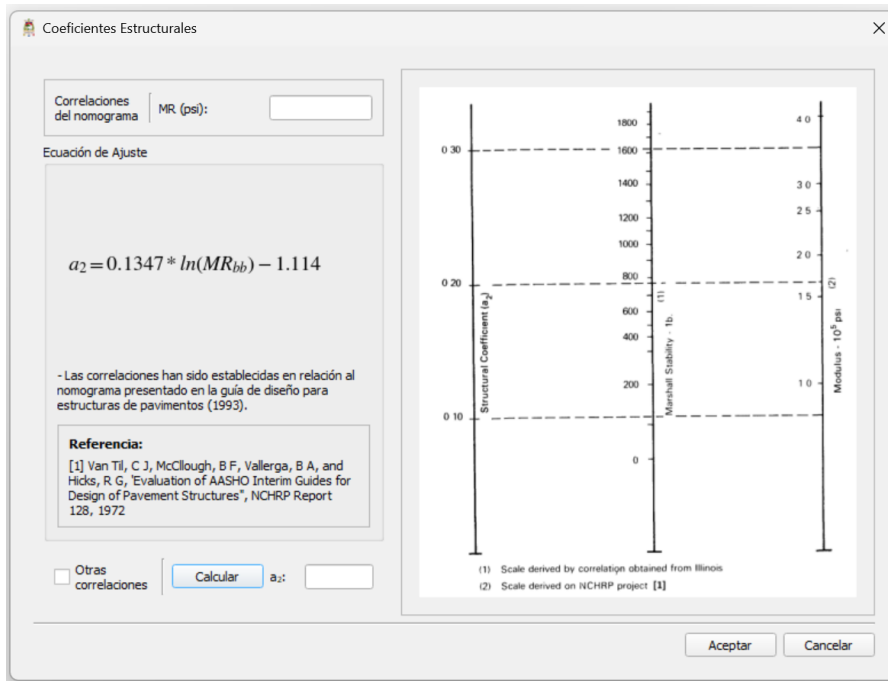


Figura 4.42: Correlación entre los parámetros de resistencia y el coeficiente estructural del material base bituminosa [6]

- Para el material de subbase se puede insertar el M_R , CBR o Valor-R para definir el coeficiente estructural (ver figuras 4.43 y 4.44), el coeficiente de drenaje se toma de acuerdo a las recomendaciones de la AASHTO (ver figura 4.46).

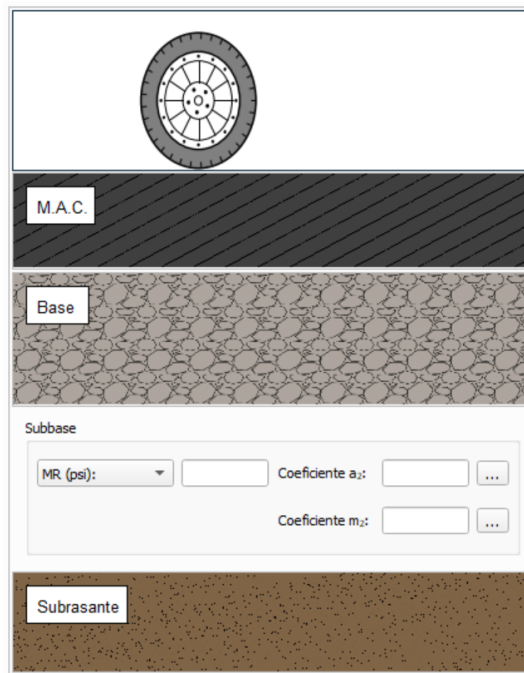


Figura 4.43: Parámetros para la capa subbase

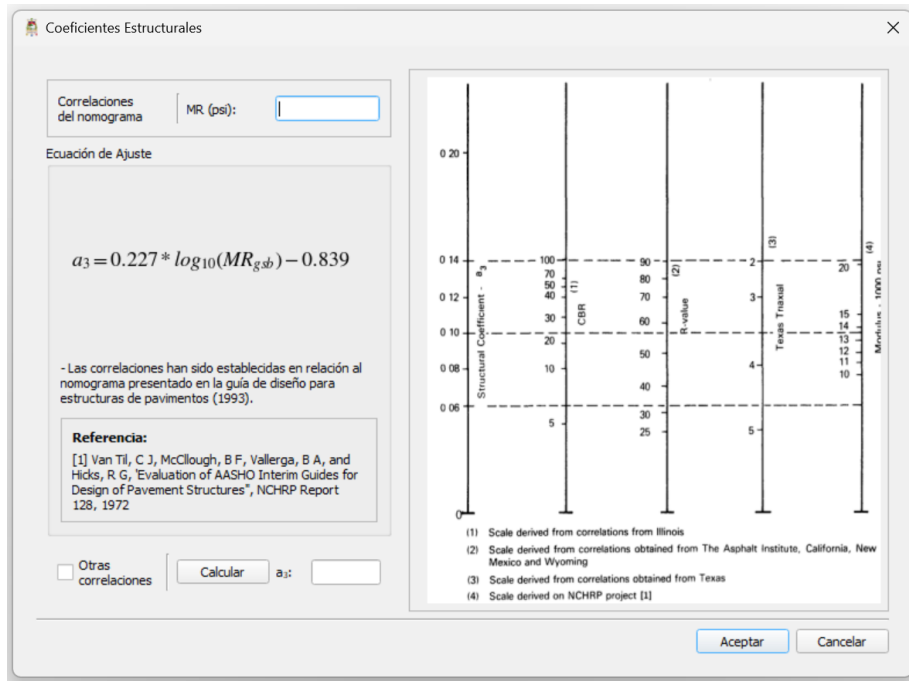


Figura 4.44: Correlación entre los parámetros de resistencia y el coeficiente estructural del material subbase [6]

- Para el material de soporte (subrasante) se debe ingresar el CBR o directamente el M_R , pero también se puede trabajar con la ventana correspondiente al módulo dos (materiales), para calcular el módulo resiliente (ver figura 4.45).

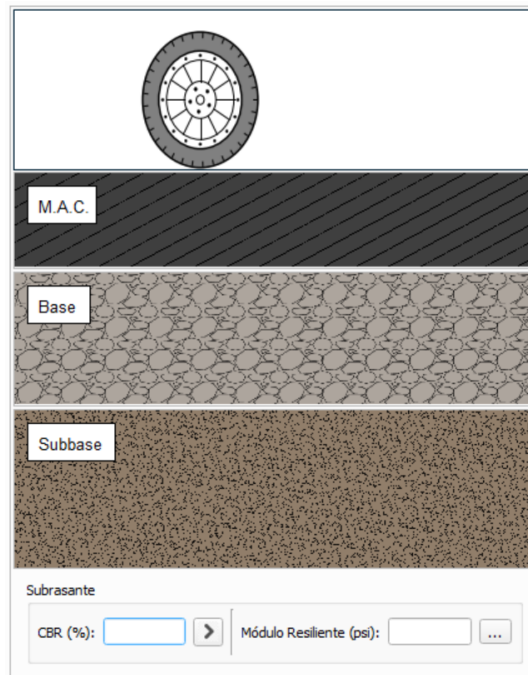


Figura 4.45: Parámetros para la subrasante

- Los coeficientes de drenaje se deben ingresar en la capa base y subbase, estos son los valores recomendados por la AASHTO (ver figura 4.46).

Coeficientes de Drenaje

Valores recomendados m_1 para modificar los coeficientes estructurales de materiales base no tratadas y subbase para pavimentos flexibles

Porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cerca de la saturación

Calidad de drenaje	Menor al 1%	1-5%	5-25%	Mayor a 25%
Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 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 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

Condiciones de drenaje de la capa: Excelente - Menor al 1%

Referencia: American Association of State Highway and Transportation Officials and National Cooperative Highway Research Program, Eds., AASHTO guide for design of pavement structures. Washington, D.C.: AA

Figura 4.46: Coeficientes de drenaje para base y subbase

Una vez ingresado los parámetros mencionados se calculan los espesores requeridos para cumplir con el número estructural. Depende del usuario verificar que los espesores cumplan con los mínimos, también que sean construibles y económicos.

4.3.1.1 Reducción del período de desempeño

Con el número estructural y los espesores de la estructura del pavimento determinados se habilita la opción para reducir el período de desempeño al considerar la hinchazón y/o el congelamiento. El período de desempeño predecido al ejecutar esta opción es mostrado en la ventana principal del diseño inicial.

Se presenta una ventana en la que automáticamente se trabaja con la pérdida de serviciabilidad, número estructural y el período de diseño de la estructura inicial (ver figura 4.47).

Reducción del período de desempeño

Consideraciones

Hinchazón

Congelamiento

Hinchazón - Entrada

Constante de razón de Hinchazón θ :

Posible Ascenso Vertical (plg):

Probabilidad de Hinchazón (%):

Congelamiento - Entrada

Período Máx. de Desempeño (Años): SN inicial: ΔPSI :

Iteración Nro.	Período prueba de desempeño (Años)	Pérdida de serviciabilidad ambiental ΔPSI_{sw+rtr}	Pérdida de serviciabilidad por tráfico ΔPSI_{TR}	Tráfico máx. acumulado permitido (18-kip ESAL)	Período de desempeño (Años)

Calcular

Figura 4.47: Determinación del período de desempeño reducido

4.3.2 Diseño de sobrecarpetas para pavimentos flexibles

Dentro del programa se presenta la interfaz que permite diseñar el espesor de la sobrecarpeta con mezcla asfáltica dentro del módulo de diseño de pavimento flexible, aplicando tres criterios para determinar el número estructural efectivo SN_{eff} . Para diseñar la sobrecarpeta, se pueden aplicar cada criterio individualmente o en conjunto.

4.3.2.1 Inspección visual y ensayos de materiales

En la figura 4.48 se muestra la primera metodología. Se requiere ingresar al programa los siguientes parámetros para determinar el número estructural efectivo:

- Espesores de las capas del pavimento existente.
- Coeficientes estructurales de las capas, que deben ser menores a los considerados en un diseño nuevo según la inspección visual (ver figura 2.25).
- Coeficientes de drenaje según lo que recomienda la AASHTO.

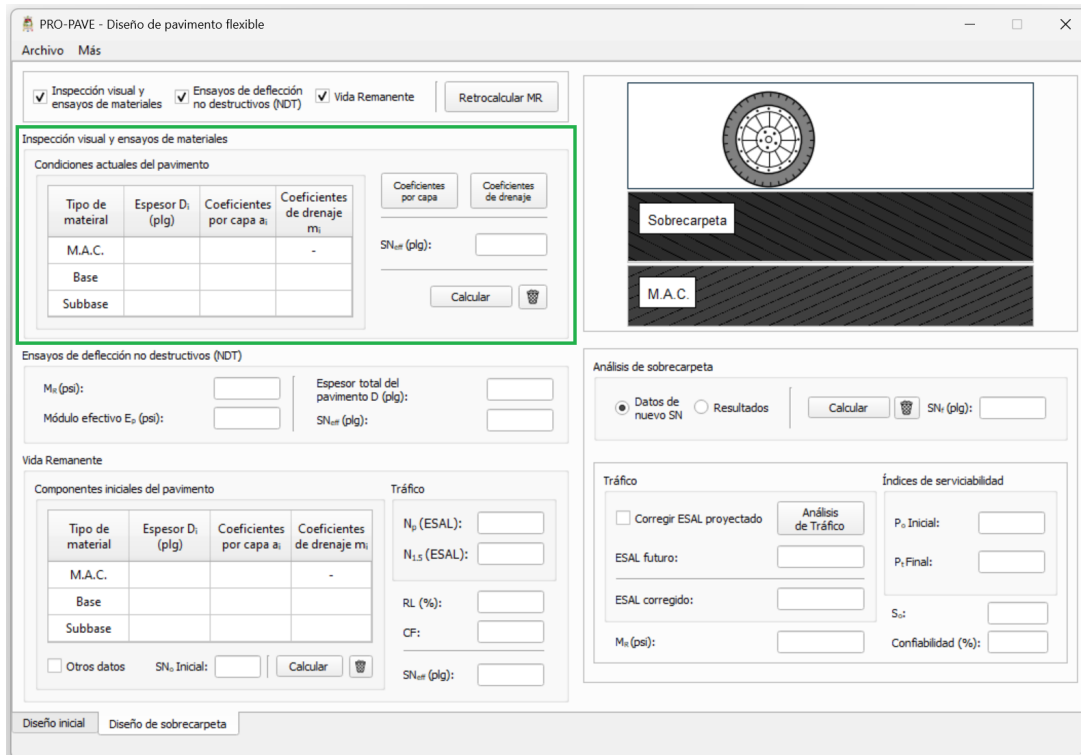


Figura 4.48: Ingreso de datos para determinar el número estructural efectivo con el método de inspección visual y ensayos de materiales

Inspección visual - Ensayo de materiales

Coefficientes de capa sugeridos para pavimentos asfálticos existentes

Materiales	Condición de la superficie	Coefficiente
Pavimento Asfáltico	Pocas fisuras tipo piel de cocodrilo y/o fisuras transversales de baja severidad	0.35 - 0.40
	< 10 % de fisuras tipo piel de cocodrilo y/o < 5 % de fisuras transversales de media y alta severidad	0.25 - 0.35
	> 10 % fisuras tipo piel de cocodrilo de baja severidad y/o < 10 % fisuras tipo piel de cocodrilo de media severidad y/o 5 - 10 % de fisuras transversales de media y alta severidad	0.20 - 0.30
	> 10 % fisuras tipo piel de cocodrilo de media severidad y/o < 10 % fisuras tipo piel de cocodrilo de alta severidad y/o 5 - 10 % de fisuras transversales de media y alta severidad	0.14 - 0.20
	> 10 % de fisuras tipo piel de cocodrilo de alta severidad y/o > 10 % de fisuras transversales de alta severidad	0.08 - 0.15
	Base Estabilizada	Pocas fisuras tipo piel de cocodrilo y/o fisuras transversales de baja severidad
< 10 % de fisuras tipo piel de cocodrilo y/o < 5 % de fisuras transversales de media y alta severidad		0.15 - 0.25
> 10 % fisuras tipo piel de cocodrilo de baja severidad y/o < 10 % fisuras tipo piel de cocodrilo de media severidad y/o 5 - 10 % de fisuras transversales de media y alta severidad		0.15 - 0.20
> 10 % fisuras tipo piel de cocodrilo de media severidad y/o < 10 % fisuras tipo piel de cocodrilo de alta severidad y/o 5 - 10 % de fisuras transversales de media y alta severidad		0.10 - 0.20
> 10 % de fisuras tipo piel de cocodrilo de alta severidad y/o > 10 % de fisuras transversales de alta severidad		0.08 - 0.15
Base o Subbase Granular		Sin evidencia de bombeo, degradación o contaminación por finos
	Alguna evidencia de bombeo, degradación o contaminación por finos	0.00 - 0.10

Referencia: American Association of State Highway and Transportation Officials and National Cooperative Highway Research Program, Eds., AASHTO guide for design of pavement structures. Washington, D.C.: AASHTO, 1993.

Figura 4.49: Coeficientes estructurales recomendados al pavimento actual

4.3.2.2 Método de ensayos no destructivos

En la figura 4.48 se muestra la segunda metodología.

Figura 4.50: Ingreso de datos para determinar el número estructural efectivo mediante el método de ensayo no destructivo (NDT)

Para este método se requiere conocer:

- Espesor total del pavimento existente D .
- Módulo efectivo E_p de toda la estructura. Para determinar este parámetro se realiza el ensayo de deflectometría FWD, donde se miden las deflexiones bajo el centro del plato de carga, y a distancias de 12, 24 y 36 pulgadas. También se debe conocer el peso y el radio del plato de carga, la temperatura a la que fue ejecutado el ensayo para aplicar un factor de corrección por temperatura y el espesor total de la estructura sobre la subrasante.

Estos parámetros se ingresan en la siguiente ventana donde se calcula el módulo efectivo y el módulo resiliente para el diseño (ver figuras 4.51 y 4.52).

The dialog box is titled 'Retrocálculo - Método NDT'. Under 'Acerca de...', the 'Plato de carga' radio button is selected. A 'Calcular' button and a trash icon are visible. The 'Entrada de datos' section contains the following fields:

Carga aplicada - P (lbs):	<input type="text"/>
Radio del plato de carga - a (plg):	<input type="text"/>
Factor de corrección	0.33
Esesor total encima de la subrasante (in): <input type="text"/>	

M_R Retrocalculado (psi):	<input type="text"/>
E_p / MR :	<input type="text"/>
a_c (plg):	<input type="text"/>

M_R de diseño (psi):	<input type="text"/>
E_p (psi):	<input type="text"/>

Buttons: Aceptar, Cancelar

Figura 4.51: Interfaz gráfica para el retrocálculo del M_R - entrada de datos del plato de carga

The dialog box is titled 'Retrocálculo - Método NDT'. Under 'Acerca de...', the 'Datos de deflección' radio button is selected. A 'Calcular' button and a trash icon are visible. The 'Entrada de datos' section contains the following fields:

Factor de ajuste por temperatura:	1.0
Deflección al centro de placa - d_c (in):	<input type="text"/>

Deflección a la distancia r - d _r (plg):	<input type="text"/>
Distancia r (plg):	<input type="text"/>

M_R Retrocalculado (psi):	<input type="text"/>
E_p / MR :	<input type="text"/>
a_c (plg):	<input type="text"/>

M_R de diseño (psi):	<input type="text"/>
E_p (psi):	<input type="text"/>

Buttons: Aceptar, Cancelar

Figura 4.52: Interfaz gráfica para el retrocálculo del M_R - entrada de datos de deflexiones

En función de los valores ingresados se determina el número estructural efectivo por el método NDT (Non Destructive Deflection Testing).

4.3.2.3 Método de vida remanente

En la figura 4.53 se muestra la tercera metodología.

The screenshot shows the 'PRO-PAVE - Diseño de pavimento flexible' software window. The 'Vida Remanente' section is highlighted with a green border. It contains the following components:

- Inspección visual y ensayos de materiales:** Includes checkboxes for 'Inspección visual y ensayos de materiales', 'Ensayos de deflexión no destructivos (NDT)', and 'Vida Remanente'. A 'Retrocalcular MR' button is also present.
- Condiciones actuales del pavimento:** A table for material properties:

Tipo de material	Espesor D_i (plg)	Coefficientes por capa a_i	Coefficientes de drenaje m_i
M.A.C.			-
Base			
Subbase			

 Includes 'Coefficients por capa' and 'Coefficients de drenaje' buttons, and an 'SN_{ret} (plg):' input field with a 'Calcular' button.
- Ensayos de deflexión no destructivos (NDT):** Includes input fields for M_R (psi), Módulo efectivo E_p (psi), and 'Espesor total del pavimento D (plg)'. It also has an 'SN_{ret} (plg):' input field.
- Vida Remanente (highlighted):**
 - Componentes iniciales del pavimento:** A table identical to the one above, with an 'Otros datos' checkbox and 'SN₀ Inicial:' input field.
 - Tráfico:** Includes input fields for N_p (ESAL), $N_{1.5}$ (ESAL), RL (%), CF, and 'SN_{ret} (plg):'.
- Análisis de sobrecarpeta:** Includes 'Datos de nuevo SN' and 'Resultados' radio buttons, a 'Calcular' button, and an 'SN₀ (plg):' input field.
- Tráfico:** Includes a 'Corregir ESAL proyectado' checkbox, 'Análisis de Tráfico' button, and input fields for 'ESAL futuro:', 'ESAL corregido:', and M_R (psi).
- Índices de serviciabilidad:** Includes input fields for P_0 Inicial, P_1 Final, S_0 , and 'Confiability (%)'.

Figura 4.53: Ingreso de datos para determinar el número estructural efectivo mediante el método de vida remanente

Para el método de vida remanente se requiere ingresar los siguientes parámetros:

- Espesores y parámetros de la estructura del pavimento inicial.
- Índice de serviciabilidad inicial, desviación estándar, M_R retrocalculado a partir del ensayo FWD y la confiabilidad (valor esperado del 50%).
- ESAL que ha soportado el pavimento hasta la actualidad N_p .

El programa se encarga de calcular los ESAL que soportaría el pavimento hasta llegar a una serviciabilidad final de 1.5 ($N_{1.5}$), con ello calcula el RL (%), la cual se determina a partir de la gráfica el factor de condición, para finalmente presentar el número estructural efectivo por el método de vida remanente.

4.3.2.4 Determinación de espesor de la sobrecarpeta

Primeramente, se deben ingresar los parámetros de la sobrecarpeta (ver figura 4.54).

The image shows a software interface for determining overlay thickness. It is divided into two main sections. The top section, titled 'Sobrecarpeta de M.A.C.', features a wheel icon and input fields for 'Módulo Elástico (psi)' and 'Coeficiente a_{OL} ', along with a 'M.A.C.' label. The bottom section, titled 'Análisis de sobrecarpeta', includes a 'Calcular' button, a 'SN_i (plg)' input field, and a 'Tráfico' section with 'ESAL futuro', 'ESAL corregido', and 'M_s (psi)' inputs. The 'Índices de serviciabilidad' section includes 'P_o Inicial', 'P_r Final', 'S_o', and 'Confiabilidad (%)' inputs.

Figura 4.54: Parámetros estructurales de la sobrecarpeta

Después se debe ingresar el tráfico que soportará el pavimento luego de ser rehabilitado, para el cual se puede entrar al módulo de tráfico para calcularlo. Con esto se determina el número estructural necesando incluyendo la sobrecarpeta, y el espesor de la sobrecarpeta se calcula mediante la ecuación indicada en el capítulo 2.

4.4 Módulo 4: Análisis estructural del pavimento

El módulo de esfuerzos y deformaciones está conformado por cuatro tipos de análisis, lineal, no-lineal, viscoelástico y combinado. Este módulo permite un análisis de hasta cinco períodos considerando máximo cinco cargas con diez puntos sobre la superficie y diez puntos de profundidad.

La geometría del tráfico, sistema de capas y ubicación de puntos de análisis son visualizados de manera inmediata conforme el usuario ingresa los datos. Las profundidades declaradas por el usuario son compartidas para todas las cargas y períodos.

Las coordenadas de los puntos en la superficie son exclusivas de cada carga y tampoco varían según el período de análisis. Los resultados son mostrados en forma de tablas para cada carga en la parte derecha de la ventana que se observa en la figura 4.55.

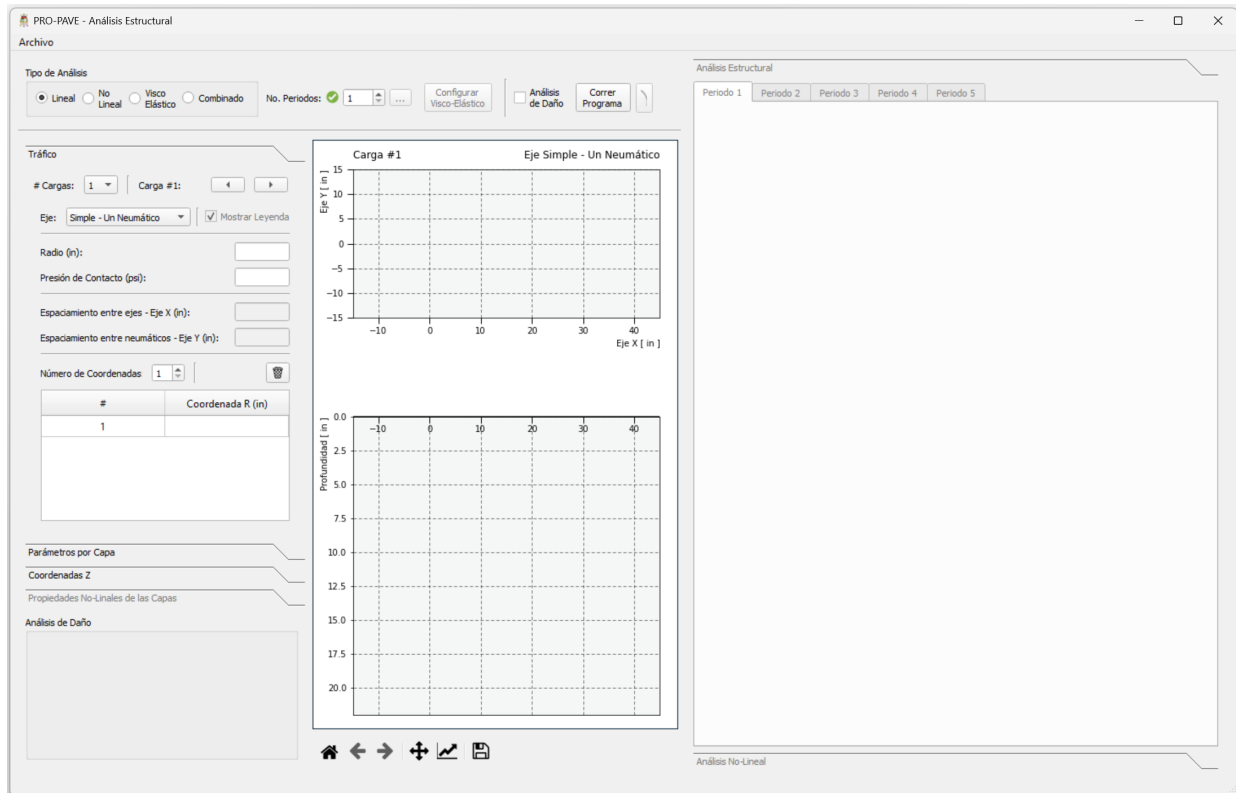


Figura 4.55: Interfaz gráfica del análisis estructural

En esta parte se muestra una caja de herramientas a la derecha para mostrar los resultados divididos en dos categorías, la primera indica el análisis no-lineal, donde se determinan los módulos elásticos producto de la influencia de cada carga, y la segunda detalla los resultados lineales según los parámetros ingresados por el usuario para determinar los esfuerzos y deformaciones.

Además, el módulo de análisis estructural para pavimento flexible permite un análisis de daño en el que se emplean correlaciones empíricas para los criterios de daño por fatiga y por deformación permanente, con ello se estima el período de vida del pavimento.

4.4.1 Configuración según el tipo de análisis

Previo a la entrada de datos se debe establecer todas las opciones encerradas dentro del recuadro de la figura 4.56.



Figura 4.56: Configuración según el tipo de análisis

- El análisis lineal está predeterminado.
- En caso de seleccionar un análisis de tipo no-lineal, en la parte de ingreso de datos se permitirá el acceso para incorporar los parámetros que corresponden a las capas no lineales.
- En el análisis viscoelástico se permite el acceso a la entrada de datos para capas viscoelásticas dando clic en el botón "Configurar viscoelástico". Aquí se establece la curva de fluencia para cada temperatura declarada dentro de la misma opción.
- Por último, está el análisis de tipo combinado, donde se ejecuta un análisis con un pavimento conformado por capas de tipo lineal, no-lineal y viscoelástico. Se permite el acceso a la opción de "Configurar viscoelástico" antes de acceder a la entrada de parámetros para capas no-lineales del pavimento.

Al configurar los parámetros del pavimento de esta manera se orienta al usuario a que primero declare las capas viscoelásticas, antes de las no-lineales.

Una vez definido el tipo de análisis, se establece el número de períodos. De acuerdo a la cantidad de períodos, el usuario puede optar por declarar los meses correspondientes a cada uno, dando clic en el botón de herramientas ubicado en la parte derecha del número de períodos (ver figura 4.57).

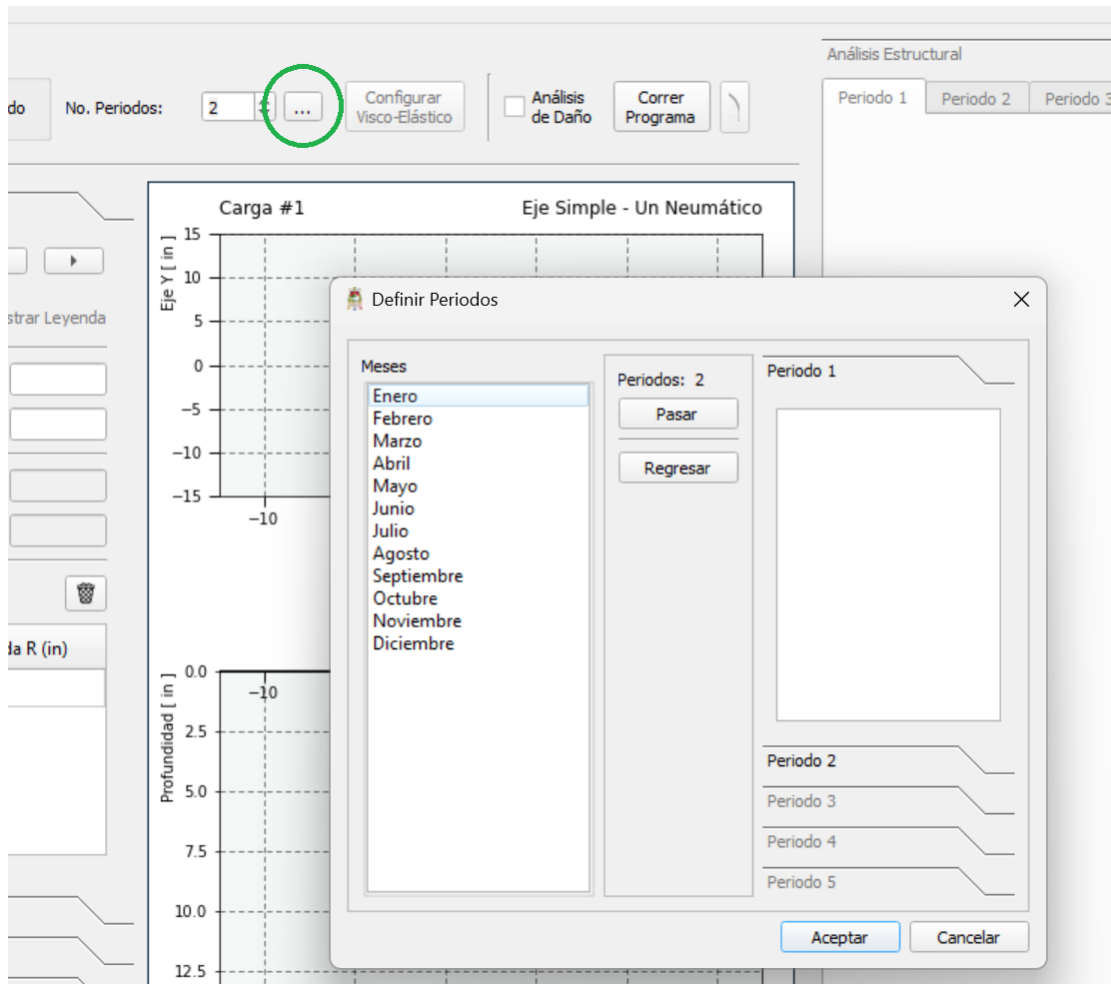


Figura 4.57: Definición de períodos

El botón de "Configurar viscoelástico" abre una ventana de diálogo que permite la entrada de los siguientes datos:

- Número de capas viscoelásticas (se permite hasta dos capas viscoelásticas ubicadas desde la superficie hacia abajo).
- Temperatura de referencia (para curva de fluencia determinada).
- Temperaturas para cada período.

- Tiempos de medida vs. curva de fluencia (son relacionados con la temperatura de referencia).
- Tipo de carga (estática o dinámica). Los resultados se mostrarán en la gráfica ubicada a la derecha de la ventana como se indica en la figura 4.58.

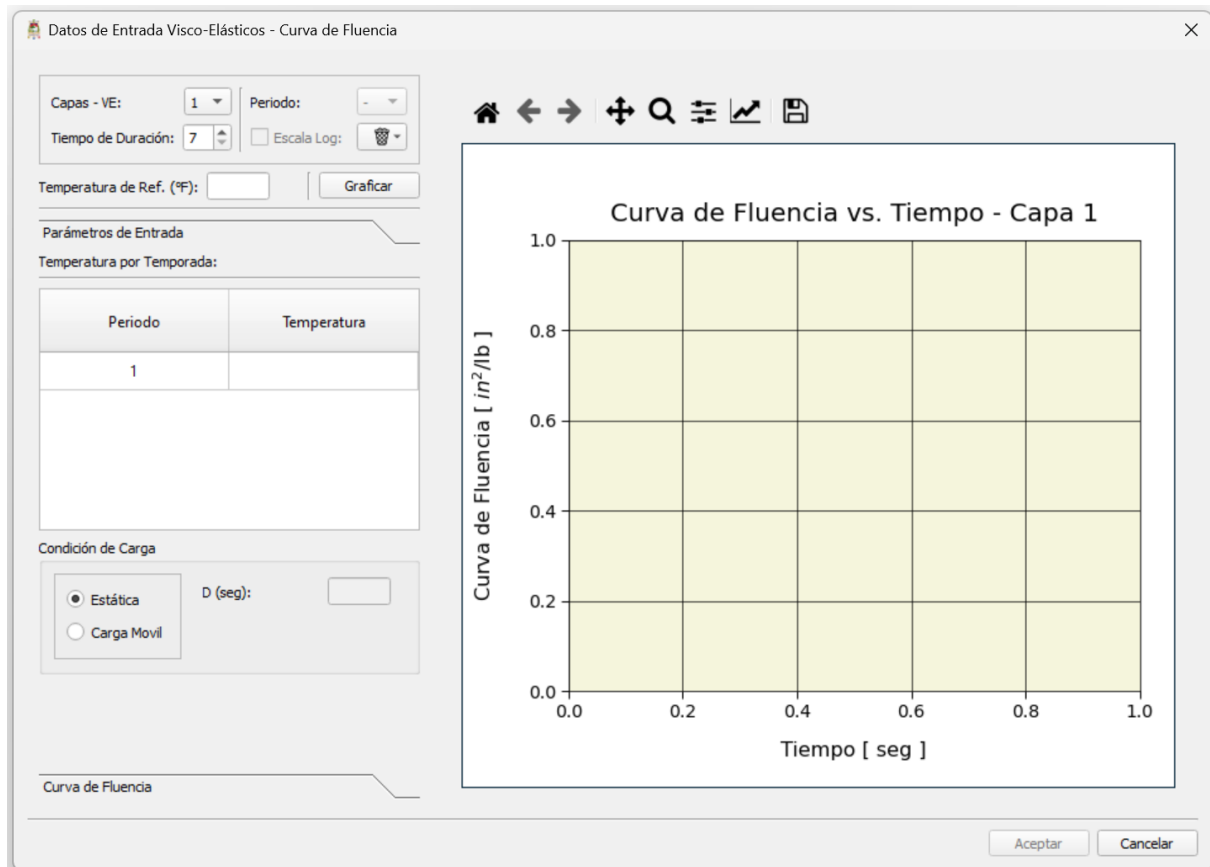


Figura 4.58: Datos de entrada para el análisis viscoelástico

Las curvas de fluencia determinadas serán transferidas a la ventana principal, para trabajar con los demás datos al momento de realizar el análisis.

Para realizar el análisis de daño, se debe presionar el "checkbox" para configurar la entrada de datos específicos del análisis, con ello se bloquea la entrada de puntos por parte del usuario, y a la vez muestra una tabla para el ingreso de las repeticiones por cada carga (en cada columna) declarada en cada período (cada fila) (ver figura 4.59).

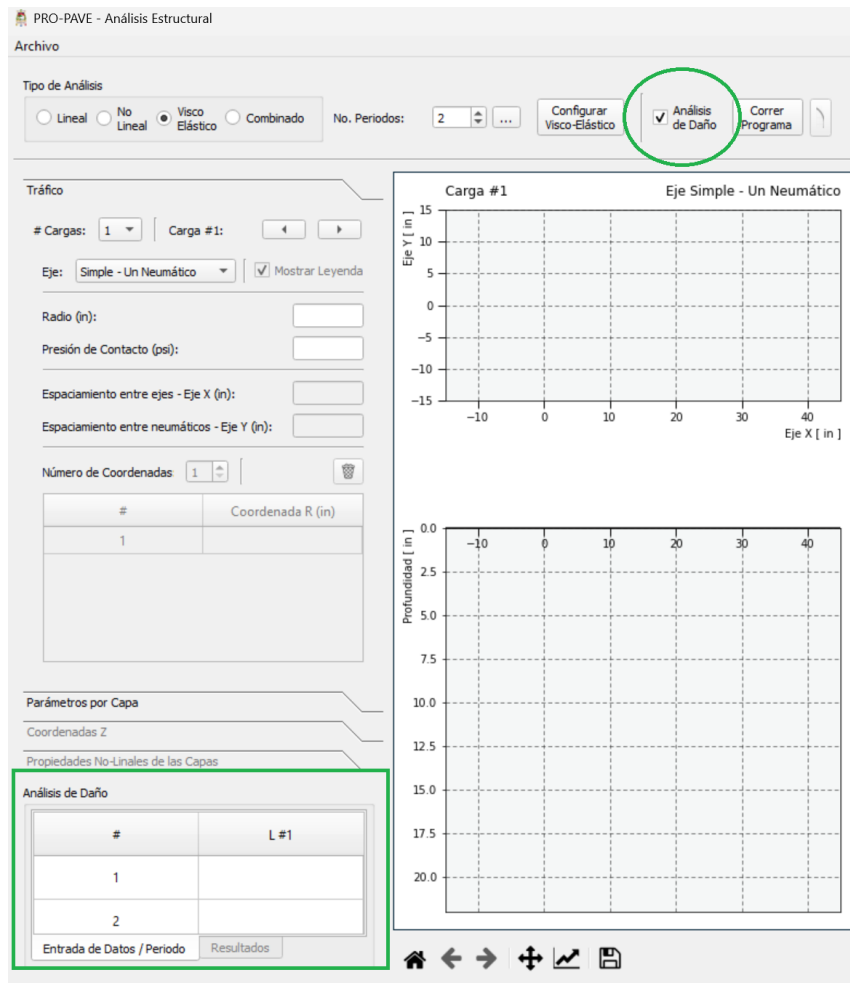


Figura 4.59: Configuración para el análisis de daño

4.4.2 Entrada de datos

4.4.2.1 Tráfico

Para cada carga se establece una configuración geométrica, sus puntos de análisis y la carga aplicada en sus áreas de contacto, se permite realizar un análisis para cuatro tipos de ejes:

- Eje simple con neumático simple (un área de contacto).
- Eje simple con neumático doble (dos áreas de contacto).
- Eje tándem (cuatro áreas de contacto).
- Eje trídem (seis áreas de contacto).

En la figura 4.60 se indica como ingresar el tipo de eje.

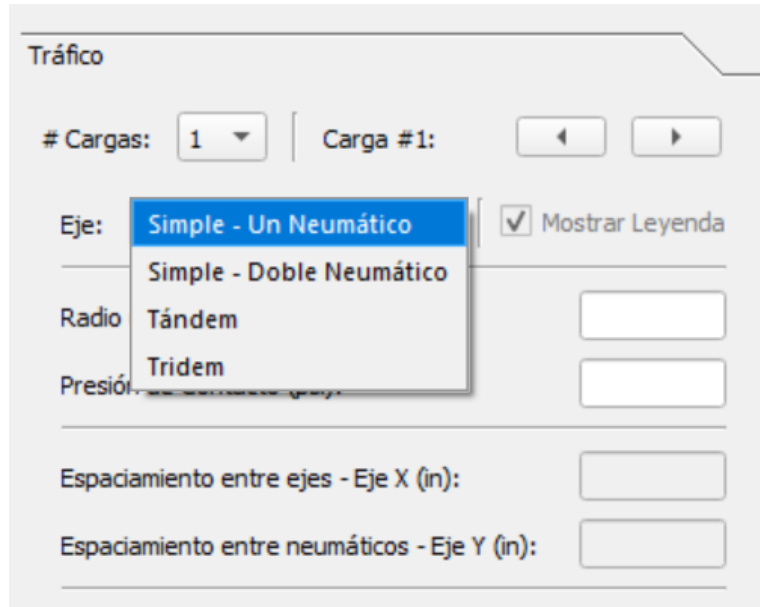


Figura 4.60: Selección del tipo de eje

Una vez elegido el tipo de eje, se procede a declarar el radio de cada área de contacto, su presión, espaciamiento entre ejes y entre neumáticos (dependiendo del tipo de eje), y, por último, los puntos sobre la superficie. Todos los datos declarados se muestran inmediatamente para dar una visión general al usuario de los datos ingresados (ver figura 4.61).

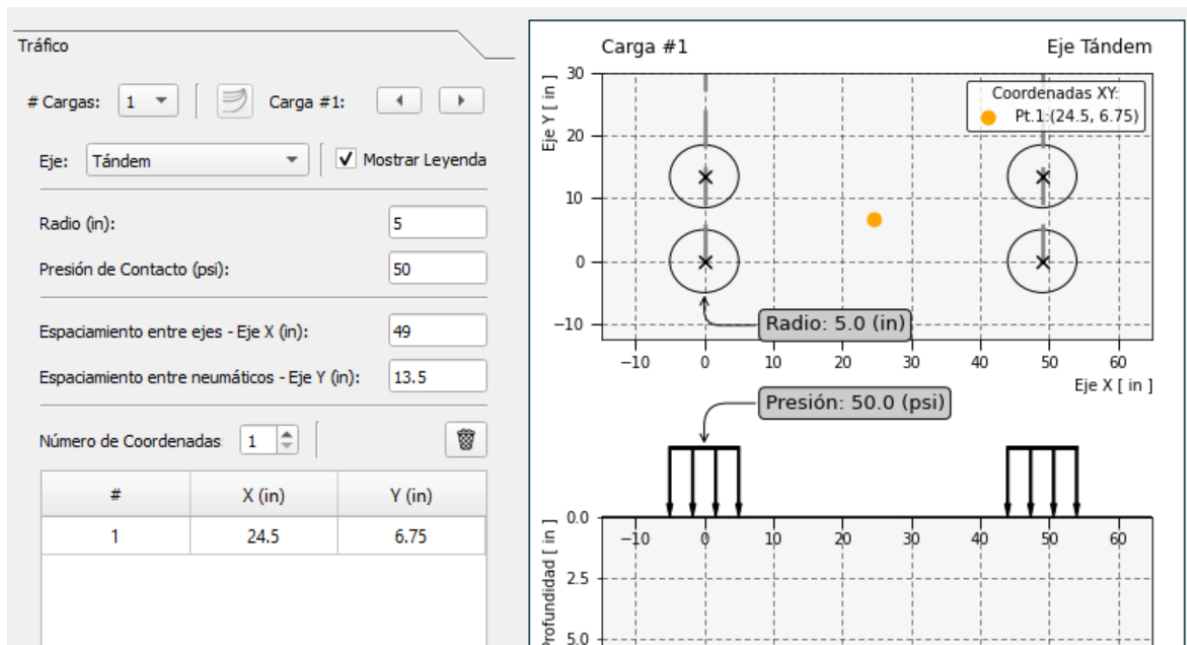


Figura 4.61: Visualización de los datos ingresados para un eje tándem

4.4.2.2 Parámetros por capa

En los parámetros por capa se debe especificar el número de capas, que pueden ser máximo cuatro, el espesor de cada capa, los coeficientes de Poisson y los módulos elásticos para cada temporada. Por otra parte, si se selecciona un análisis no-lineal o combinado, el usuario debe declarar el peso específico de cada capa para determinar los esfuerzos geostáticos en la profundidad donde se pretende determinar los módulos elásticos no-lineales. En la figura 4.62 se muestra los parámetros a ingresar dependiendo del tipo de análisis, lineal y viscoelástico (izquierda), no-lineal y combinado (derecha).

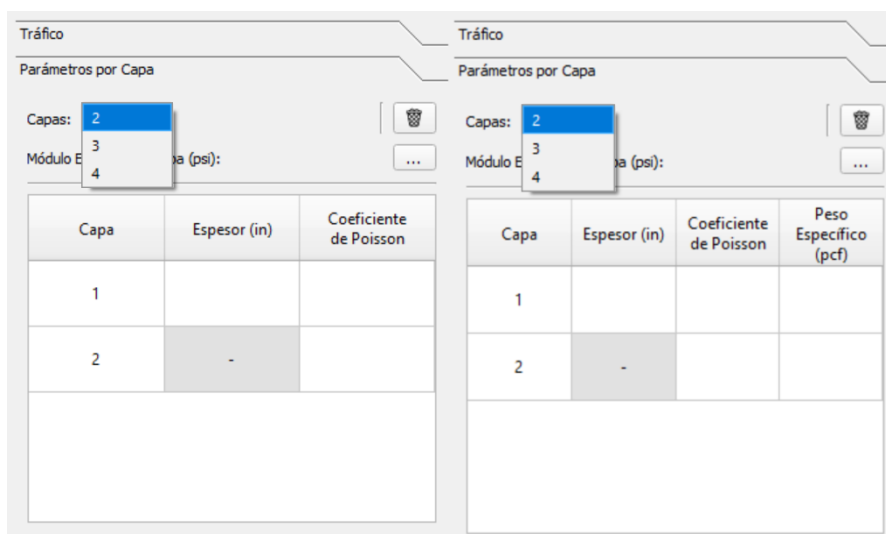


Figura 4.62: Ingreso de parámetros de capa según el tipo de análisis

Según el número de capas y número de períodos, al presionar el botón para introducir los módulos elásticos, se presenta una tabla con un determinado número de celdas para almacenar cada valor (ver figura 4.63).

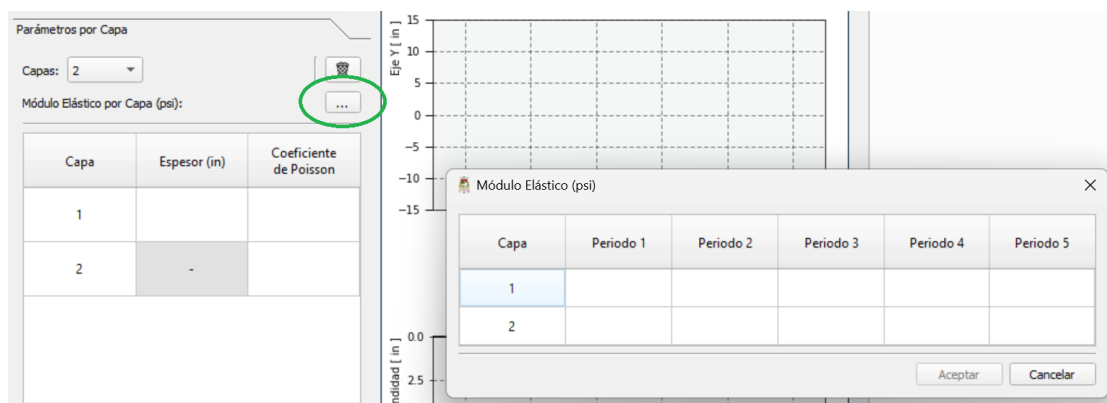


Figura 4.63: Ingreso de módulos elásticos por capa

4.4.2.3 Profundidades

El ingreso de las profundidades es el mismo para todas las cargas, con un número máximo de 10 puntos de profundidad (ver figura 4.64).

The screenshot shows a software interface with the following elements:

- Section: Tráfico
- Section: Parámetros por Capa
- Section: Coordenadas Z
- Control: # Coordenadas: 8 (with a spinner)
- Control: Mostrar Leyenda
- Control:
- Table with 2 columns: #, z (in)
- Table rows: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

#	z (in)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	

Figura 4.64: Ingreso de profundidades de análisis

4.4.2.4 Propiedades no-lineales de las capas

En la última sección para entrada de datos, al elegir un análisis de tipo no-lineal o combinado, se permite el acceso a la siguiente vista (figura 4.65). Primero debe establecerse el número de capas no-lineales a trabajar en el análisis, luego declarar que capa se considera no-lineal a través de un "comboBox" ubicado en cada celda de la primera columna de la tabla presentada, en la segunda columna se indica el punto de profundidad donde se realiza el cálculo del módulo elástico, en la tercera columna se declara el coeficiente de presión de tierra para determinar los esfuerzos geostáticos del sistema de capas (se realiza el análisis asumiendo el sistema con presiones laterales en reposo). Por último, la cuarta columna permite el acceso a una ventana donde se declara el tipo de material de la capa no-lineal y los coeficientes K_2 , K_3 , K_4 (no variables, que no dependen de la temporada y según el tipo de material).

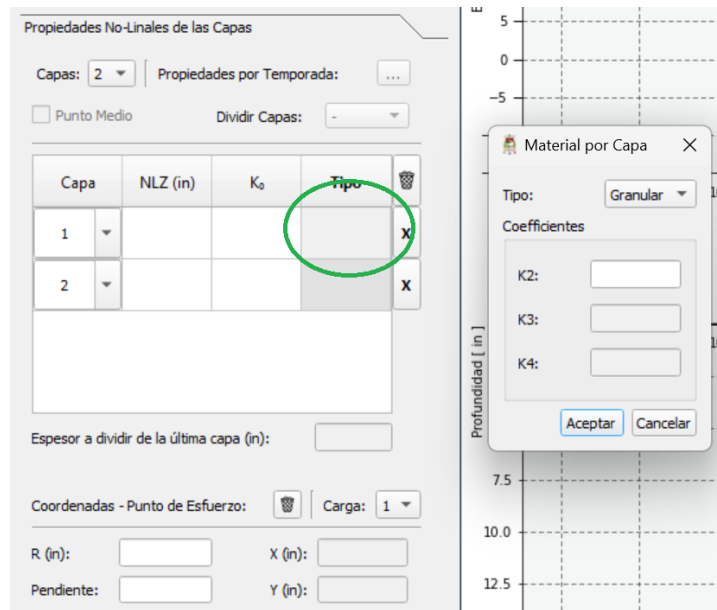


Figura 4.65: Ingreso de parámetros para análisis no-lineal y combinado

4.4.2.5 Propiedades no-lineales por temporada

En esta sección de manera similar a la ventana de los módulos elásticos se presentan tres tablas que dependen del número de capas no-lineales y número de períodos a realizar en el análisis. Aquí se permite más de una pestaña dependiendo del tipo de material declarado de las capas no-lineales. Las capas de tipo arcilla trabajan con un rango de módulos elásticos límites a determinar, a diferencia de las capas granulares. En la figura 4.66 se presenta la ventana para introducir los parámetros por temporada no-lineales, con K_1 habilitado para ambas capas, con los módulos elásticos máximo y mínimo habilitados solo para las capas de arcilla.

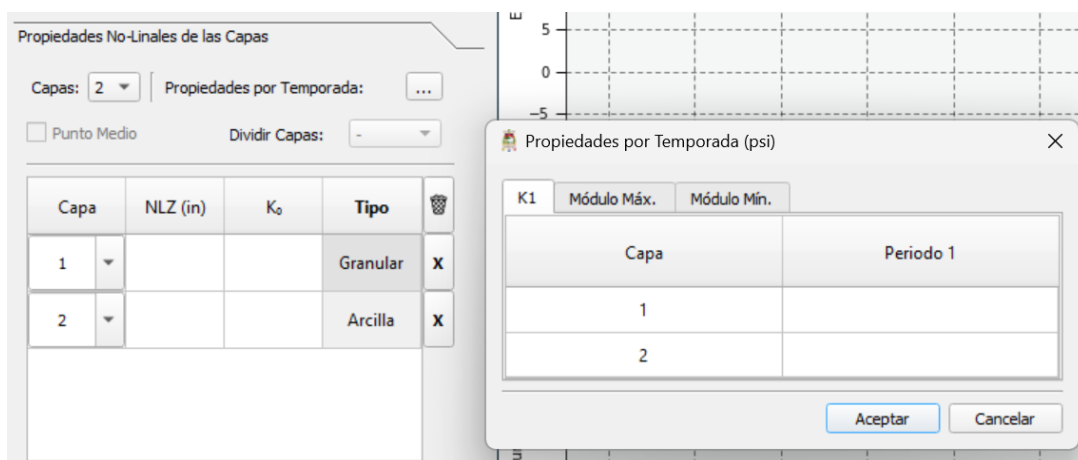


Figura 4.66: Propiedades por temporada K_1 y módulos elásticos límite

4.4.2.6 Punto de esfuerzo

Por último, se debe determinar el punto de esfuerzo en la superficie, que en combinación con la profundidad del mismo declarada en la tabla, se obtiene la coordenada precisa para determinar el módulo elástico de la capa no-lineal. Aquí se declara según el tipo de eje la posición en "x" ("r" para una sola área de contacto), "y" y la pendiente con la que varían estas coordenadas según la profundidad. En la figura 4.67, se presenta un ejemplo de un eje tándem con un punto de esfuerzo ubicado en el centro de la geometría del mismo, entre ejes y entre neumáticos.

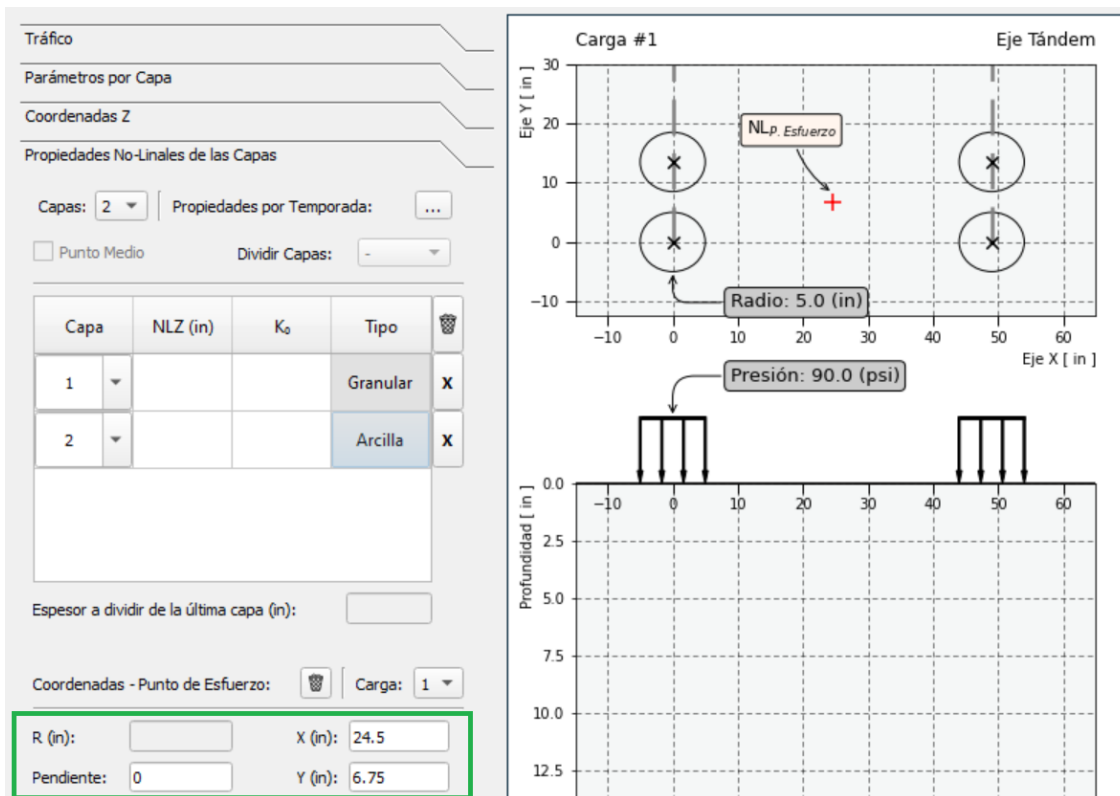


Figura 4.67: Parámetros para ubicar el punto de esfuerzo

Adicional a los parámetros, se permite realizar una división de hasta tres subcapas, en la que automáticamente el programa determina la profundidad para calcular el módulo elástico ubicado en el punto medio de cada subcapa dividida. Al dividir la última capa y al asumirse esta como la subrasante, la división consiste en declarar un espesor para las primeras divisiones, mientras que la última división se mantiene como infinita. En la figura 4.68 se realiza la división para un sistema de dos capas, siendo la segunda, la subrasante, y debe elegirse un espesor para las subdivisiones finitas. De no declararse se asume un valor de 2 pulgadas (5 cm) por defecto.

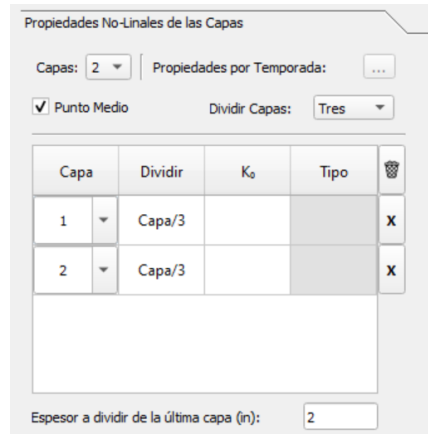


Figura 4.68: División de capas no-lineales

4.4.3 Gráficos de resultados

Una vez ejecutado el análisis se presentan algunas opciones para visualizar los resultados tabulados. En las figuras 5.47 y 5.48 se presentan los gráficos de respuesta de esfuerzo, deformación y deflexión vertical para la simulación realizada en el capítulo 5. En la figura 4.69 se presenta el bulbo de presiones estimado para una área de contacto de los ejes de carga analizados en un sistema de dos capas.

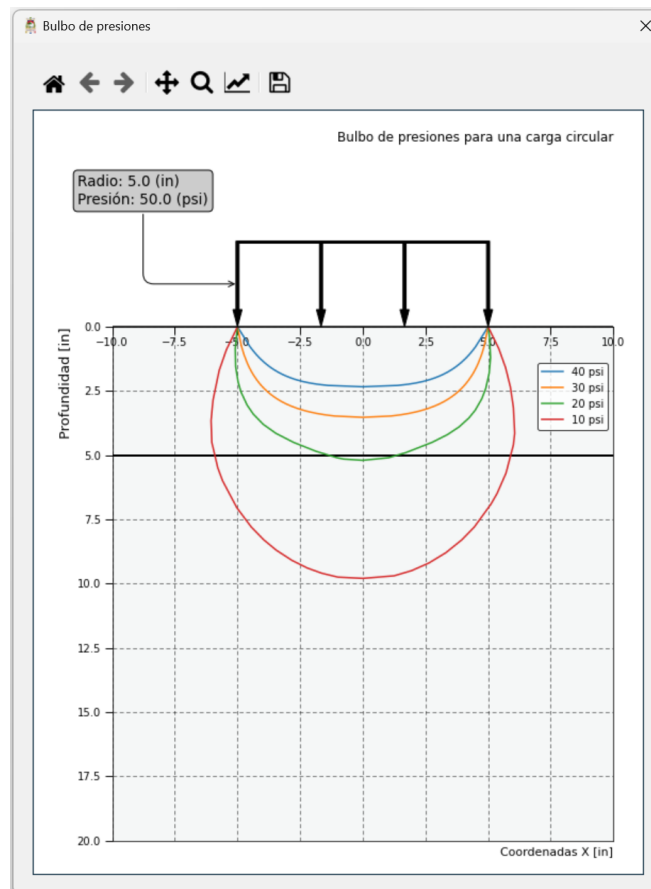


Figura 4.69: Bulbo de presiones para una carga aislada

Capítulo 5

5. Resultados y discusión

En este capítulo se detalla una simulación completa del programa para verificar que todos los módulos tengan un correcto funcionamiento y los resultados proporcionados sean adecuados. Los datos con los que se trabaja corresponden a un diseño vial realizado por el Gobierno Provincial de Loja denominado "Estudios y Diseños para el Mejoramiento a Nivel de Carpeta Asfáltica de la Vía Villonaco - Cera - Taquil". La simulación dentro del programa contempla el estudio de tráfico, materiales, diseño de la estructura del pavimento y análisis estructural del mismo para comparar los resultados con los correspondientes al estudio vial. Además, los resultados del análisis estructural se comparan con los resultados obtenidos en el programa KENPAVE.

5.1 Estudio de tráfico

5.1.1 Información de entrada

En el estudio vial, el conteo se ejecutó mediante la instalación de una cámara en un punto estratégico durante 9 días y las 24 horas. Con la grabación se llena los formularios de aforo vehicular mostrados en la figura 5.1. Los conteos vehiculares realizados por el Gobierno Provincial de Loja se muestran en el anexo A.

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:		05/05/2018							
SENTIDO:		Villonaco - Taquil							
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUEÑO	2DA DINAS CAMIÓN MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMIÓN GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMIÓN 4 EJES	+3S2 TRACTO CAMIÓN 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
VIDEOS									
00-01									
01-02									
02-03									
03-04									
04-05									
05-06									
06-07									
07-08									
08-09									
09-10									
10-11									
11-12									
12-13									
13-14									
14-15									
15-16									
16-17									
17-18									
18-19									
19-20									
20-21									
21-22									
22-23									
23-24									
TOTAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 5.1: Formato para el aforo vehicular [5]

- **Tráfico existente:** corresponde a inicios del año 2018, ver tabla 5.1.

Tabla 5.1: Tráfico Promedio Diario Anual [5].

HORAS	LV	2D	2DA	BUS (2DB)	2DB	3A	4C	TOTAL
00 a 06	21	1	6	3	2	1	0	34
06 a 12	86	3	15	12	7	1	0	124
12 a 18	115	7	12	14	6	1	0	155
18 a 24	73	3	14	7	4	0	1	102
TOTAL	295	14	47	36	19	3	1	415

- **Tráfico generado y atraído:** dentro del estudio se ha considerado un 20% para cada tipo de vehículo, puesto que la vía conecta con varias parroquias importantes de la provincia de Loja.
- **Período de diseño:** para esta vía corresponde a 20 años, es decir, entra en funcionamiento y termina su vida útil a finales de los años 2018 y 2038.
- **Tasa de crecimiento anual:** en vista de que las tasas de crecimiento proporcionadas por el MTOP corresponden a períodos (ver figura 5.2), se debe realizar un ajuste para ingresar el dato al programa. En el período del año 2015 al 2020 la tasa de crecimiento para camiones es de 1.74 y a partir del año 2020 es de 1.58.

Se sugiere realizar un promedio ponderado de acuerdo al número de años que le corresponde a cada tasa de crecimiento dentro del período de diseño con la siguiente expresión.

$$r_{pon} = \frac{n_1 r_1 + n_2 r_2 + \dots}{n} \quad (5.1)$$

Donde:

r_{pon} : Tasa de crecimiento para ingresar al programa (%).

r_1, r_2 : Tasas de crecimiento de cada período (%).

n_1, n_2 : Años de influencia de cada tasa de crecimiento.

n : Período de diseño en años.

PROVINCIA	PERIODO	TASAS DE CRECIMIENTO (%)		
		LIVIANO	BUS	CAMION
LOJA	2005-2010	4,47	2,22	2,18
	2010-2015	3,97	1,97	1,94
	2015-2020	3,57	1,78	1,74
	2020-2030	3,25	1,62	1,58

Fuente: MTOP
Elaboración: Equipo Técnico Estudios Viales y Obras Civiles.

Figura 5.2: Tasas de crecimiento vehicular [5]

- **Factor de dirección y carril:** según valores recomendados por la AASHTO de acuerdo al número de carriles. Para este caso dos.
- **Análisis de carga:** las cargas de tráfico empleadas en el estudio se muestran en la figura 5.3.

CUADRO DEMOSTRATIVO DE PESO BRUTO VEHICULAR Y LONGITUDES MÁXIMAS PERMISIBLES						
TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA	DESCRIPCIÓN	CARGA MÁXIMA	LARGO	ANCHO	ALTO
2D		camión de 2 ejes pequeño	7	5,5	2,6	3,00
2DA		camión de 2 ejes mediano	10	7,5	2,6	3,5
2DB		camión de 2 ejes grande	17	12	2,6	4,1
3-A		camión de 3 ejes	26	12,2	2,6	4,1
4-C		camión de 4 ejes	30	12,2	2,6	4,1
2S2		tracto camión de 2 ejes y semirremolque de 2 ejes	37	18,5	2,6	4,1
3S1		tracto camión de 3 ejes y semirremolque de 1 eje	37	18,5	2,6	4,1
3S3		tracto camión de 3 ejes y semirremolque de 3 ejes	48	18,5	2,6	4,1

Figura 5.3: Cargas de tráfico que soportará el pavimento [5]

El cálculo del factor de equivalencia o camión inicia con los valores de $SN = 2.0$ y $P_t = 2.0$, el valor de SN se irá modificando hasta ser similar al requerido en el diseño.

5.1.2 Ejecución del módulo de tráfico

En la ventana principal de tráfico se ingresan los parámetros considerados en el estudio y se determina automáticamente el número de ejes equivalentes que corresponde a la primera iteración (ver figuras 5.4 y 5.5).

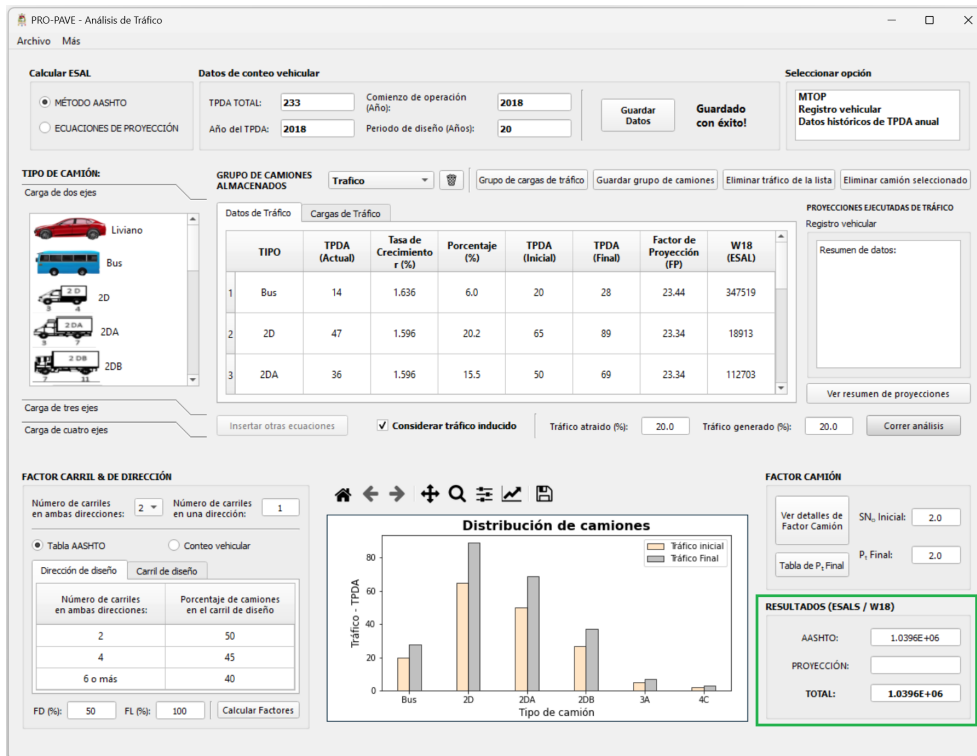


Figura 5.4: Ingreso de parámetros considerados en el estudio vial para calcular los ejes equivalentes en el programa

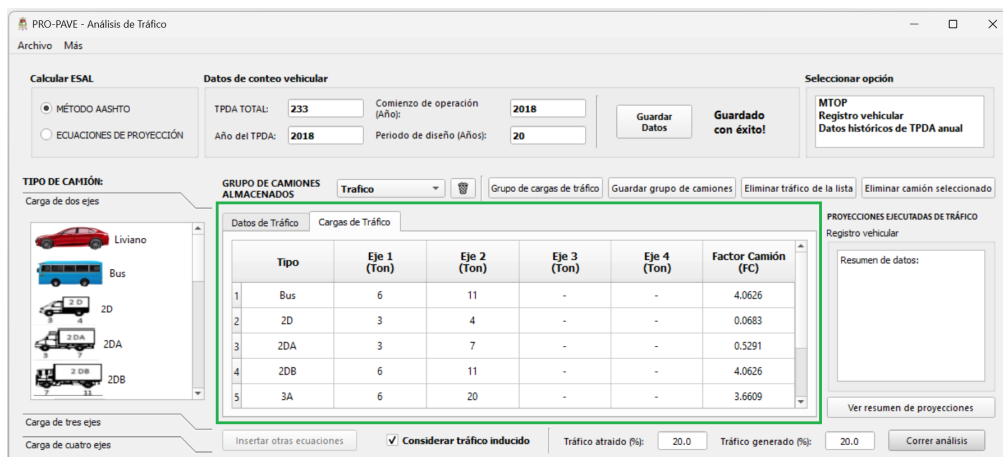


Figura 5.5: Ingreso del peso por eje de los camiones considerados en el estudio vial

Los resultados obtenidos automáticamente en el programa se comparan con los manejados en el estudio vial que fueron calculados manualmente mediante tablas en Excel. Se puede observar en las tablas 5.2, 5.3 y en la figura 5.6, que el tráfico proyectado para los vehículos tipo Bus, 2D y 2DA presenta diferencia de hasta dos vehículos. La razón de esta variación puede ser por cómo se considera la tasa de crecimiento en el programa, a diferencia del estudio vial que se realiza la proyección cada año para finalmente sumar los ejes equivalentes. También en el estudio vial se redondea al inmediato superior el tráfico para cada año calculado, lo cual es probable que genere un crecimiento mayor como en el caso del vehículo 2D.

• **Tráfico Promedio Diario Anual proyectado al año 2038**

Tabla 5.2: Tráfico Promedio Diario Anual año 2038.

TPDA proyectado al año 2038			
Vehículo	Estudio vial	Programa	Diferencia
Bus (2DB)	27	28	1
2D	91	89	-2
2DA	68	69	1
2DB	37	37	0
3A	7	7	0
4C	3	3	0
TOTAL	233	233	0

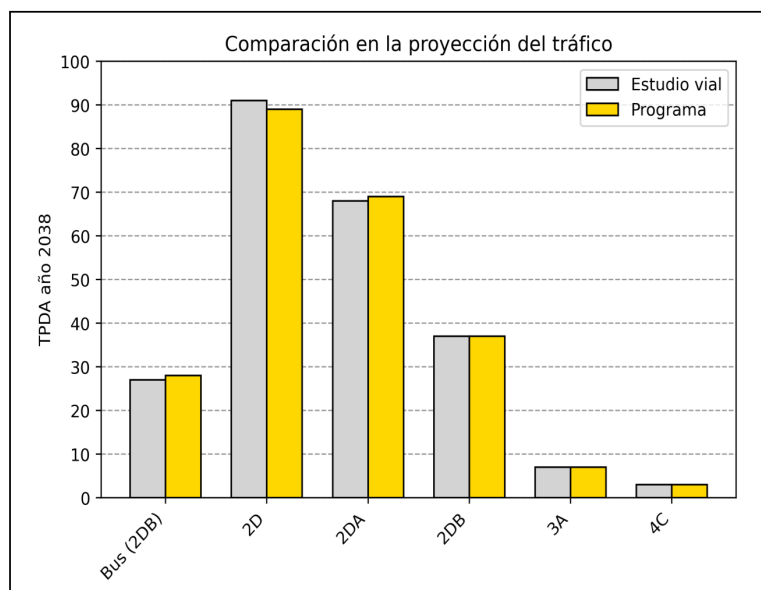


Figura 5.6: Comparación en la proyección del tráfico en el programa y estudio vial

- **Clasificación de los vehículos pesados**

Tabla 5.3: Clasificación de los vehículos pesados

Clasificación vehicular			
Vehículo	Estudio vial (%)	Programa (%)	Diferencia (%)
Bus (2DB)	11.6	12.0	-0.4
2D	39.1	38.3	0.8
2DA	29.2	29.6	-0.4
2DB	15.9	15.9	0
3A	3.0	3.0	0
4C	1.3	1.3	0
TOTAL	100	100	-

- **Factor de Equivalencia de Carga o factor camión**

En la tabla 5.4 se presentan los factores de equivalencia de carga para cada vehículo, en el estudio vial se maneja la misma metodología que en el programa, sin embargo, se pueden notar diferencias, siendo los factores de carga proporcionados por el programa mayores a los manejados en el estudio. Es probable que la transformación de toneladas a libras dentro de las fórmulas propuestas por la AASHTO se esté manejando una variación en decimales, en el caso del programa 1 kg equivale a 2.205 lb.

Tabla 5.4: Factores de equivalencia de carga

Factores de equivalencia de carga $SN = 2.0$ y $P_t = 2.0$			
Vehículo	Estudio Vial	Programa	Diferencia
Bus (2DB)	4.0294	4.0626	-0.0332
2D	0.0679	0.0683	-0.0004
2DA	0.5250	0.5291	-0.0041
2DB	4.0294	4.0626	-0.0332
3A	3.6313	3.6609	-0.0296
4C	1.7689	1.7830	-0.0141

- **Número de ejes equivalentes primera iteración**

En la tabla 5.5 se muestra los ESAL calculados para la primera iteración suponiendo un número estructural de 2.0, donde se observa una diferencia del 2.27%, siendo el calculado en el estudio vial mayor al obtenido en el programa. Como se mencionó anteriormente, en el estudio se realiza la proyección año por año, no se emplea solamente el factor de proyección FP como en el caso del programa, sin embargo, la diferencia no presenta cambios significativos en el diseño.

Tabla 5.5: Número de ejes equivalentes, $SN = 2.0$ y $P_t = 2.0$

ESAL, $SN = 2.0$ y $P_t = 2.0$		
Estudio vial	Programa	Diferencia (%)
1'063'199	1'039'600	2.27

5.2 Estudio de los materiales para mejoramiento, subbase y base

Dentro del proyecto se han identificado dos minas a cielo abierto para la extracción de materiales, su elección está en función de la calidad y cantidad de los materiales, accesibilidad para la explotación de yacimientos o bancos, procedimientos eficaces y de bajo costo, mínimas distancias de acarreo y condiciones de meteorización, excavación, legales y ambientales. De ambas minas se tomaron muestras para ejecutar ensayos de granulometría, clasificación, resistencia a la abrasión, compactación, CBR de laboratorio e intemperismo acelerado.

- **Mina La Vega 3:** localizada en el cantón Catamayo, en el río Catamayo, a una distancia de 31 km desde el inicio del proyecto. Algunos parámetros obtenidos en laboratorio se muestran en la tabla 5.6.

Tabla 5.6: Resultados de las características mecánicas de la mina La Vega 3 [5]

Cumplimiento de normativa				
Ensayo	Mejoramiento	Subbase	Base	Resultado
Desgaste a la Abrasión	<50%	<50%	<40%	23.48
Límite Líquido	<35%	<25%	<25%	NP
Índice de Plasticidad	<9%	<6%	<6%	NP
Pasante del Tamiz No. 200	<20%			3.01
CBR	>20%	>30%	>80%	80

- **Mina Cera:** ubicada en el talud derecho en la abscisa 8+600 del proyecto, en el cantón Loja, los resultados de laboratorio se indican en la tabla 5.7.

Tabla 5.7: Resultados de las características mecánicas de la mina Cera [5]

Cumplimiento de normativa				
Ensayo	Mejoramiento	Subbase	Base	Resultado
Desgaste a la Abrasión	<50%	<50%	<40%	46.84
Límite Líquido	<35%	<25%	<25%	NP
Índice de Plasticidad	<9%	<6%	<6%	NP
Pasante del Tamiz No. 200	<20%			3.00
CBR	>20%	>30%	>80%	20

- **Combinación mina La Vega 3 y Cera:** para el material de mejoramiento se emplea la combinación de los áridos procedentes de cada mina, donde la mina la Vega 3 aporta un 20% y la CERA un 80%.

5.2.1 Información de entrada

Dentro del programa se cargaron los porcentajes retenidos en los tamices para determinar las granulometrías de cada mina y de la combinación de áridos. En las tablas 5.8, 5.9 y 5.10 se presenta la granulometría de cada material.

Tabla 5.8: Ensayo granulométrico mina La Vega 3 [5]

mm	Tamiz No.	Peso retenido parcial (gr)	Peso retenido acumulado (gr)
75	3"	0.00	0.00
63	2 1/2"	695.9	695.9
50	2"	285.2	981.1
37.5	1 1/2"	643.5	1624.6
25	1"	1397	3021.6
19	3/4"	906.2	3927.8
12.5	1/2"	843.6	4771.4
9.5	3/8"	517.8	5289.2
4.75	Nº.4	1215.3	6504.5
2	Nº.10	84.3	7480
1.18	Nº.16	78.5	8388
0.425	Nº.40	240.3	11168
0.3	Nº.50	82	12117
0.15	Nº.100	86.6	13119
0.075	Nº.200	29	13454

Tabla 5.9: Ensayo granulométrico mina La Cera [5]

mm	Tamiz No.	Peso retenido parcial (gr)	Peso retenido acumulado (gr)
75	3"	0	0
63	2 1/2"	679.9	679.9
37.5	1 1/2"	2174.8	2854.7
25	1"	2176	5030.7
19	3/4"	1589.8	6620.5
12.5	1/2"	1742.7	8363.2
9.5	3/8"	706.1	9069.3
4.75	Nº.4	1023.6	10092.9
2	Nº.10	173.8	10570
1.18	Nº.16	72.7	10769
0.425	Nº.40	107.8	11065
0.3	Nº.50	38.7	11171
0.15	Nº.100	92.3	11424
0.075	Nº.200	81.7	11648

Tabla 5.10: Ensayo granulométrico combinación mina La Vega 3 (80%) y Cera (20%) [5]

mm	Tamiz No.	Peso retenido parcial (gr)	Peso retenido acumulado (gr)
75	3"	0	0
63	2 1/2"	390.2	390.2
37.5	1 1/2"	816.6	1206.8
25	1"	2035.2	3242
19	3/4"	911.4	4153.4
12.5	1/2"	1111.4	5264.8
9.5	3/8"	798.3	6063.1
4.75	Nº.4	1258.9	7322
2	Nº.10	140.1	7934
1.18	Nº.16	73.6	8255
0.425	Nº.40	110	8736
0.3	Nº.50	32.8	8879
0.15	Nº.100	65.7	9166
0.075	Nº.200	49.8	9383

5.2.2 Ejecución del módulo de materiales - Análisis granulométrico

• Mina La Vega 3

En la figura 5.7 se observa la simulación en el programa.

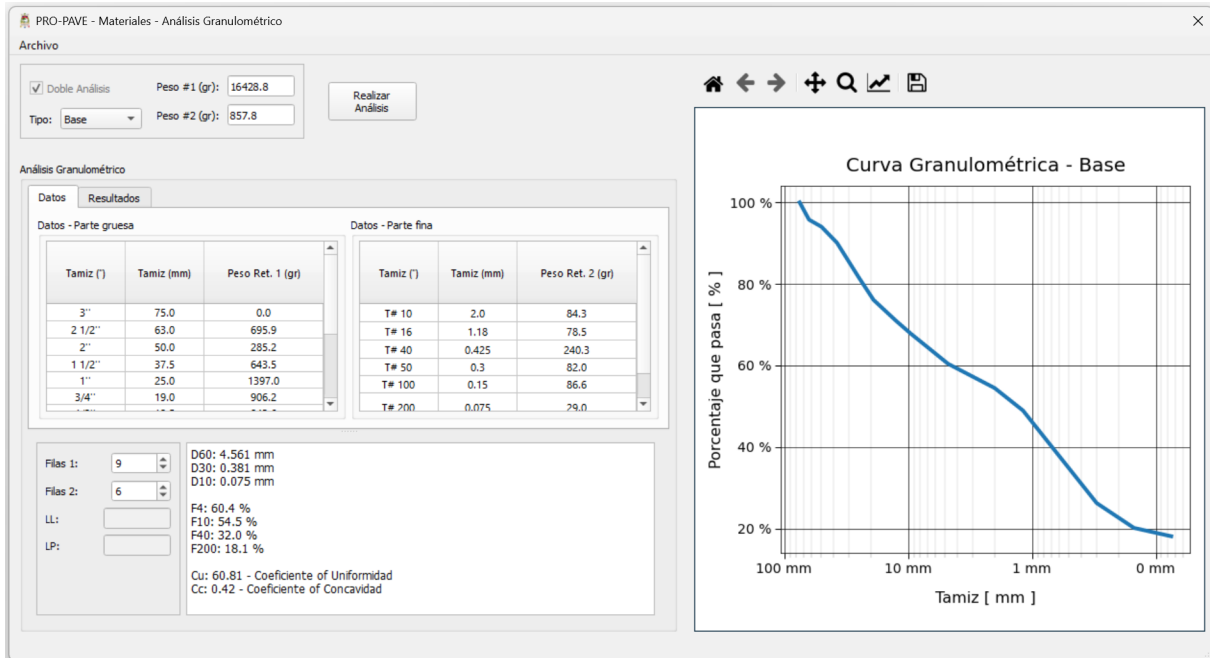


Figura 5.7: Granulometría de la mina La Vega 3 cargada al programa

Tabla 5.11: Comparación mina La Vega 3

Tamiz		% Retenido		% Pasa		Diferencia
mm	No.	Estudio Vial	Programa	Estudio Vial	Programa	-
75	3"	0.00	0.00	100	100	0.00
63	2 1/2"	4.24	4.24	96	95.76	0.24
50	2"	5.97	5.97	94	94.03	-0.03
37.5	1 1/2"	9.89	9.89	90	90.11	-0.11
25	1"	18.39	18.39	82	81.61	0.39
19	3/4"	23.91	23.91	76	76.09	-0.09
12.5	1/2"	29.04	29.04	71	70.96	0.04
9.5	3/8"	32.19	32.19	68	67.81	0.19
4.75	Nº.4	39.59	39.59	60	60.41	-0.41
2	Nº.10	45.53	45.53	54.47	54.47	0.00
1.18	Nº.16	51.06	51.06	48.94	48.94	0.00
0.425	Nº.40	67.98	67.98	32.02	32.02	0.00
0.3	Nº.50	73.75	73.75	26.25	26.25	0.00
0.15	Nº.100	79.85	79.85	20.15	20.15	0.00
0.075	Nº.200	81.89	81.89	18.11	18.11	0.00

• Mina La Cera

En la figura 5.8 se muestra la simulación en el programa.

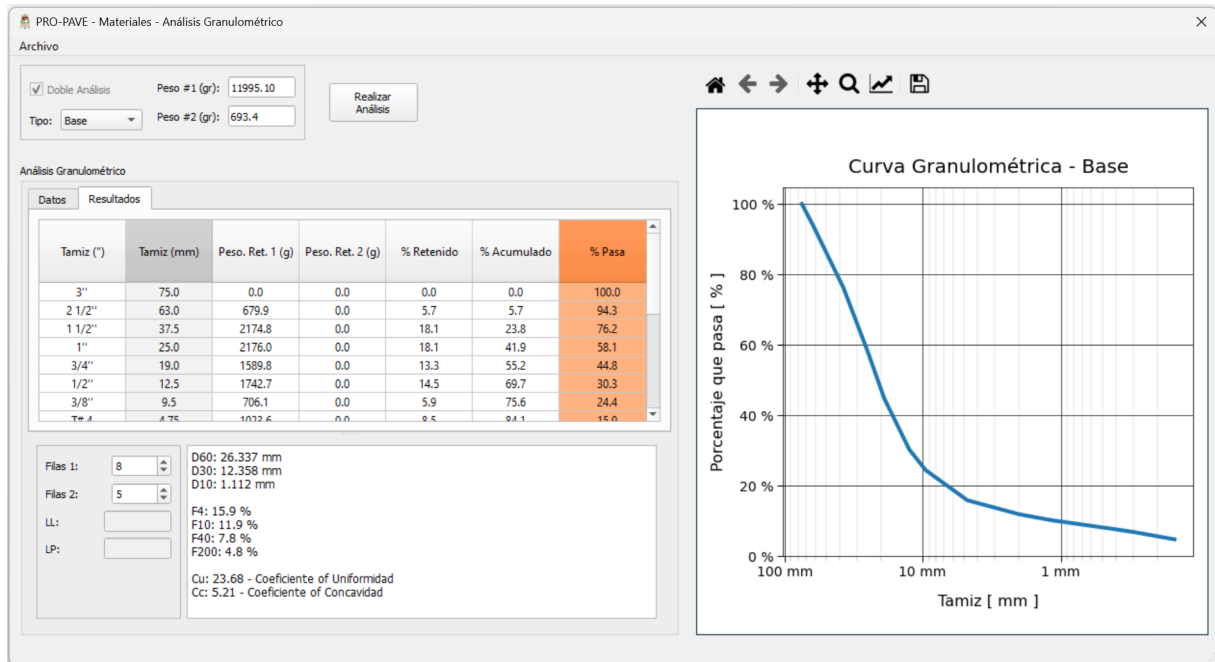


Figura 5.8: Granulometría de la mina La Cera cargada al programa

Tabla 5.12: Comparación mina La Cera

Tamiz		% Retenido		% Pasa		Diferencia
mm	No.	Estudio Vial	Programa	Estudio Vial	Programa	-
75	3"	0	0.00	100	100.00	0.00
63	2 1/2"	5.67	5.67	94	94.33	-0.33
37.5	1 1/2"	23.8	23.80	76	76.20	-0.20
25	1"	41.94	41.94	58	58.06	-0.06
19	3/4"	55.19	55.19	45	44.81	0.19
12.5	1/2"	69.72	69.72	30	30.28	-0.28
9.5	3/8"	75.61	75.61	24	24.39	-0.39
4.75	Nº.4	84.14	84.14	16	15.86	0.14
2	Nº.10	88.12	88.12	12	11.88	0.12
1.18	Nº.16	89.78	89.78	10	10.22	-0.22
0.425	Nº.40	92.24	92.24	8	7.76	0.24
0.3	Nº.50	93.13	93.13	7	6.87	0.13
0.15	Nº.100	95.24	95.24	5	4.76	0.24
0.075	Nº.200	97.11	97.11	3	2.89	0.11

• **Combinación Cera (20%) y La Vega 3 (80%)**

En la figura 5.9 se presenta la simulación en el programa.

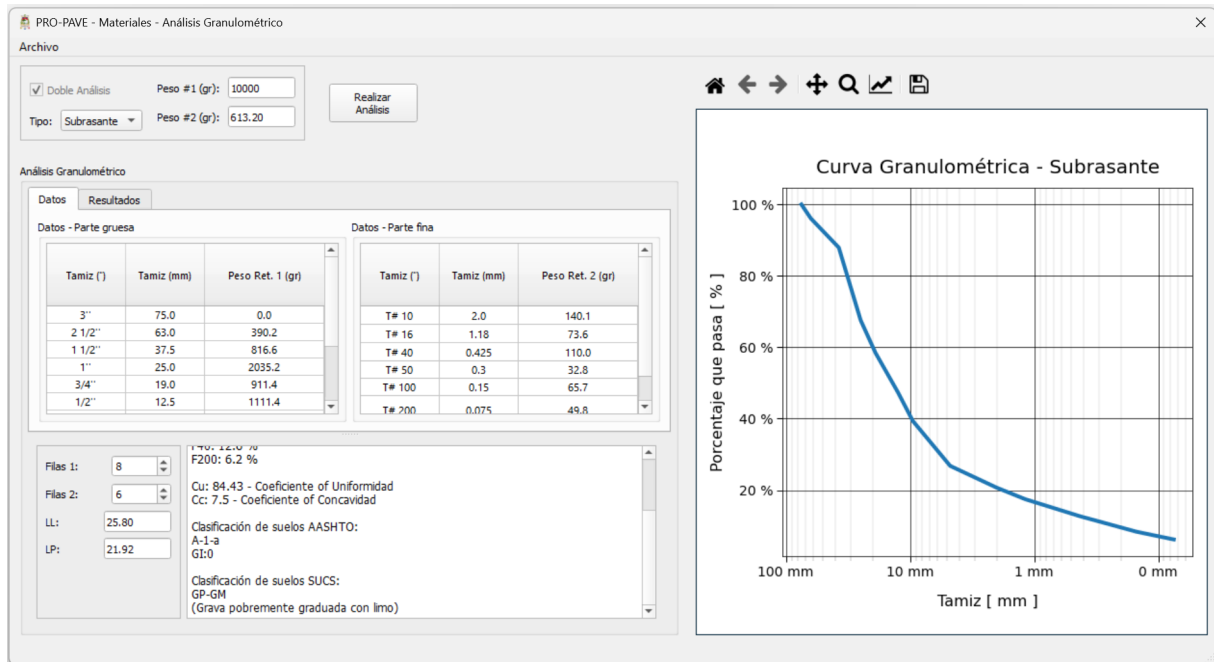


Figura 5.9: Granulometría de la combinación de las minas en el programa

Tabla 5.13: Comparación combinación mina La Vega 3 (80%) y Cera (20%)

Tamiz		% Retenido		% Pasa		Diferencia
mm	No.	Estudio Vial	Programa	Estudio Vial	Programa	-
75	3"	0	0.00	100	100.00	0.00
63	2 1/2"	3.9	3.90	96	96.10	-0.10
37.5	1 1/2"	12.07	12.07	88	87.93	0.07
25	1"	32.42	32.42	68	67.58	0.42
19	3/4"	41.53	41.53	58	58.47	-0.47
12.5	1/2"	52.65	52.65	47	47.35	-0.35
9.5	3/8"	60.63	60.63	39	39.37	-0.37
4.75	Nº.4	73.22	73.22	27	26.78	0.22
2	Nº.10	79.34	79.34	21	20.66	0.34
1.18	Nº.16	82.55	82.55	17	17.45	-0.45
0.425	Nº.40	87.36	87.36	13	12.64	0.36
0.3	Nº.50	88.79	88.79	11	11.21	-0.21
0.15	Nº.100	91.66	91.66	8	8.34	-0.34
0.075	Nº.200	93.83	93.83	6	6.17	-0.17

En las tablas 5.11, 5.12 y 5.13 se muestra el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje de material que pasa cada tamiz correspondientes al presentado en el estudio vial y los obtenidos en el programa, con diferencias no significativas entre ambos. El material resultante de la combinación entre las dos minas se clasifica mediante SUCS y AASHTO, y es usado como material de mejoramiento que será colocado sobre la subrasante desde la abscisa 13+620 hasta finalizar el proyecto. El material se clasifica como GP-GM según SUCS y A-1-a según AASHTO (ver figura 5.9). Este resultado coincide con el determinado en el estudio vial. Los informes generados con respecto a granulometría se presentan en el anexo B.

5.3 Estudio de los materiales para la mezcla asfáltica y determinación del contenido de asfalto óptimo según el método de Marshall

Para la carpeta asfáltica se utiliza un hormigón asfáltico mezclado en planta donde se emplearán dos tipos de agregados, que combinados proporcionan la granulometría que cumple con los límites establecidos con el MTOP.

5.3.1 Información de entrada

Los agregados triturados grueso (1") y polvo de piedra (producto de la trituración de una terciaria VSI), son resultado de la trituración de la piedra tipo canto rodado del río Catamayo, los cuales cumplen con todos los requerimientos exigidos para su producción y elaboración de la mezcla asfáltica. En las tablas 5.14 y 5.15 se muestran los datos de la granulometría de cada árido para su posterior combinación.

Tabla 5.14: Granulometría Ripio 1" Triturado [5]

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	Porcentajes acumulados	
No.	mm		Retenido	Pasante
1"	25	0	0	100
3/4"	19	227	7.64	92.36
3/8"	12.7	2569	86.44	13.56
No. 4	4.75	2944	99.06	0.94
No. 8	2.36	2948	99.19	0.81
No. 50	0.3	2955	99.43	0.57
No. 200	0.075	2962	99.66	0.34
PESO TOTAL (g)		2972		

Tabla 5.15: Granulometría Polvo de Piedra Retriturado [5]

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	Porcentajes acumulados	
No.	mm		Retenido	Pasante
1"	25	0	0	100
3/4"	19	0	0	100
3/8"	12.7	0	0	100
No. 4	4.75	292	19.68	80.32
No. 8	2.36	655	44.14	55.86
No. 50	0.3	1119	75.4	24.6
No. 200	0.075	1310	88.27	11.73
PESO TOTAL (g)		1484		

La granulometría que debe cumplir la combinación de áridos corresponde a los límites del tamiz 3/4" indicado en la figura 5.10.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
3/4" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
1/2" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80		90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Figura 5.10: Granulometría para mezcla asfáltica [12]

Una vez obtenida la combinación de áridos, para el diseño de la carpeta asfáltica se realizan los ensayos para determinar las gravedades específicas del material, estos se muestran en la figura 5.11.

$$\begin{array}{l}
 \text{Gravedad Específica} \\
 \text{Bulk} = \mathbf{Gsb}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 100 \\
 \hline
 40.00 \quad + \quad 60.00 \\
 \hline
 2.564 \quad \quad 2.586
 \end{array}
 =
 \frac{100}{38.80}
 = \mathbf{2.577}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Gravedad Específica} \\
 \text{SSS} = \mathbf{Gss}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 100 \\
 \hline
 40.00 \quad + \quad 60.00 \\
 \hline
 2.609 \quad \quad 2.632
 \end{array}
 =
 \frac{100}{38.128}
 = \mathbf{2.623}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Gravedad Específica} \\
 \text{Aparente} = \mathbf{Gsa}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 100 \\
 \hline
 40.00 \quad + \quad 60.00 \\
 \hline
 2.684 \quad \quad 2.710
 \end{array}
 =
 \frac{100}{37.043}
 = \mathbf{2.700}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Absorción} = \text{Abs. \%}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 100 \\
 \hline
 40.00 \quad + \quad 60.00 \\
 \hline
 1.75 \quad \quad 1.77
 \end{array}
 =
 \frac{100}{56.755}
 = \mathbf{1.762}$$

Figura 5.11: Gravedades específicas determinadas en el ensayo [5]

El ensayo RICE fue realizado para cada porcentaje de asfalto con el objetivo de obtener la gravedad específica máxima de las mezclas G_{mm} (ver figura 5.12).

% DE CEMENTO ASFALTICO AC-20		5	5.5	6	6.5	7
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK MEZCLA DE AGREGADOS	Gsb.	2.577	2.577	2.577	2.577	2.577
GRAVEDAD ESPECIFICA DEL ASFALTO CA-20	Gb.	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016
DATOS DE LOS ENSAYOS RICE:						
Peso de la Muestra en el Aire	gr.	1958	1955	1958	1978	2000
Peso del Frasco+Agua	gr.	7682	7682	7682	7682	7682
Peso del Frasco+Muestra+Agua	gr.	8860	8855	8853	8846	8844
Volumen	cc.	780	782	787	814	838
GRAVEDAD ESPECIFICA MAXIMA DE LAS MEZCLAS	Gmm.	2.510	2.500	2.488	2.430	2.387
GRAVEDAD ESPECIFICA EFECTIVA DE LOS AGREGADOS	Gse.	2.721	2.732	2.741	2.690	2.656
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE DE LOS AGREGADOS	Gsa.	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
COMPROBACION:	Gsa > Gse > Gsb	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
% DE ASFALTO ABSORBIDO POR LOS AGREGADOS	Pba.	2.085	2.241	2.365	1.660	1.178
CONTENIDO EFECTIVO DEL ASFALTO EN LAS MEZCLAS	Ae.	5.00	3.38	3.78	4.95	5.90

Figura 5.12: Ensayo RICE realizado en el estudio vial [5]

Los datos resultantes del ensayo Marshall se muestran en la figura 5.13. La mezcla asfáltica debe cumplir con los criterios de diseño para tráfico pesado según los ESALs que se ha determinado en el módulo 1 del programa.

G.E. CA-20	Grav.Esp. Bulk Agreg.													Estabilidad			Flujo			
	Asf.	AIRE	AGUA	S.S.S.	cc.	Bulk	Norma	Bulk corr.	Ae	Vagr.	Vacios	Vca	VAM corr.	Dial	Fact.C	Correg.	mm.	0,01"	VFA	Gmm.
1	5.0	1154	664	1156	492.2	2.345	-0.458	2.345						2466	1.09	2688		17.0		
2		1151	664	1153	489.5	2.352	-0.767	2.352						2495	1.09	2720		18.0		
3		1141	660	1155	494.9	2.306	1.224							2406	1.09	2623		14.0		
PROMEDIO						2.334		2.349	3.02	86.59	6.42	11.56	17.98			2677		16	73	2.510
1	5.5	1149	663	1150	486.8	2.360	-0.126	2.360						2693	1.09	2935		15.0		
2		1173	678	1173	495.5	2.366	-0.397	2.366						2654	1.09	2893		16.0		
3		1191	685	1193	507.8	2.345	0.523	2.345						2609	1.04	2713		16.0		
PROMEDIO						2.357		2.357	3.38	86.44	5.72	12.76	18.48			2847		16	63	2.500
1	6.0	1159	671	1160	488.4	2.373	-0.462	2.373						2680	1.09	2921		16.0		
2		1159	668	1160	492.4	2.354	0.320	2.354						2644	1.09	2882		14.0		
3		1167	674	1169	494.7	2.358	0.142	2.358						2614	1.09	2849		14.0		
PROMEDIO						2.362		2.362	3.78	86.15	5.06	13.95	19.01			2884		15	56	2.488
1	6.5	1123	648	1125	477.3	2.352	-0.551	2.352						2459	1.14	2803		14.0		
2		1123	646	1124	478.3	2.347	-0.341	2.347						2480	1.14	2827		14.0		
3		1148	655	1150	495.2	2.319	0.891	2.319						2466	1.09	2688		15.0		
PROMEDIO						2.340		2.340	4.95	84.88	3.70	14.97	18.67			2773		14	58	2.430
1	7.0	1190	676	1191	514.8	2.312	0.579	2.312						2385	1.00	2385		18.0		
2		1227	700	1228	527.5	2.326	-0.011	2.326						2394	0.96	2298		18.0		
3		1182	677	1182	505.3	2.339	-0.567	2.339						2339	1.04	2433		16.0		
PROMEDIO						2.325		2.325	5.90	83.92	2.58	16.02	18.60			2372		17	57	2.387

Figura 5.13: Resultados del ensayo Marshall [5]

5.3.2 Ejecución del módulo de materiales - Combinación de áridos y método de Marshall

En el módulo para combinación de áridos se ingresan las granulometrías y los límites que debe cumplir según el MTOP. En las figuras 5.14 y 5.15 se indica la granulometría de cada árido comparado con los límites de las especificaciones técnicas.

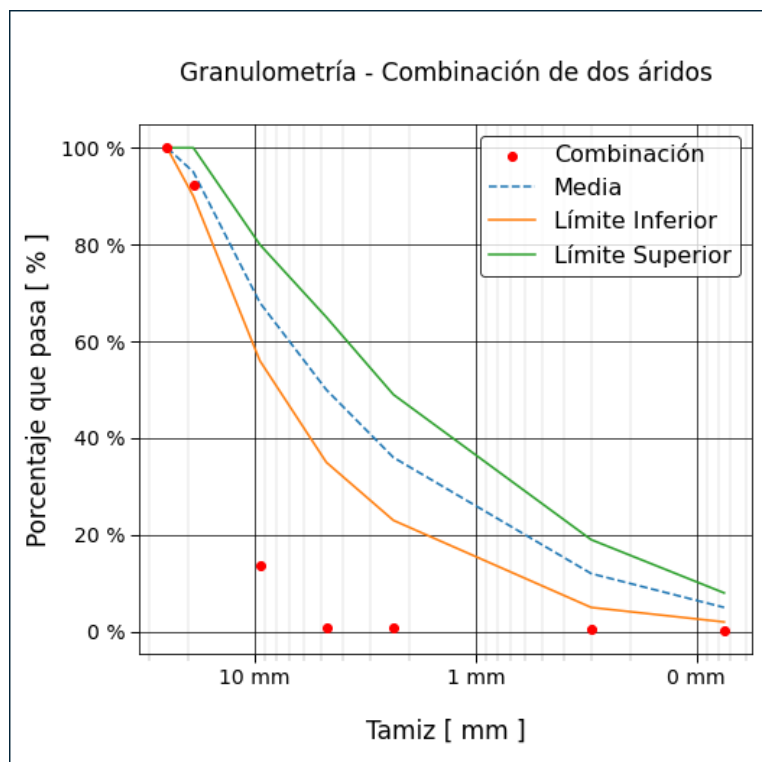


Figura 5.14: Árido A

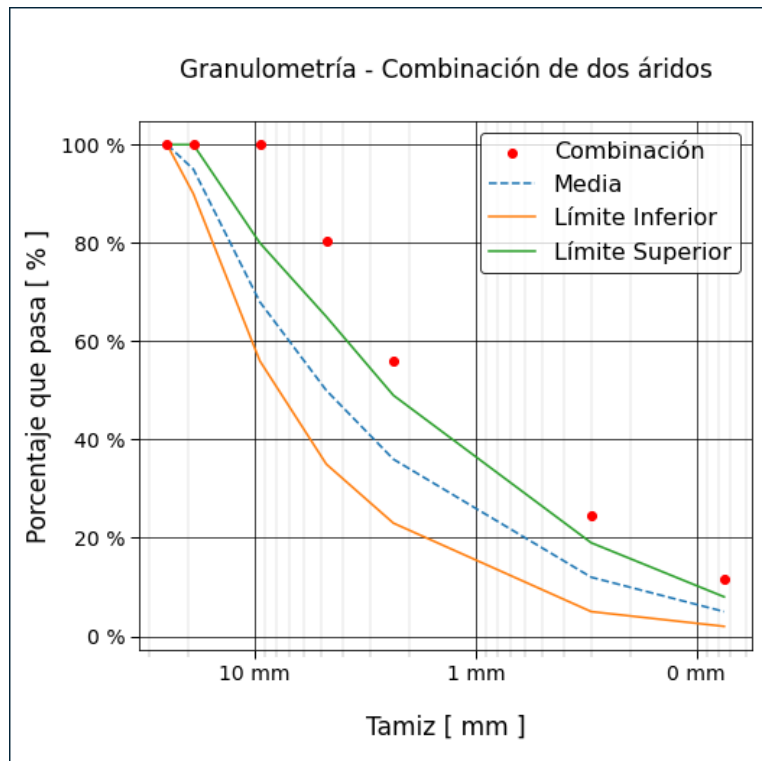


Figura 5.15: Árido B

En la figura 5.16 se observan los resultados de la combinación de áridos para elaborar la mezcla asfáltica. En el método analítico se emplea el tamiz #4 con el que se obtiene un porcentaje de 38.2% para el material Ripio 1" Triturado (árido A) y un 61.8% para el Polvo de Piedra Retriturado (árido B), estos valores se acercan a los que se utiliza dentro del estudio vial, donde se tiene el 40% para el árido A y 60% para el árido B.

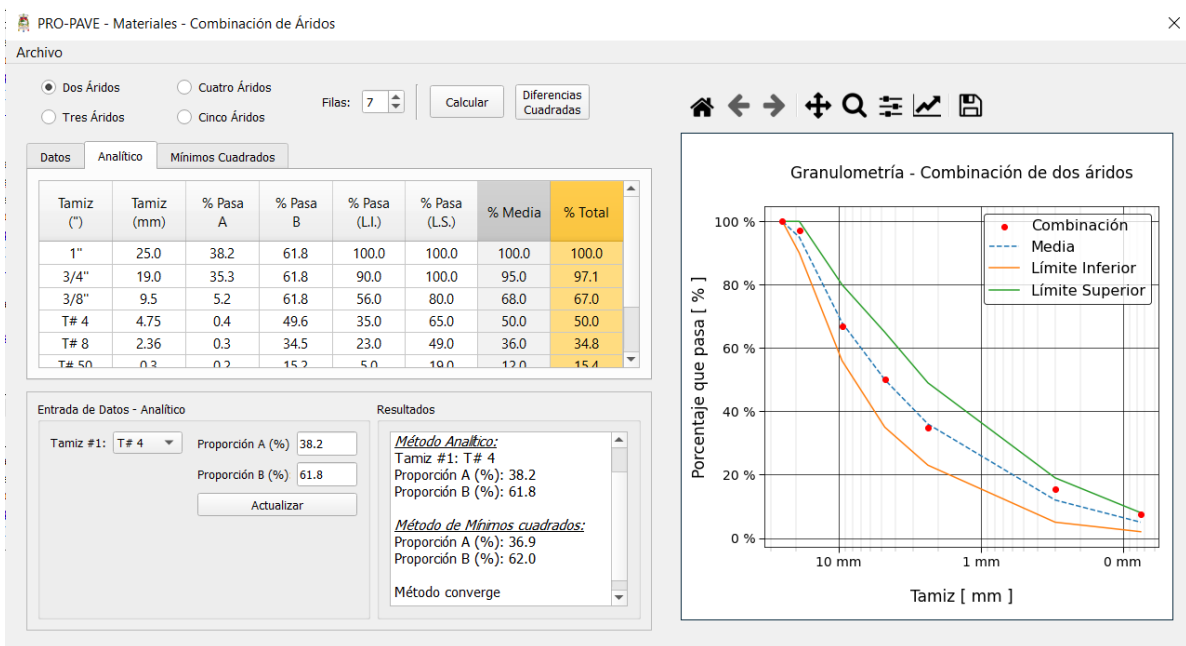


Figura 5.16: Combinación de áridos en el programa

Para calcular el contenido de asfalto óptimo en el programa se ingresan los resultados de gravedades específicas, ensayos RICE y Marshall (ver figuras 5.17, 5.18 y 5.19).

Peso específico del Asfalto (Gb):

Gravedad específica del agregado (Gsb):

Gravedad específica aparente del agregado (Gsa):

Figura 5.17: Ingreso de datos de gravedades específicas

Datos del ensayo RICE

Gb: Gsb: Gsa:

C.A (%)	5	5.5	6	6.5	7
Peso de la muestra en aire (g)	1958	1955	1958	1978	2000
Peso del contenedor y agua (g)	7682	7682	7682	7682	7682
Peso del contenedor con la muestra y agua (g)	8860	8855	8853	8846	8844

Figura 5.18: Ingreso de datos del ensayo RICE

	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C	5A	5B	5C
C.A. (%)	5.0			5.5			6.0			6.5			7.0		
WD - (g)	1154.0	1151.0	1141.0	1149.0	1173.0	1191.0	1159.0	1159.0	1167.0	1123.0	1123.0	1148.0	1190.0	1227.0	1182.0
WSSD - (g)	1156.0	1153.0	1155.0	1150.0	1173.0	1193.0	1160.0	1160.0	1169.0	1125.0	1124.0	1150.0	1191.0	1228.0	1182.0
Ww (g)	664.0	664.0	660.0	663.0	678.0	685.0	671.0	668.0	674.0	648.0	646.0	655.0	676.0	700.0	677.0
Estabilidad (lbs)	2466.0	2495.0	2406.0	2693.0	2654.0	2609.0	2680.0	2644.0	2614.0	2459.0	2480.0	2466.0	2385.0	2394.0	2339.0
Fluencia (0.01 plg)	17.0	18.0	14.0	15.0	16.0	16.0	16.0	14.0	14.0	14.0	14.0	15.0	18.0	18.0	16.5

Figura 5.19: Ingreso de datos del ensayo Marshall

Los resultados obtenidos en el estudio vial y en el programa para los cinco porcentajes de asfalto se muestran en las tablas 5.16 y 5.17.

Tabla 5.16: Resultados del ensayo Marshall para cada porcentaje de asfalto (a)

Contenido de Asfalto (%)	Estabilidad		Gmb		Fluencia (0.01")	
	Estudio vial	Programa	Estudio vial	Programa	Estudio vial	Programa
5.0	2677.0	2676.7	2.349	2.335	16	16.3
5.5	2847.0	2847.2	2.357	2.358	16	15.7
6.0	2884.0	2884.1	2.362	2.361	15	14.7
6.5	2773.0	2772.8	2.340	2.341	14	14.3
7.0	2372.0	2371.9	2.325	2.325	17	17.5

Tabla 5.17: Resultados del ensayo Marshall para cada porcentaje de asfalto (b)

Contenido de Asfalto (%)	VTM (%)		VMA (%)		VFA (%)	
	Estudio vial	Programa	Estudio vial	Programa	Estudio vial	Programa
5.0	6.42	6.97	17.98	20.89	73	66.74
5.5	5.72	5.69	18.48	19.24	63	70.44
6.0	5.06	5.09	19.01	18.96	56	73.16
6.5	3.70	3.68	18.67	18.75	58	80.53
7.0	2.58	2.58	18.60	18.67	57	86.27

Con los valores mostrados en las tablas 5.16 y 5.17 se han obtenido las gráficas de las figuras 5.20 (Programa) y 5.21 (estudio vial).

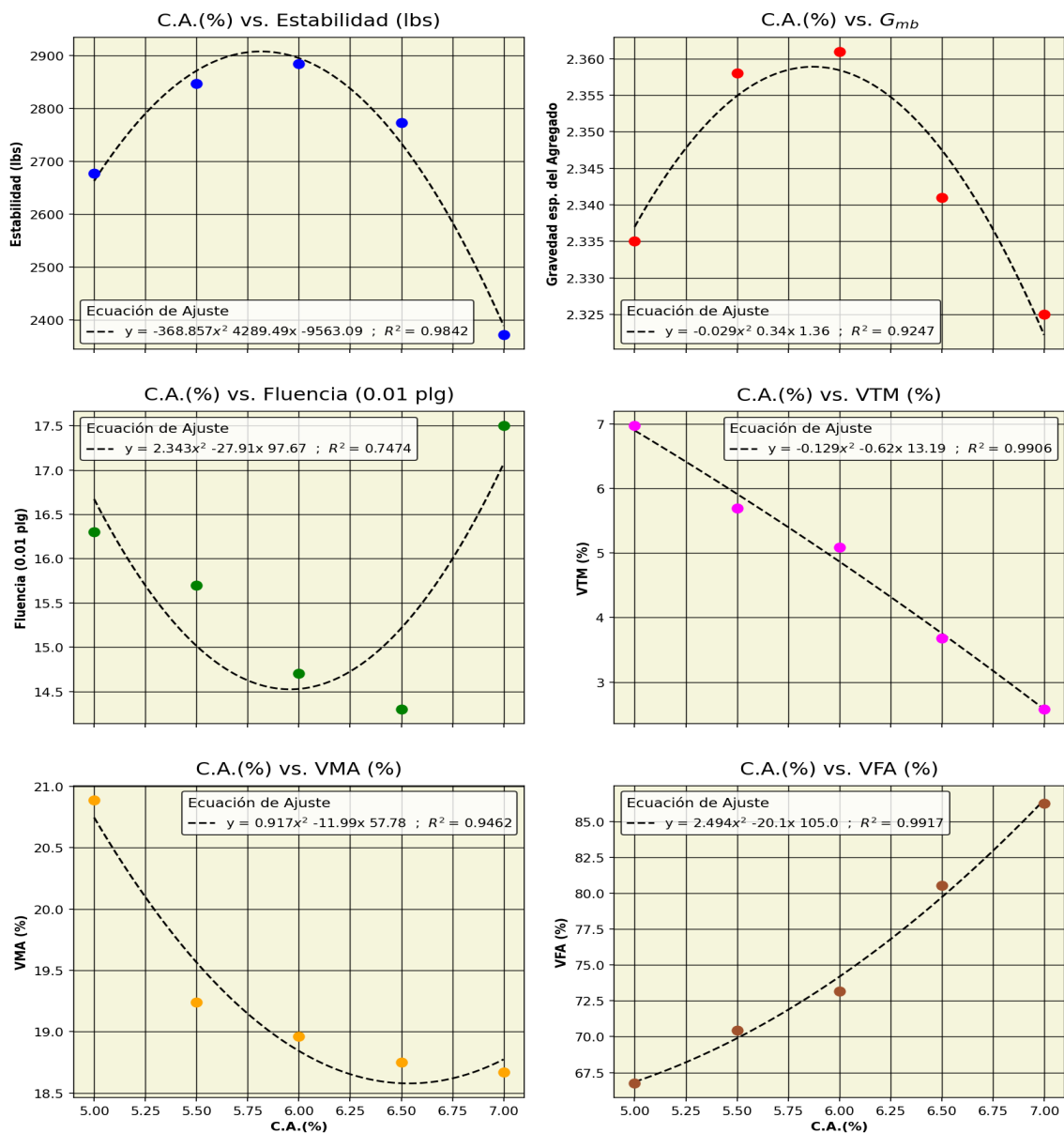


Figura 5.20: Gráficas del ensayo Marshall obtenidas en el programa

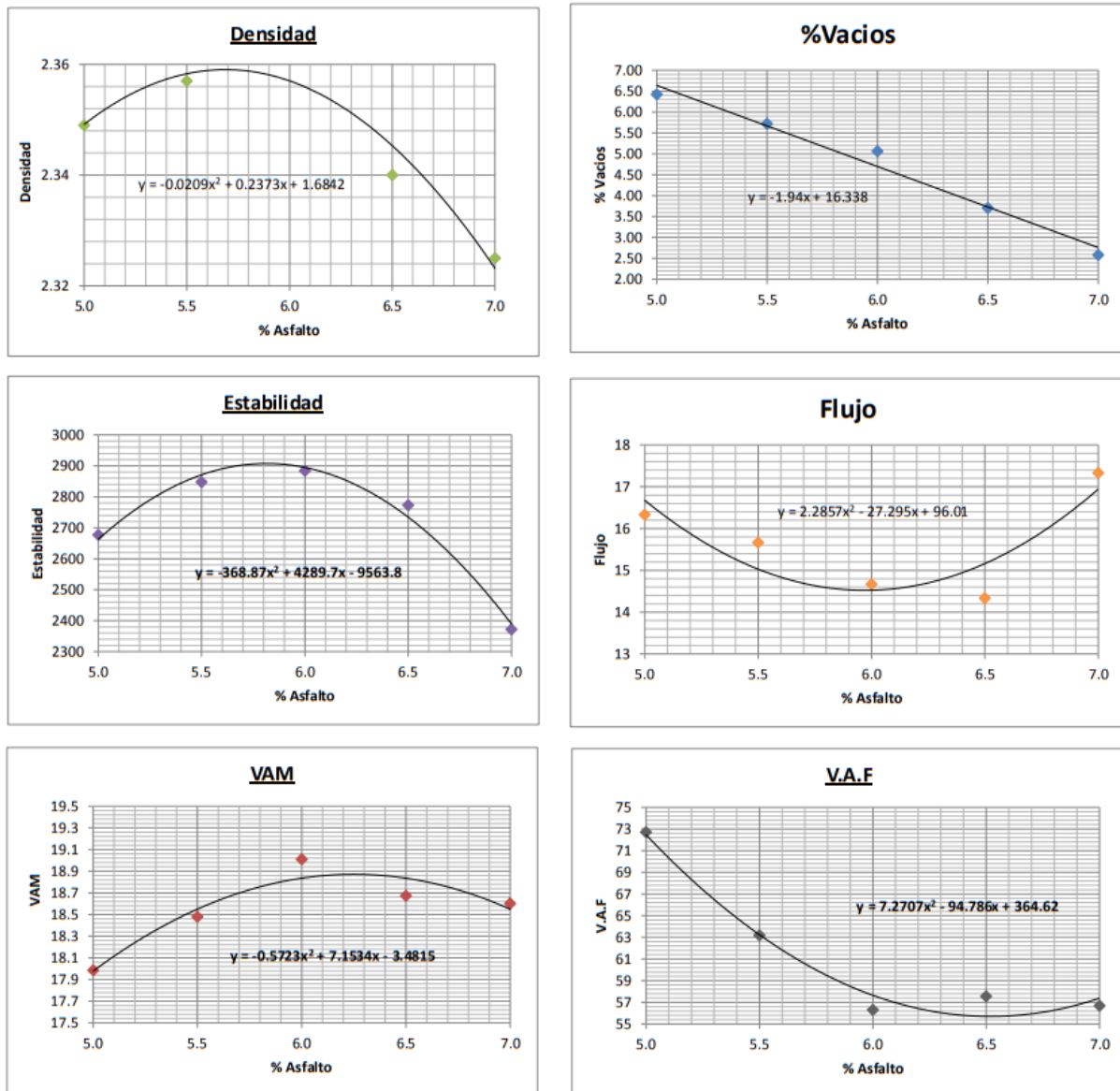


Figura 5.21: Gráficas del ensayo Marshall obtenidas en el estudio vial [5]

Comparando los valores de VFA en las tablas 5.16 y 5.17 y figuras 5.20 y 5.21, se observa una diferencia considerable en este parámetro, la tendencia de la gráfica del programa es totalmente diferente a la del estudio vial e incluso en este no es considerado el VFA al momento de calcular el contenido de asfalto óptimo. Las gráficas de densidad, estabilidad, flujo, VTM y VMA presentan tendencias iguales.

El resumen de resultados del estudio se muestra en la figura 5.22.

RESUMEN	
% Asfalto prom. (dens.+estab.+vacios)	6.17
Densidad	2.354
Vacios	4.57
Estabilidad	2 861.07
Flujo	14
VAM	18.87
V.F.A	56.58

Figura 5.22: Resumen del contenido de asfalto óptimo [5]

En la figura 5.22 se observa que el contenido de asfalto óptimo es de 6.17% considerando únicamente el promedio de la densidad, estabilidad y porcentaje de vacíos, es decir, lo excluyen al contenido de asfalto obtenido según el VFA. Este valor no cumple con el criterio de flujo para tráfico pesado, puesto que el mínimo flujo que se puede obtener según las gráficas es de aproximadamente 14.55, sin embargo, en el estudio vial se ha considerado un valor de 14.

En el estudio vial no se cumple en un inicio con el VTM. Según la normativa el porcentaje de asfalto obtenido de la gráfica de VTM corresponde al valor medio entre los límites de los criterios, para este caso 4%, pero el problema al tomar este valor, es que el contenido de asfalto óptimo calculado no cumple con el criterio de porcentaje de vacíos y supera el 5%, por lo que el pavimento presentaría exudación. Para cumplir con el rango de VTM, en el estudio se ha tomado el contenido de asfalto en la gráfica de VTM para el 3%, haciendo que el contenido de asfalto óptimo aumente, cumpliendo de esta manera con el porcentaje máximo de vacíos. El resumen de resultados determinado en el programa es el siguiente (ver figuras 5.23 y 5.24).

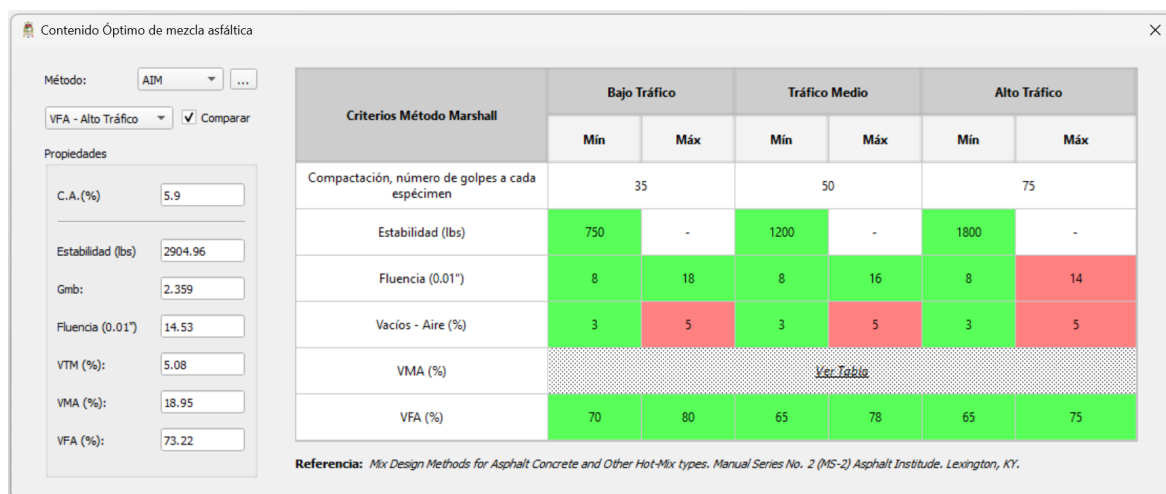


Figura 5.23: Resumen del contenido de asfalto óptimo en el programa (a)

Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral (VMA)

Tamaño nominal máximo de partículas ¹	Porcentaje mínimo VMA				
	Vacíos de Aire, porcentaje (Diseño) ²				
mm	-	3	4	5	4.87
1.18	T #16	21.5	22.5	23.5	23.37
2.36	T #8	19	20	21	20.87
4.75	T #4	16	17	18	17.87
9.5	3/8"	14	15	16	15.87
12.5	1/2"	13	14	15	14.87
19	3/4"	12	13	14	13.87
25	1"	11	12	13	12.87
37.5	1 1/2"	10	11	12	11.87
50	2"	9.5	10.5	11.5	11.37
63	2 1/2"	9	10	11	10.87

Nota:
1. El tamaño nominal máximo de partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10 %.
2. Se permite realizar interpolación de mínimos vacíos en el agregado mineral (VMA) entre los valores de diseño enlistados.

Referencia: Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix types, Manual Series No. 2 (MS-2) Asphalt Institute, Lexington, KY.

Figura 5.24: Resumen del contenido de asfalto óptimo en el programa (b)

De acuerdo a la figura 5.23 se obtiene un resultado similar a lo mencionado anteriormente, el programa muestra que no se cumple con los criterios de flujo y porcentaje de vacíos máximo para alto tráfico, el resto de criterios se cumplen. El contenido de asfalto óptimo calculado es de 5.9% considerando en el promedio la densidad, estabilidad, VTM y VFA, sin embargo, hay que realizar correcciones para cumplir con el criterio de VTM, para ello en el programa se configura para que el porcentaje de asfalto de la gráfica de VTM corresponda al valor mínimo de los vacíos (3%) y luego proceder a calcular el promedio nuevamente. En la figura 5.25 se observan los resultados definitivos.

Contenido Óptimo de mezcla asfáltica

Método: AIM

VFA - Alto Tráfico Comparar

Propiedades

C.A.(%) 6.0

Estabilidad (lbs) 2894.97

Gmb: 2.358

Fluencia (0.01") 14.53

VTM (%) 4.87

VMA (%) 18.84

VFA (%) 74.18

Criterios Método Marshall	Bajo Tráfico		Tráfico Medio		Alto Tráfico	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Compacción, número de golpes a cada espécimen	35		50		75	
Estabilidad (lbs)	750	-	1200	-	1800	-
Fluencia (0.01")	8	18	8	16	8	14
Vacíos - Aire (%)	3	5	3	5	3	5
VMA (%)	Ver Tabla					
VFA (%)	70	80	65	78	65	75

Referencia: Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix types, Manual Series No. 2 (MS-2) Asphalt Institute, Lexington, KY.

Figura 5.25: Contenido de asfalto óptimo corregido en el programa

El porcentaje de asfalto óptimo es del 6% y en el estudio vial de 6.17%. Esto se debe

a que en este último no se incluye en el promedio el VFA. Si en el programa no se toma en cuenta el VFA el valor del contenido de asfalto óptimo es de 6.17%, igual que en el considerado para la construcción de la vía, pero con el problema que no cumple con el criterio de flujo. Esto se podría justificar al considerar los criterios de tráfico medio, debido a que la cantidad de ESAL calculado supera al límite máximo del tráfico medio con una cantidad pequeña (ESAL calculado es 1'039'600 y el límite máximo es 1'000'000). Los informes generados en el módulo de materiales con respecto a combinación de áridos y ensayo Marshall se presentan en el anexo B.

5.4 Estudio de subrasante

Con el fin de revisar y actualizar las características de la subrasante existente, en el estudio vial se realizaron ensayos de campo mediante la ejecución de calicatas a lo largo del proyecto tomando muestras a nivel de subrasante a 0.50, 1.00 y 1.5 m de profundidad a cada 2 km de distancia.

5.4.1 Información de entrada

Los ensayos que se realizaron en cada punto de la vía se indican en la figura 5.26.

POZO	PROFUNDIDAD	ABSCISA	LÍMITES			GRANULOMETRIA					CLASIFICACION		CH %	COMPACTACION		CBR 95%
			LL	LP	IP	PASANTE N° 200	PASANTE N° 4	GRAVA	ARENA	FINOS	SUCS	AASHTO		DSM Kg/m2	OCH %	
1	0.50	0+000	35	30	5	15	44	56	28	15	GM	A-1-b	10.71			
	1.00	0+000	NP			14	43	57	29	14	GM	A-1-a	8.49	2098	9.05	
	1.50	0+000	45	38	7	70	95	5	25	70	CL	A-5	43.46	1639	15.55	26.0
2	0.50	2+000	29	27	2	38	80	20	42	38	SM	A-4	11.20	1886	11.42	
	1.00	2+000	36	30	6	52	98	2	45	52	ML	A-4	17.61	1867	9.59	
	1.50	2+000	34	31	3	24	72	28	49	24	SM	A-4	9.78	1877	10.15	19.5
3	0.50	4+000	25	23	2	20	54	46	35	20	SM	A-1-b	6.01	2222	6.85	
	1.00	4+000	34	27	7	84	97	3	13	84	ML	A-4	19.21	1822	14.65	
	1.50	4+000	NP			53	94	6	41	53	ML	A-4	13.12	1784	13.05	11.5
4	0.50	6+000	36	21	15	49	71	29	22	49	SC	A-6	16.77			
	1.00	6+000	32	17	15	23	44	56	21	23	GC	A-2-6	8.82	2017	11.65	
	1.50	6+000	34	18	16	15	25	75	11	15	GC	A-2-6	7.78	2182	8.22	61.0
5	0.50	8+000	NP			13	41	59	28	13	GM	A-1a	5.44	2060	8.60	
	1.00	8+000	26	24	2	20	67	33	47	20	SM	A-1-b	9.55	2095	7.69	
	1.50	8+000	25	20	5	16	54	46	37	16	SM	A-1-b	6.86	2073	7.05	11.5
6	0.50	10+000	26	24	2	10	28	72	18	10	GP-GM	A-1-a	7.77	1992	11.95	
	1.00	10+000	43	21	22	14	46	54	32	14	GC	A-2-7	9.65	2209	6.40	
	1.50	10+000	48	24	24	17	37	63	20	17	GC	A-2-7	15.04	1974	12.15	35.0
7	0.50	12+000	29	23	6	13	37	63	24	13	GM	A-1-a	7.83	2203	8.10	
	1.00	12+000	27	22	5	5	21	79	16	5	GP-GC	A-1-a	9.29	2233	6.70	
	1.30	12+000	32	23	9	8	31	69	23	8	GP-GC	A-2-4	10.36	2099	9.80	7.3
8	0.50	14+000	31	16	15	24	58	42	33	24	SC	A-2-6	11.66	1889	11.85	
	1.00	14+000	65	24	41	70	88	12	19	70	CH	A-7-6	27.79	1660	17.20	
	1.50	14+000	62	24	38	76	98	2	22	76	CH	A-7-6	32.85	1681	16.10	1.0

Figura 5.26: Caracterización de la subrasante [5]

Para la determinación del CBR de diseño se utiliza el método propuesto por el Instituto del Asfalto, el cual recomienda tomar el valor total de los percentiles al 60, 75 o el 87.5% de los valores individuales, de acuerdo con el tránsito que se espera circule sobre el pavimento, en el caso del estudio toman nuevamente como un tráfico medio,

por lo que la resistencia queda determinada para un percentil del 75%. Los datos de los ensayos CBR se muestran en la tabla 5.18.

Tabla 5.18: Datos de los ensayos CBR [5]

Ensayo No.	CBR (%)
1	26
2	19.5
3	11.5
4	11.5
5	7.3
6	35

5.4.2 Ejecución del módulo de materiales - Módulo resiliente de la subrasante

En vista que en el programa especifica que deben colocarse al menos 2 períodos durante el año, se ingresan los mismos CBR para cada período, donde el primer período comprende los meses de enero a junio y el segundo los meses de julio a diciembre (ver figura 5.27).

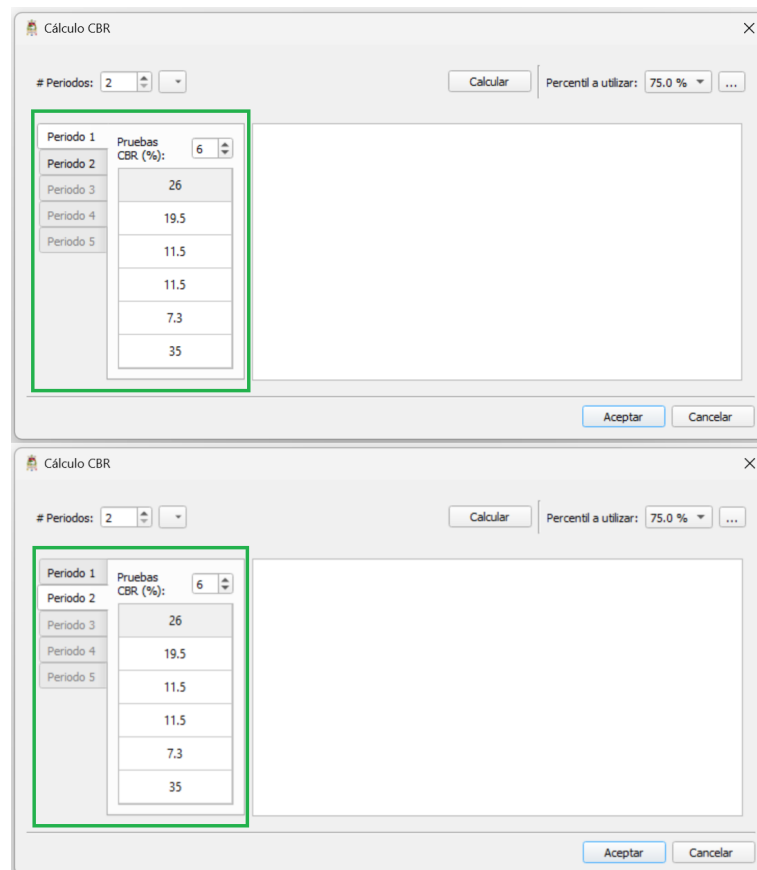


Figura 5.27: Ingreso de los valores de CBR al programa

El resultado para ambos períodos es el mismo y corresponde al percentil 75%, ver figura 5.28.

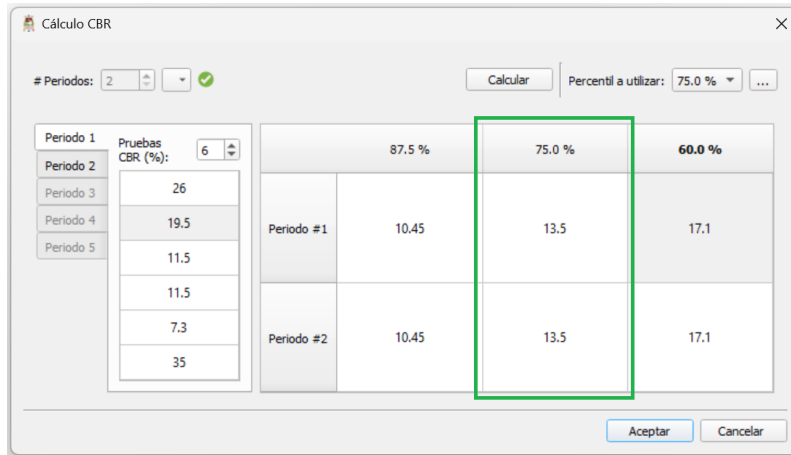


Figura 5.28: Resultado del CBR en el programa

El CBR calculado en el programa es el mismo que se obtiene en el estudio vial, luego de ello se calcula el módulo resiliente de la subrasante. Dentro del programa durante todos los meses se obtiene el mismo CBR, por lo cual el coeficiente de daño y el módulo resiliente son los mismos (ver figura 5.29).

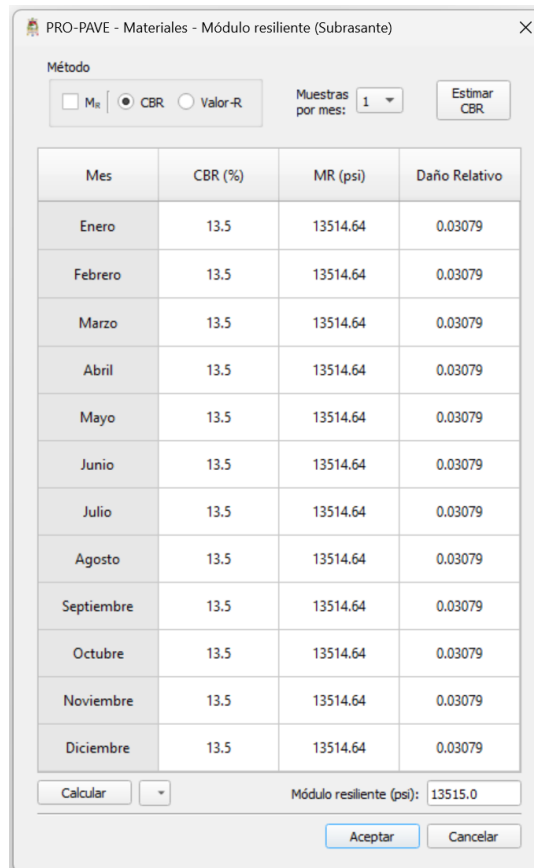


Figura 5.29: Resultado del M_R en el programa

En la figura 5.29 se observa que el módulo resiliente es de 13'515 psi, este valor presenta diferencia al del estudio vial que es de 16'287 psi. El motivo de esta variación es la fórmula empleada para calcular el M_R a partir del CBR. Para CBR entre 10 y 20% usan la siguiente expresión:

$$M_R = 3000(CBR)^{0.65} \tag{5.2}$$

Mientras que en el programa se han incluido las siguientes correlaciones presentadas en la figura 5.30:

Ecuación	Origen	Limitaciones
$M_R = 1500 * CBR(\%)$	Heukelom & Klomp (1962)	Para suelos finos no expansivos con un CBR sumergido de 10 % o menos.
$M_R = 1000 + (555) * (R - Value)$	1993 AASHTO Design Guide	Para suelos finos no expansivos con Valores-R de 20 o menos.
$M_R = 2555 * [CBR(\%)]^{0.64}$	2002 AASHTO Design Guide	Una conversión entre un rango de valores (10 % - 20 %).

Figura 5.30: Correlaciones empleadas en el programa

5.5 Diseño de la estructura del pavimento flexible

La metodología recomendada y que se aplica para el diseño de pavimentos, se basa en los criterios del método AASHTO 93; aquí se pone énfasis en el estudio de la composición del tráfico y el efecto de carga a la estructura del pavimento que actúa directamente sobre el pavimento. Además de la caracterización de los materiales de construcción y de los índices de servicio; así como del análisis de alternativas para seleccionar la estructura de pavimento más óptima en base a consideraciones técnicas y económicas.

5.5.1 Información de entrada

- **Confiabilidad:** tratándose de una carretera clase III (clasificación MOP-2003) ubicada en el sector rural, esta vía presenta bastante circulación vehicular, el nivel de confiabilidad recomendado tiene un valor que varía de 75 a 95%, en función del tipo de carretera se asume el valor de 95%.

- **Desviación estándar:** en pavimentos flexibles puede ser un valor entre 0.4 y 0.5. En este caso para construcción nueva se toma el valor de 0.45.
- **Serviciabilidad inicial P_o :** para pavimentos flexibles el valor inicial es de 4.2.
- **Serviciabilidad final P_t :** la vía tendrá una serviciabilidad final de 2.0.
- **Coeficientes de drenaje:** considerando que la calidad del drenaje es buena y que el porcentaje de tiempo de exposición de la estructura del pavimento se encuentra entre el 5 y el 25%, se toma como coeficientes de drenaje: para la capa de base 1.0 y para la subbase 0.9.
- **Corrección del tráfico:** se emplea una confiabilidad del 95% a diferencia del estudio vial de 90%, esto se debe a que el programa solo admite un valor de confiabilidad para trabajar.
- **Módulo Resiliente:** se toma en cuenta el valor calculado en el estudio vial.
- **Parámetros de los materiales:** ver tabla 5.19.

Tabla 5.19: Parámetros de las capas [5]

Material	CBR (%)	Módulo Elástico (psi)	MR (psi)	Coef. De Drenaje
Subrasante	13.5	-	16287	-
Subbase	30	-	15263	0.9
Base	80	-	27927	1
Carpeta Asfáltica		400 000		-

5.5.2 Ejecución del módulo de diseño de pavimento

En la ventana de diseño de pavimentos flexibles se ingresan los parámetros indicados anteriormente. Para la primera iteración se carga los ESAL calculados inicialmente y se aplica la corrección del tráfico con una confiabilidad del 95% y se calcula el número estructural requerido (ver figura 5.31).

Para el calculo se utiliza la opción "Establecer relación espesor entre capas" mostrada como "checkbox", que permite aplicar una combinación de espesores mínimos recomendados por la AASHTO y una relación entre capas de mínimo 1.5 veces la capa superior a la inferior. Esta opción se puede aplicar para determinar una combinación de espesores que representen una alternativa de diseño económica en cuanto al costos de la capa de rodadura con las capas base y subbase de ser el caso.

PRO-PAVE - Diseño de pavimento flexible

Archivo Más

Carril de Diseño: Bajo volumen - Pavimentada | Período de Diseño (Años): 20

Desviación estándar (S_d): 0.45 | Tráfico

Confiability (%): 95 | Corregir ESAL proyectado | Análisis de Tráfico

Índices de serviciabilidad

P_o Inicial: 4.2 | ESAL futuros: 1.0396E+06

P_f Final: 2 | ESAL corregidos: 1.256E+06

Hinchazón/ Congelamiento | Período de Desempeño (Años):

Establecer relación espesor entre capas | Número estructural (SN): 2.77 | Calcular

Figura 5.31: Cálculo del número estructural requerido

En la figura 5.31 se observa que en primera instancia el número estructural requerido es de 2.77, por lo tanto, se vuelven a calcular los ESAL con ese valor. Luego de varias iteraciones el número estructural para calcular los ESAL es el mismo que el requerido y el proceso concluye.

PRO-PAVE - Diseño de pavimento flexible

Archivo Más

Carril de Diseño: Bajo volumen - Pavimentada | Período de Diseño (Años): 20

Desviación estándar (S_d): 0.45 | Tráfico

Confiability (%): 95 | Corregir ESAL proyectado | Análisis de Tráfico

Índices de serviciabilidad

P_o Inicial: 4.2 | ESAL futuros: 1013400

P_f Final: 2 | ESAL corregidos: 1.225E+06

Hinchazón/ Congelamiento | Período de Desempeño (Años):

Establecer relación espesor entre capas | Número estructural (SN): 2.76 | Calcular

Figura 5.32: Número estructural requerido en el programa

En la figura 5.32 se tiene un número estructural requerido de 2.76 al igual que el calculado en el estudio vial (ver figura 5.33).

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$

SND 1 = 2.76

Figura 5.33: Número estructural requerido en el estudio vial

Los espesores calculados en el estudio vial se indican en la figura 5.34.

Capa	SN	Espesor (cm)
Carpeta Asfáltica	0.81	5
Base Clase 4	1.28	25
Subbase Clase 3	0.78	20
	2.87	

Figura 5.34: Espesores calculados en el estudio vial [5]

En la figura 5.34 se observa que el espesor de la carpeta asfáltica no cumple con el mínimo requerido según el tráfico que circula por la vía. El espesor debe ser mínimo de 3 pulgadas (7.5 cm). Sin embargo, por el tema de costos no se cumple con las recomendaciones de la AASHTO. Dentro del programa se han determinado en primera instancia los siguientes espesores (ver figura 5.35).

The screenshot shows the PRO-PAVE software interface for flexible pavement design. Key parameters include:

- Carri de Diseño:** Bajo volumen - Pavimentada
- Período de Diseño (Años):** 20
- Desviación estándar (S_o):** 0.45
- Confiability (%):** 95
- Índices de serviciabilidad:** P_i Inicial: 4.2, P_f Final: 2
- Tráfico:** Corregir ESAL proyectado. ESAL futuros: 1013400, ESAL corregidos: 1.225E+06.
- Número estructural (SN):** 2.76

The "Nuevos Espesores (plg)" section shows the following values:

Tipo de material	Coefficientes por capa a _i	Coefficientes de drenaje m _i	SN Inicial
M.A.C.	0.418	-	2.26
Base	0.134	1	2.84
Subbase	0.108	0.9	2.76

Calculated thicknesses (plg):

- M.A.C.: 3.0
- Base: 6.0
- Subbase: 7.5
- SN*: 2.79
- ESAL*: 1.311E+06

The interface also displays a cross-section diagram of the pavement layers: M.A.C., Base, Subbase, and Subrasante.

Figura 5.35: Espesores calculados con el programa

En la figura 5.35 se observa que el espesor mínimo es de 3 pulgadas (7.5 cm), el espesor de la base es de 6 pulgadas (15 cm) y la subbase de 7.5 pulgadas (18.75 cm). Tomando en cuenta el tema de costos, la subbase debe tener un espesor mayor a la base debido a que está última es más costosa.

La estructura del pavimento cumple con el número estructural requerido, $2.79 \geq 2.76$.

5.6 Diseño aplicando rehabilitación a los 10 años con una sobrecarpeta

Para diseñar el pavimento por etapas se considera la construcción para un período de diseño de 10 años, luego se prevé una rehabilitación para que el pavimento opere 10 años adicionales. Primeramente se calcula el número de ejes equivalentes para ese período, obteniéndose un total de 545'050 ESALs (ver figura 5.36).



Figura 5.36: Cálculo de ESAL para 10 años, primera iteración $SN = 2.0$

Los materiales y el resto de parámetros se mantienen como en el diseño para 20 años, en este caso, el número estructural requerido es 2.51 (ver figura 5.37).

PRO-PAVE - Diseño de pavimento flexible

Archivo Más

Carril de Diseño: Bajo volumen - Pavimentada | Período de Diseño (Años): 20

Desviación estándar (S_d): 0.45 | Tráfico

Confiability (%): 95 | Corregir ESAL proyectado | Análisis de Tráfico

Índices de serviciabilidad

P_s Inicial: 4.2 | ESAL futuros: 545050

P_s Final: 2 | ESAL corregidos: 6.587E+05

Hinchazón/ Congelamiento | Período de Desempeño (Años):

Establecer relación espesor entre capas | Número estructural (SN): 2.51 | Calcular

Figura 5.37: Número estructural requerido, primera iteración

Este valor se ingresa para determinar los ESALs hasta que exista convergencia en el número estructural. El diseño del pavimento es el que se presenta en la figura 5.38.

PRO-PAVE - Diseño de pavimento flexible

Archivo Más

Carril de Diseño: Bajo volumen - Pavimentada | Período de Diseño (Años): 20

Desviación estándar (S_d): 0.45 | Tráfico

Confiability (%): 95 | Corregir ESAL proyectado | Análisis de Tráfico

Índices de serviciabilidad

P_s Inicial: 4.2 | ESAL futuros: 467310

P_s Final: 2 | ESAL corregidos: 5.647E+05

Hinchazón/ Congelamiento | Período de Desempeño (Años):

Establecer relación espesor entre capas | Número estructural (SN): 2.45 | Calcular

Nuevos Espesores (plg)

Tipo de material	Coefficientes por capa a_i	Coefficientes de drenaje m_i	SN Inicial
M.A.C.	0.418	-	1.99
Base	0.134	1	2.52
Subbase	0.108	0.9	2.45

Nuevos espesores (plg)

M.A.C.: 3.0

Base: 6.0

Subbase: 4.5

SN*: 2.5

ESAL*: 6.460E+05

Diseño inicial | Diseño de sobrecarpeta

Figura 5.38: Diseño de la estructura de pavimento para 10 años

Debido a que la carpeta asfáltica debe cumplir con los espesores mínimos, la base y subbase son las que disminuyen su espesor con respecto al diseño para 20 años. A partir de este diseño se determina una sobrecarpeta que se construirá a los 10 años y se pretende que a partir de la rehabilitación la vía preste servicio durante otros 10 años. La sobrecarpeta se calcula mediante el método de vida remanente que depende principalmente del tráfico, esto puede ser útil para conocer aproximadamente el valor económico de la reconstrucción.

El método de vida remanente solicita datos de la estructura inicial, el tráfico que se espera hasta finalizar los 10 años de vida útil, la serviciabilidad inicial, módulo resiliente, desviación estándar y la confiabilidad del 50% que se adopta para sobrecarpetas según la teoría (ver figura 5.39).

Vida Remanente

Componentes iniciales del pavimento		Tráfico	
P_o Inicial:	4.2	N_p (ESAL):	5.647E+05
S_o :	0.45	$N_{1.5}$ (ESAL):	3.40E+06
M_R (psi):	16287	RL (%):	83.41
Confiabilidad (%):	50	CF:	0.971
<input checked="" type="checkbox"/> Otros datos	SN_o Inicial:	SN_{eff} (plg):	2.38
	2.45		
		Calcular	

Figura 5.39: Parámetros para diseñar la sobrecarpeta

Para obtener el espesor de la sobrecarpeta se debe calcular el tráfico que circulará por la vía desde la rehabilitación, para ello se utiliza el módulo de tráfico para determinar el tráfico a partir del año 2028. Luego de varias iteraciones, el ESAL determinado es 525'490 repeticiones.

Para el módulo resiliente se toma un valor del 65% del módulo resiliente inicial debido al deterioro del material de soporte, sin embargo, se deben realizar ensayos antes de la rehabilitación para determinar el módulo resiliente actual de la subrasante para el diseño de la sobrecarpeta.

El número estructural efectivo es de 2.38 y el número estructural requerido para soportar el nuevo tráfico es 2.79, a partir de estos datos se determina un espesor de 1 pulgada (2.5 cm) para la sobrecarpeta, ver figura 5.40.

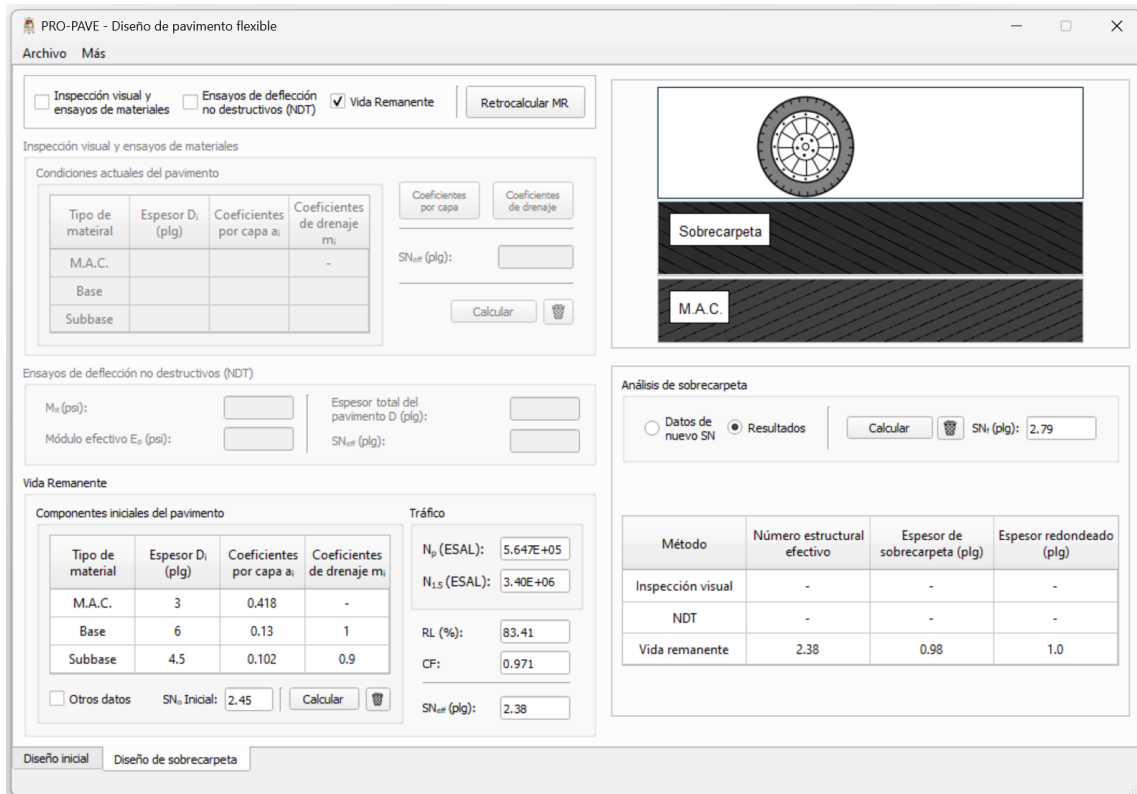


Figura 5.40: Espesor de la sobrecarpeta

Para decidir la mejor alternativa se debe realizar un análisis económico y constructivo, en base a ello se decide por construir una estructura que dure 20 años, o realizar una construcción por partes aplicando una rehabilitación a los 10 años.

5.7 Análisis estructural del pavimento flexible

El análisis estructural se lo realiza para el pavimento planteado en el estudio vial con el propósito de comparar resultados entre el estudio vial, KENPAVE y programa desarrollado.

Se ejecuta un análisis de daño (por fatiga, ahuellamiento y deflexión superficial) con un modelo lineal para un sistema de 4 capas: carpeta asfáltica, base, subbase y subrasante (ver figura 5.41).

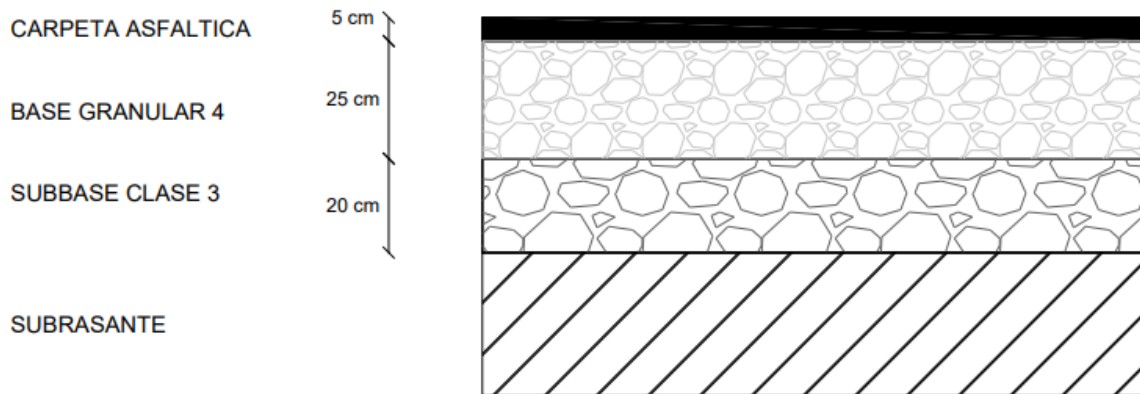


Figura 5.41: Estructura del pavimento [5]

El análisis se realiza considerando el eje equivalente de 18000 lb con una presión de contacto de 685 KPa, un radio del neumático de 9.65 cm y una separación entre neumáticos de 33 cm, ver figura 5.42.

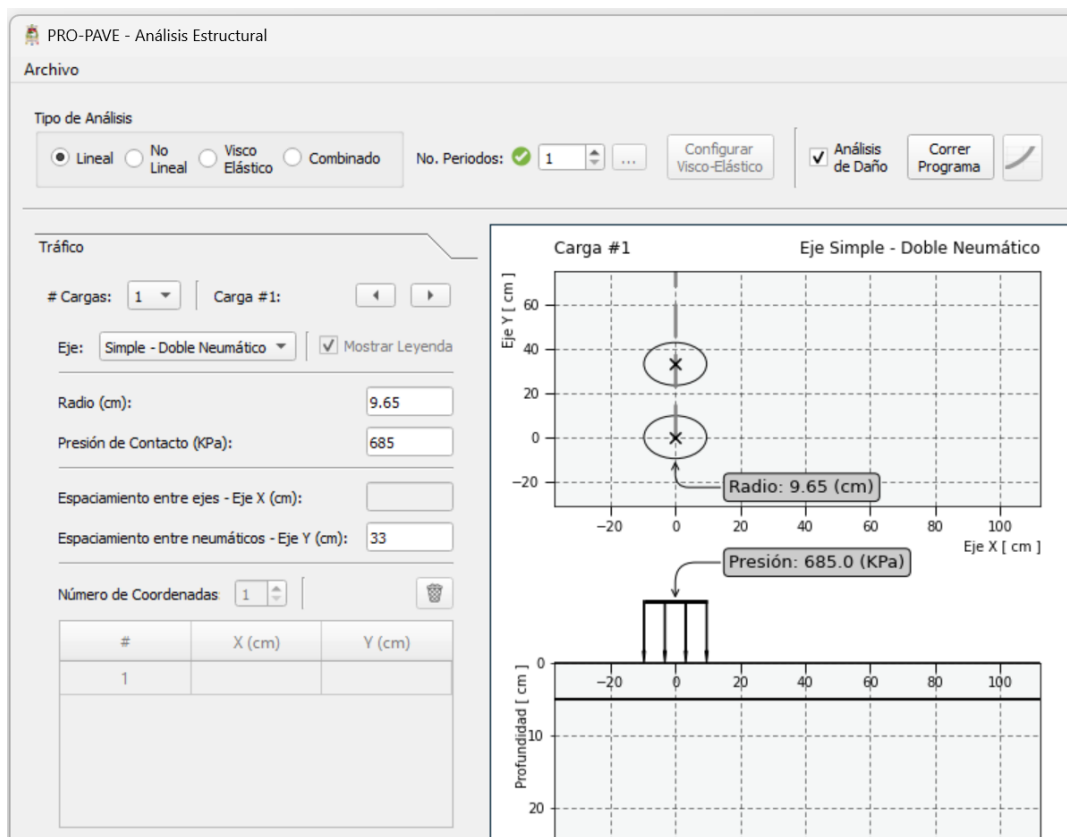


Figura 5.42: Datos de la carga

Los parámetros de cada capa se muestran en la figura 5.43.

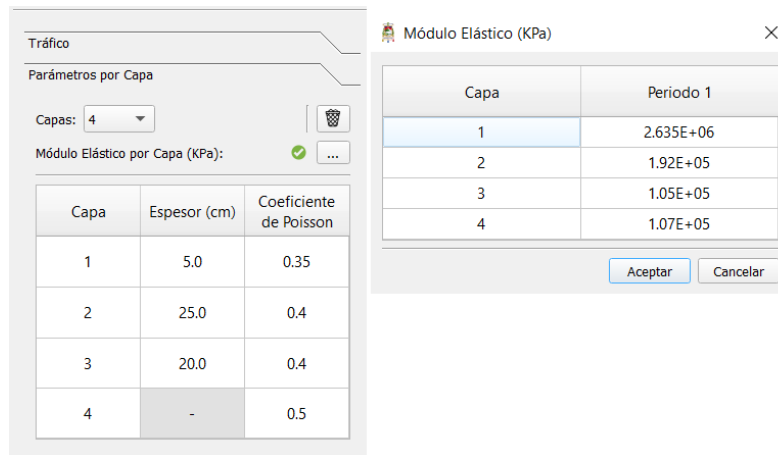


Figura 5.43: Parámetros de las capas

Cuando se realiza el análisis de daño, el programa automáticamente ubica las coordenadas donde se determinan los esfuerzos, deformaciones y deflexiones según el tipo de carga, en este caso al ser un eje simple se ejecuta en el centro y borde del neumático, además en la mitad del eje estándar. Las profundidades de análisis son la superficie de rodadura, parte inferior de la carpeta asfáltica y parte superior de la subrasante (ver figura 5.44).

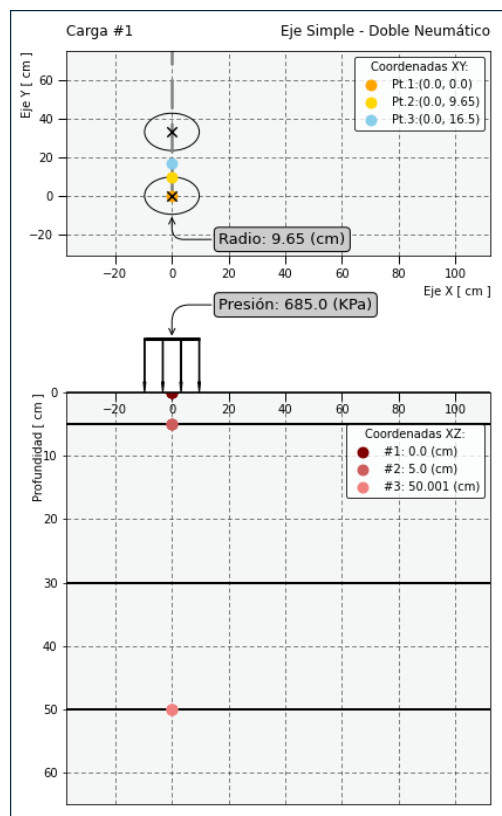


Figura 5.44: Puntos de análisis de daño

El resumen de resultados del programa se muestra en la figura 5.45.

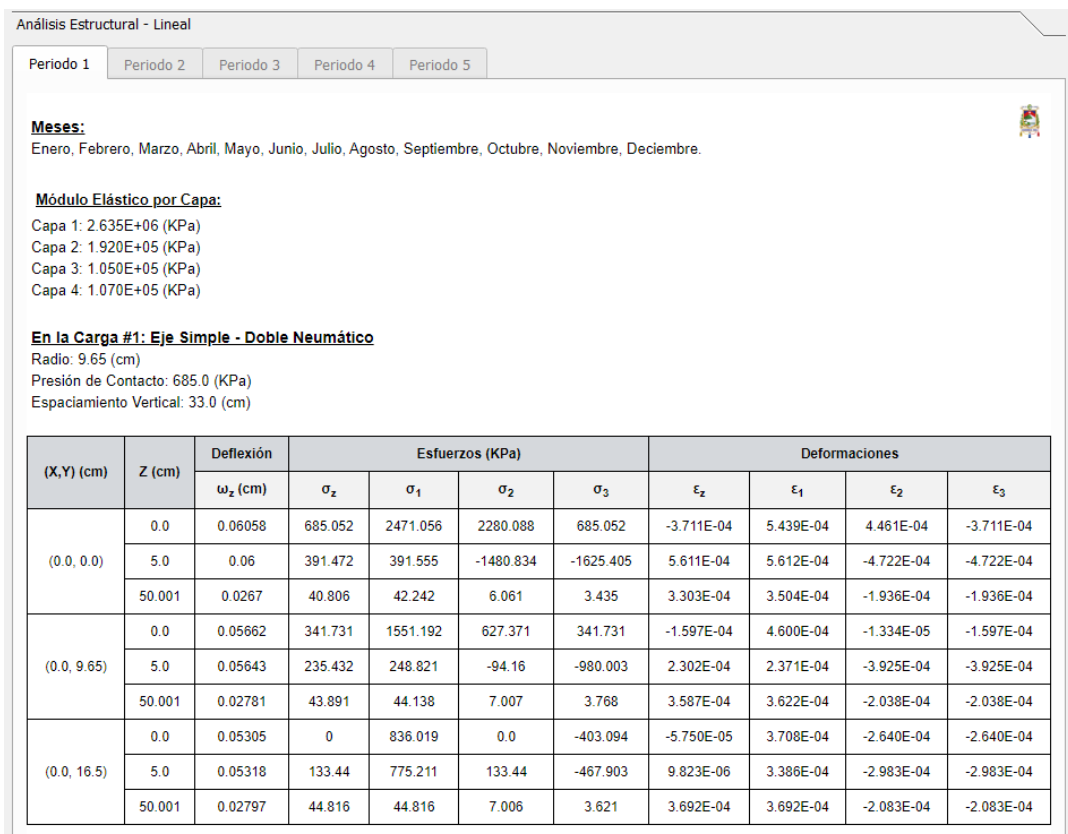


Figura 5.45: Resumen de resultados para el análisis de daño

Los resultados del análisis de daño por fatiga, ahuellamiento y deflexión se indican a continuación. Se observa que el pavimento falla por fatiga debido a que la relación de daño es 52.59 (ver figura 5.46), esto significa que el pavimento soporta 52.59 veces menos la cantidad de tráfico que circulará por la vía. Este problema se debe a que no se está considerando el espesor mínimo de la carpeta asfáltica en el estudio, por lo tanto, el pavimento no tendrá la vida útil esperada y obligatoriamente se tendrá que hacer rehabilitaciones antes de lo previsto. Además, el incremento de espesores implica una inversión económica mayor.

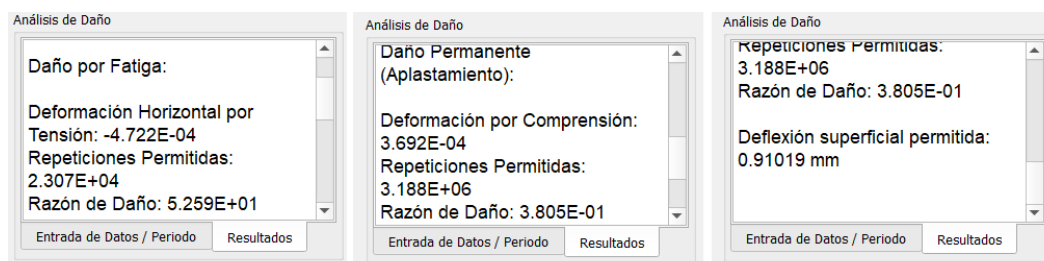


Figura 5.46: Criterios de falla

En la tabla 5.20 se realiza la comparación del estudio vial, KENPAVE y programa desarrollado en base a los valores calculados para cada criterio de falla.

Tabla 5.20: Comparación de criterios de falla

Criterio de Falla	Valor Admisible	Estudio Vial	KENPAVE	Programa	Condición
Fatiga	2.33E-04	-4.740E-04	-4.721E-04	-4.720E-04	No cumple
Ahuellamiento	5.41E-04	3.701E-04	3.689E-04	3.692E-04	Cumple
Deflexión (cm)	9.100E-01	5.270E-02	5.679E-02	5.305E-02	Cumple

En el programa se puede visualizar gráficamente el esfuerzo vertical, deformación vertical y deflexión, ver figuras 5.47 y 5.48. En esta última se puede evidenciar que para los gráficos de deflexión en todos los puntos de análisis la deflexión máxima es menor a la admisible.

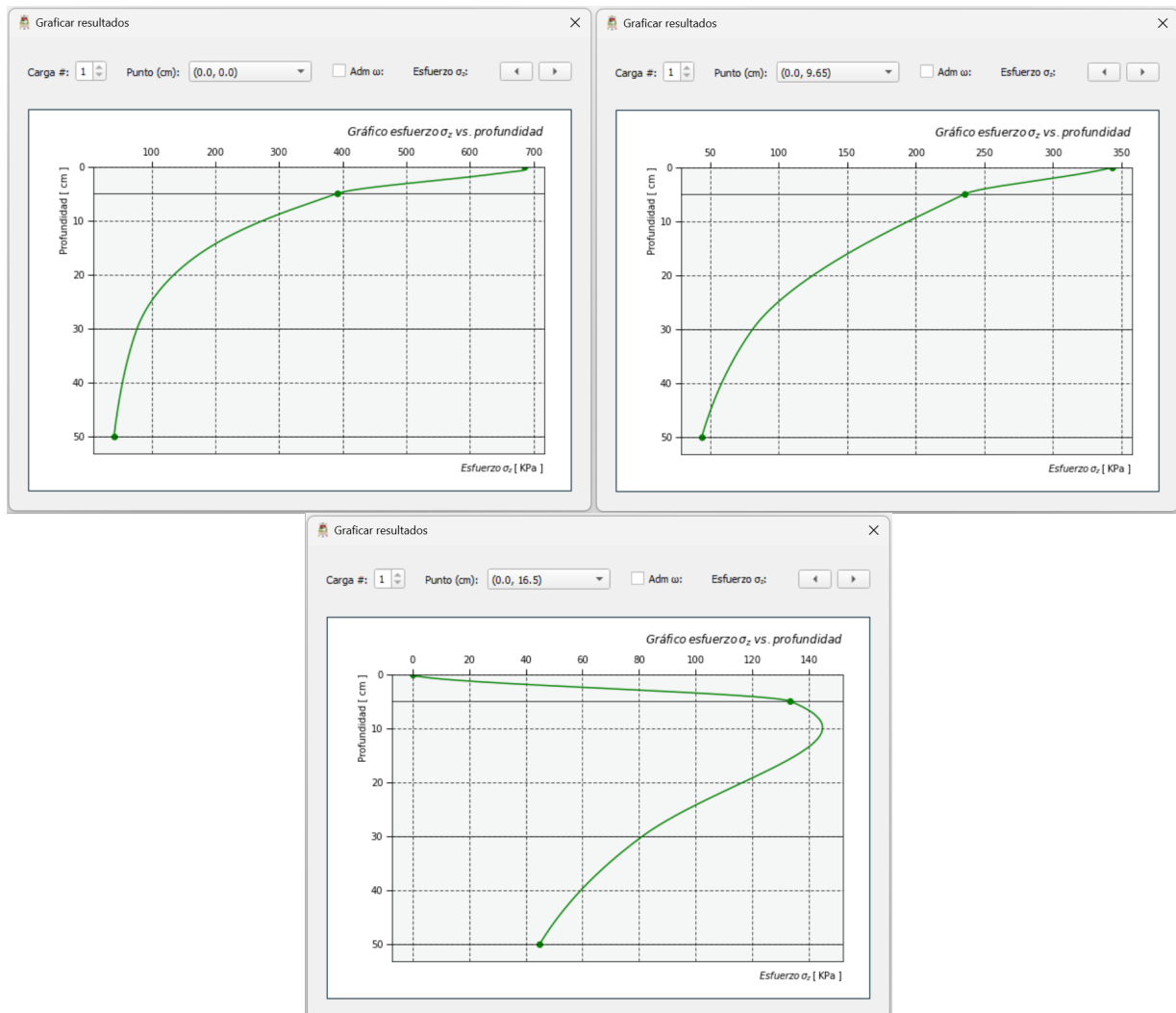


Figura 5.47: Gráficas de esfuerzo vertical vs. profundidad

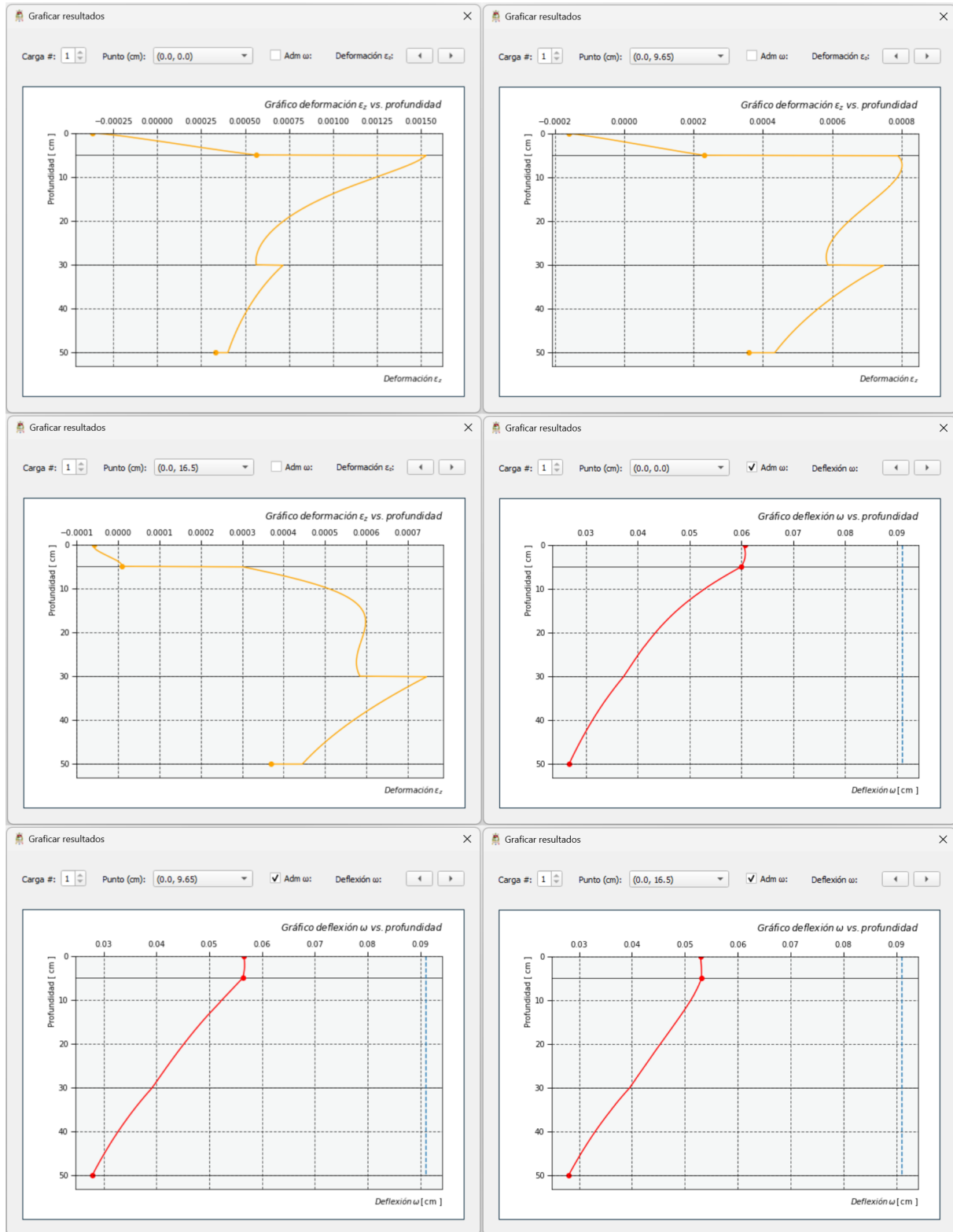


Figura 5.48: Gráficas de deformación y deflexión vertical vs. profundidad

En el anexo C se indican los resultados obtenidos del análisis de daño considerando la carga del eje equivalente en el programa KENPAVE. Además, en el anexo D se muestra el proceso y los resultados obtenidos en el programa (PRO-PAVE), según el número de repeticiones de los diferentes vehículos, para ejecutar el análisis de daño.

5.8 Observaciones adicionales del programa

Como recomendaciones se debe tener los conocimientos necesarios por parte del diseñador para poder trabajar con los datos y analizar los resultados en el programa PRO-PAVE. Los datos ingresados al programa deben ser precisos para que los resultados sean adecuados.

Dentro del módulo de análisis de tráfico, en la parte superior de la ventana principal se deben ingresar y guardar los datos antes de seguir trabajando con el resto de parámetros. En la esquina superior derecha se presentan algunas formas para determinar las tasas de crecimiento. Las tasas de crecimiento determinadas en el programa no son asignadas de manera automática a cada tipo de vehículo, aquí el usuario debe ingresar manualmente estas tasas que se muestran como resumen en la ventana principal. En el ingreso de vehículos, el usuario tiene la opción de guardar el listado de camiones para hacer uso en simulaciones futuras, las cuales son almacenadas dentro de la carpeta del programa. Esto difiere de la opción guardar, que está enfocada en recolectar toda la información de factores, año de diseño, período de diseño, TPDA actual, entre otros.

En el análisis granulométrico del módulo 2, el usuario puede ingresar tamices y pesos retenidos celda por celda, pegando información almacenada previamente en el clipboard de la computadora, o por archivo .csv. En el caso de pegar la tabla, se debe realizar a partir de la segunda columna, debido a que la primera es determinada automáticamente por el programa. El número máximo de columnas permitido es dos, y el número de filas es automáticamente ajustado según el tamaño de la información a pegar. Las tablas de ingreso de datos para el análisis de la parte gruesa y fina realiza el mismo proceso. El peso total debe ser siempre la suma de los pesos retenidos, aquí el usuario debe ingresar los pesos retenidos corregidos para realizar el análisis.

En la combinación de áridos, el ingreso de datos por tabla funciona de manera similar al análisis granulométrico, en este caso, al trabajar con los porcentajes pasantes se debe seguir un orden en cuanto a las columnas, debido a que cada columna será utilizada para un cálculo específico.

En el método de Marshall, dentro de la ventana de configuración se presentan los valores de VTM y VFA para calcular el contenido de asfalto óptimo para la mezcla asfáltica, estos valores predeterminados (valores promedio) pueden ser configurados en caso de no obtener un resultado favorable.

En la interfaz del módulo resiliente, el cálculo admite valores de CBR de hasta 20%, en caso de tener un valor superior, el programa mostrará un mensaje que el cálculo no se ha realizado debido a esta condición. Por lo general no se esperan valores superiores al 20% para suelos de subrasante.

El diseño de sobrecarpetas con mezcla asfáltica para el pavimento flexible está orientado únicamente para el diseño de una primera sobrecarpeta por encima de la estructura antigua, en caso de diseñar sobrecarpetas adicionales, debe optarse por otras metodologías.

En el análisis estructural del pavimento, al intercambiar entre los tipos de análisis, el usuario debe reingresar siempre los valores de entrada para las capas, períodos y configurar las capas viscoelásticas (en caso no-lineal y combinado), por lo que se recomienda estar seguro del análisis a realizar y después proceder a la entrada de datos. La configuración del tráfico ingresada no es afectada por el tipo de análisis. En el análisis combinado, el usuario debe configurar las capas viscoelásticas antes de proceder al análisis no-lineal, debido a que al declarar las capas que son viscoelásticas, estas no estarán disponibles para la entrada de datos con características no-lineales. Los valores de tolerancia predeterminados en el análisis, representan un buen balance para la convergencia de las distintas respuestas a calcular en el sistema de capas propuesto, y, la configuración de estos valores, debe de hacerse con criterio para obtener resultados más precisos.

Capítulo 6

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Se puede indicar que, el programa resultó ser una herramienta completa que considera varios de los parámetros necesarios para el diseño de pavimentos utilizando el tráfico, materiales, diseño, rehabilitación y comportamiento estructural. Además, presenta la información necesaria en cuanto a formulación, tablas y metodología que indica la guía de diseño AASHTO 93.

La ejecución del análisis lineal, no-lineal, viscoelástico y combinado fueron implementados adecuadamente para analizar el comportamiento estructural del pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones), debido a las cargas del tráfico. En el análisis de daño, los criterios de falla implementados por fatiga, ahuellamiento y deflexión superficial sirven como indicadores de desempeño para el pavimento analizado.

La explicación del proceso y funcionamiento de las interfaces que contiene el programa, sirven como un manual para facilitar el aprendizaje de los diseñadores y promover el uso correcto de la interfaz gráfica.

El programa cuenta con la opción de diseñar sobrecarpetas, que resulta útil para plantear diversas alternativas de diseño en función del análisis técnico-económico. Por medio del método de vida remanente se puede conocer aproximadamente el espesor de la sobrecarpeta que se deberá construir luego de un período de años, esto permite tomar en cuenta los costos a futuro por mantenimiento de la vía.

El programa desarrollado (PRO-PAVE) presenta la opción de trabajar por períodos, esto es importante tenerlo en cuenta, debido a que los materiales presentan comportamientos diferentes durante los meses del año, como consecuencia principalmente de la temperatura y el agua, como es el caso del CBR de la subrasante. En la actualidad, usualmente no se realiza un análisis por períodos en el Ecuador por el tema de costos.

Con el estudio se verifica que, si el programa no cuenta con algún proceso específico, dentro del mismo se pueden tomar alternativas para llegar al objetivo final, que es la construcción de una estructura que cumpla con los requerimientos necesarios.

Comparando los resultados obtenidos del estudio vial con los calculados en el programa, se pudo notar que en el estudio existen complicaciones por parte de los diseñadores, debido a que trabajan con demasiadas hojas y tablas de Excel. A diferencia del programa, este proporciona mensajes que indican que se está cometiendo algún error, también permite trabajar con información depurada y reduce el tiempo de ejecución del diseño.

Se puede indicar que la interfaz gráfica para el diseño y análisis del desempeño de pavimentos flexibles funciona según lo esperado, esto se comprobó mediante la validación del programa con un estudio vial a partir de datos reales que fueron tomados en campo, donde el programa proporciona resultados similares a los calculados manualmente en el estudio vial.

Los resultados obtenidos mediante el programa se validaron correctamente con los proporcionados en el software KENPAVE. La ventaja del programa desarrollado en el presente trabajo sobre el programa KENPAVE, es la facilidad para trabajar y estudiar el comportamiento de la estructura. El programa creado muestra con antelación la ubicación de las coordenadas y profundidades de análisis, mientras que en el KENPAVE indica al final, la ubicación de estos puntos, y si se comete alguna equivocación se tiene que volver a ejecutar. Además, el módulo de análisis estructural presenta gráficamente los resultados esfuerzos, deformaciones y deflexiones en todos los puntos analizados, y verifica que la estructura cumpla con la deflexión admisible según el Instituto del Asfalto.

6.2 Recomendaciones

La implementación de programas computacionales agiliza y mejora los procesos de diseño en los pavimentos, por ello, a futuro se puede considerar el desarrollo de una interfaz gráfica para el diseño y análisis estructural de pavimentos rígidos, que sirva como complemento para el programa desarrollado (PRO-PAVE).

En la actualidad, es importante considerar el uso de nuevas teorías para el diseño de los pavimentos. La guía mecanicista empírica de diseño de pavimentos (MEPDG), es una de las metodologías más completas para realizar el diseño y evaluación de estructuras de pavimento, el proceso se basa en principios mecánicos-empíricos para calcular la respuesta estructural del pavimento frente a distintas variables, como: el clima, materiales y tráfico. Esta guía trabaja con otros indicadores como el IRI (International Roughness Index), agrietamiento térmico y deformación permanente en todas las capas que conforman el paquete estructural. El desarrollo de un programa que incluya esta metodología sería de gran interés.

Para decidir la alternativa de diseño a construir, se requiere analizar el factor económico, por ello, se recomienda implementar el análisis de costos dentro del programa.

Referencias

- [1] AASHTO. *AASHTO guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- [2] BITAFAL. Conceptos básicos sobre pavimentos flexibles. <https://bitafal.com.uy/conceptos-basicos-sobre-pavimentos-flexibles/>, 2020. [Online; accessed 24-August-2023].
- [3] ASTM D1883. Standard test method for california bearing ratio (cbr) of laboratory-compacted soils. *U.S. Department of Defense*, 2016.
- [4] Braja M. Das. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Cuarta edición*. Cengage Learning, 2013.
- [5] Gobierno Provincial de Loja. *ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA EL MEJORAMIENTO A NIVEL DE CARPETA ASFÁLTICA DE LA VÍA VILLONACOCERA-TAQUIL*. Gobierno Provincial de Loja, 2018.
- [6] Luis Espinoza. Análisis de alternativas en el diseño de pavimentos flexibles y rígidos por el método aashto 93, 2018.
- [7] Alfonso Montejó Fonseca. *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Santafé de Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 1998.
- [8] Martha Herrera. *Determinación del módulo resiliente de diseño de pavimentos mediante criterios ASSHTO 1993 y 2002*. Tesis de Master en Ingeniería Civil con Mención en Ingeniería Vial. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Lima, Perú., 2014.
- [9] Yang H. Huang. *Pavement analysis and design, 2nd ed*. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [10] Asphalt Institute. *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix types Manual Series No.2 (MS-2)*. Lexington, KY United States, 1996.
- [11] Rogers Martin and Hugh Wallace. *Design and Construction of Asphalt Pavements*. Casa McGraw-Hill Book Company, Inc. Nueva York, Toronto y Londres, 1962.
- [12] MOP. *Normas de diseño geométrico de carreteras*. Ministerio de Obras Públicas, 2003.
- [13] MTOP. *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes Volumen 3*. 2012.

- [14] MTOP. *Normas de aplicación para el Control de Pesos y Dimensiones a los vehículos de carga pesada que circulan en la Red Vial del país*. Ministerio de Transporte y Obras Publicas, 2016.
- [15] Marlex Méndez and Edwin Alvarenga. Algunas consideraciones sobre el parámetro confiabilidad (r) utilizado en el diseño de pavimentos según aashto 1993. *Unidad de investigación y Desarrollo Vial, El Salvador*, 2006.
- [16] OpenAI. GPT-3.5: Language Models for Everyone. <https://openai.com/gpt-3>, 2020.

Anexos A

A. Conteo vehicular

A continuación se presentan los conteos vehiculares realizados para el estudio vial ejecutado por el Gobierno Provincial de Loja denominado "Estudios y Diseños para el Mejoramiento a Nivel de Carpeta Asfáltica de la Vía Villonaco - Cera - Taquil".

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	05/05/2018								
SENTIDO:	Villonaco - Taquil								
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUENO	2DA DINAS CAMION MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMION GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMION 4 EJES	+3S2 TRACTO CAMION 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
VIDEOS									
00-01	3								
01-02	0								
02-03	1								
03-04	1		1						
04-05	3								
05-06	4			1					
06-07	5		2	1		2			
07-08	8	1	3	1	1				
08-09	7				2				
09-10	17			1					
10-11	13			1	2				
11-12	9		4	1	2				
12-13	7			1					
13-14	15			1	1				
14-15	11			1	2				
15-16	9		1	1					
16-17	5			1	2				
17-18	6	2		1	1				
18-19	7	2	3	1	1				
19-20	7	1	1	1					
20-21	8	1							
21-22	6								
22-23	4				1				
23-24	3								
TOTAL	159	7	15	14	15	2	0	0	212

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	05/05/2018								
SENTIDO:	Taquil - Villonaco								
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUENO	2DA DINAS CAMION MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMION GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMION 4 EJES	+3S2 TRACTO CAMION 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
VIDEOS									
00-01	3								
01-02	1								
02-03	1				1				
03-04	1								
04-05	2		1						
05-06	4			1	2				
06-07	2		2	2					
07-08	6		3	2					
08-09	6			1					
09-10	2		2	1	1				
10-11	5			1	2				
11-12	8		3	1		2			
12-13	2	1		1	1				
13-14	7			1					
14-15	7			1					
15-16	15			1					
16-17	9			1	1				
17-18	22	1		2					
18-19	10			1					
19-20	4			1					
20-21	9		1		1				
21-22	9	2	2		2				
22-23	6								
23-24	1								
TOTAL	142	4	15	18	11	2	0	0	192

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	04/05/2018								
SENTIDO:	Villonaco - Taquil								
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUENO	2DA DINAS CAMION MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMION GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMION 4 EJES	+352 TRACTO CAMION 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
VIDEOS									
00-01	1								
01-02	2								
02-03									
03-04			1						
04-05	1								
05-06	5	1	2	1	1				
06-07	13	1				1			
07-08	6		1	1					
08-09	8		2	1	2				
09-10	5			2	1				
10-11	5			1					
11-12	9	1	1		1				
12-13	2			1	2				
13-14	4	1		1	2				
14-15	3	1	1	1					
15-16	7		1	1	1				
16-17	10			1					
17-18	9		1		1				
18-19	10	1		1	1				
19-20	8		1	2	1				
20-21	5		1		1				
21-22	5		1						
22-23	4	1	1						
23-24									
TOTAL	122	7	14	17	14	1	0	0	175

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	04/05/2018								
SENTIDO:	Taquil - Villonaco								
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUENO	2DA DINAS CAMION MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMION GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMION 4 EJES	+352 TRACTO CAMION 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
VIDEOS									
00-01	1								
01-02	1								
02-03	2				1				
03-04	4	2	2						
04-05	1		1						
05-06	0			2	1				
06-07	2	1		1	1				
07-08	5		3	1	3				
08-09	1		2	1	2				
09-10	4			1	1				
10-11	4	1		1					
11-12	0		1		1				
12-13	4	1	1	1		1			
13-14	16	1		1					
14-15	7		2	1	3				
15-16	9	2	1	2	1				
16-17	10	1		1	2				
17-18	11			1	1				
18-19	11			1	2				
19-20	7	2		2	1				
20-21	1		1						
21-22	0		3						
22-23	4				3				
23-24	2								
TOTAL	107	10	17	18	23	1	0	0	176

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	03/05/2018								
SENTIDO:	Villonaco - Taquil								
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUEÑO	2DA DINAS CAMIÓN MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMIÓN GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMIÓN 4 EJES	+3S2 TRACTO CAMIÓN 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
VIDEOS									
00-01	0								
01-02	0								
02-03	0								
03-04	0		1						
04-05	1								
05-06	3			1					
06-07	9	1		1		1			
07-08	8		3	1	4				
08-09	9	1							
09-10	0			2	1				
10-11	3	2	1	1	1				
11-12	3	1		1					
12-13	3	1		1					
13-14	4			1					
14-15	3		1	1					
15-16	4		1	1					
16-17	7		1	1	1				
17-18	3			1					
18-19	0		2	1					
19-20	5		1	1	1				
20-21	4		2						
21-22	2								
22-23	0		2						
23-24									
TOTAL	71	6	15	15	8	1	0	0	116

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	03/05/2018								
SENTIDO:	Taquil - Villonaco								
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUEÑO	2DA DINAS CAMIÓN MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMIÓN GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMIÓN 4 EJES	+3S2 TRACTO CAMIÓN 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
VIDEOS									
00-01	0		1						
01-02	1		2						
02-03	1								
03-04	0		1						
04-05	1		1						
05-06	2		1	1					
06-07	1			1					
07-08	5		3	2	1				
08-09	0				1				
09-10	4		1	1	1				
10-11	2		2	1					
11-12	2			1	1				
12-13	1			1					
13-14	10	3	1	1	1	1			
14-15	7	1		1	1				
15-16	5			1					
16-17	6			1					
17-18	5		1	1					
18-19	2								
19-20	8		4	2	1				
20-21	2		1						
21-22	2		1		1				
22-23	0								
23-24	3		1		1				
TOTAL	70	4	21	15	9	1	0	0	120

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:		02/05/2018							
SENTIDO:		Villonaco - Taquile							
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUEÑO	2DA DINAS CAMION MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMION GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMION 4 EJES	+52 TRACTO CAMION 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
VIDEOS									
00-01	2				1				
01-02	0								
02-03	0								
03-04	2		1						
04-05	5			1	1				
05-06	8		1	1	1				
06-07	11	4	1	1	2				
07-08	12		2	1					
08-09	6			1					
09-10	8	1	5	1					
10-11	7		2	1	1	1			
11-12	6		2	1	2				
12-13	4		1	1					
13-14	1		1	1					
14-15	8		3	2	1				
15-16	6			1	1				
16-17	7			2	1				
17-18	1	2	2	1					
18-19	2		4	1	1				
19-20	3		3	2					
20-21	1		2						
21-22	3								
22-23	1								
23-24									
TOTAL	104	7	30	19	10	1	0	0	171

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:		02/05/2018							
SENTIDO:		Taquile - Villonaco							
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUEÑO	2DA DINAS CAMION MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMION GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMION 4 EJES	+52 TRACTO CAMION 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
VIDEOS									
00-01	1								
01-02	0								
02-03	0		1						
03-04	0		1						
04-05	0				1				
05-06	1			2	1				
06-07	3	1		1					
07-08	2		3	1					
08-09	2		2	1	1				
09-10	5	1		1					
10-11	7		3	1					
11-12	1	1	3	1	4				
12-13	8			1	1				
13-14	14	1		1	3	1			
14-15	6		3	1	2				
15-16	6	1	2	2					
16-17	13		2	1	2				
17-18	10	2		1	1				
18-19	9		2	1					
19-20	4			1	1				
20-21	3		3				1		
21-22	3		2						
22-23	1				1				
23-24	2		1						
TOTAL	101	6	28	17	17	1	1	0	171

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	01/05/2018								
SENTIDO:	Villonaco - Taquill								
HORA	AUTOS	2D	2DA	2DB	2DB	3A	4C	+532	TOTAL
	CAMIONESTAS	BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUENO	DINAS CAMION MEDIANO	BUSETAS BUS GRANDES	CAMION GRANDE VOLQUETAS	CAMION 3 EJES	CAMION 4 EJES	TRACTO CAMION 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	
VIDEOS									
00-01	0								
01-02	0								
02-03	0								
03-04	0		1						
04-05	0								
05-06	3		1	1					
06-07	3			1					
07-08	3		1	1					
08-09	4				2				
09-10	7		1	1					
10-11	10		3		1				
11-12	7	1	1	1	1				
12-13	6		1	1	1				
13-14	4								
14-15	6				1				
15-16	4		1	1					
16-17	2		3	1	1				
17-18	3		2	1	1				
18-19	7			1	1				
19-20	0		2						
20-21	1	1			1				
21-22	4			1					
22-23	1								
23-24	0								
TOTAL	75	2	17	11	10	0	0	0	115

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	01/05/2018								
SENTIDO:	Taquill - Villonaco								
HORA	AUTOS	2D	2DA	2DB	2DB	3A	4C	+532	TOTAL
	CAMIONESTAS	BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUENO	DINAS 2	BUSETAS BUS GRANDES	CAMION GRANDE VOLQUETAS	CAMION 3 EJES	CAMION 4 EJES	TRACTO CAMION 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	
VIDEOS									
00-01	0								
01-02	0								
02-03	0								
03-04	0								
04-05	1		1						
05-06	2			1					
06-07	2		3	1	1				
07-08	1		1	1	1				
08-09	5			1					
09-10	5			1					
10-11	6		1	1	2				
11-12	6			2	2				
12-13	4			1					
13-14	1		2	1	1				
14-15	10				1				
15-16	7								
16-17	8		1	1	1				
17-18	7	1		1					
18-19	13		2		1				
19-20	2				1				
20-21	7		1	1					
21-22	0								
22-23	1	1							
23-24	2								
TOTAL	90	2	13	13	11	0	0	0	129

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	30/04/2018								
SENTIDO:	Villonaco - Taquill								
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUEÑO	2DA DINAS CAMIÓN MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMIÓN GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMIÓN 4 EJES	+352 TRACTO CAMIÓN 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
00-01	1								
01-02									
02-03									
03-04									
04-05									
05-06	3		2	1					
06-07	4		1						
07-08	9		1	1	1				
08-09	5	1	3						
09-10	2		1	1	1				
10-11	7		2	1					
11-12	3								
12-13	11		1	2	2				
13-14	6		2	1					
14-15	13		3						
15-16	4		3	1					
16-17	5		1						
17-18	3		2	1					
18-19	5		4	1					
19-20	4	1	1	1					
20-21	5								
21-22	2		3						
22-23	2								
23-24	1		1						
TOTAL	95	2	31	11	4	0	0	0	143

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	30/04/2018								
SENTIDO:	Taquill - Villonaco								
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUEÑO	2DA DINAS CAMIÓN MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMIÓN GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMIÓN 4 EJES	+352 TRACTO CAMIÓN 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
00-01									
01-02									
02-03									
03-04	1								
04-05			1						
05-06	1		2	1					
06-07	3		1	1					
07-08	3		2	2					
08-09	8		2	1					
09-10	6		1	1		1			
10-11	5		1	1					
11-12	2		1			1			
12-13	3		1	1					
13-14	4								
14-15	10	1	2	1					
15-16	7								
16-17	11		3	1	1				
17-18	16								
18-19	12		2						
19-20	15		3	1					
20-21	6		3						
21-22	8		3						
22-23	5		1						
23-24	1								
TOTAL	127	1	28	10	1	3	0	0	170

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	29/04/2018								
SENTIDO:	Villonaco - Taquill								
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUEÑO	2DA DINAS CAMIÓN MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMIÓN GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMIÓN 4 EJES	+352 TRACTO CAMIÓN 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
00-01	1		2						
01-02									
02-03	1		1						
03-04	2								
04-05		1							
05-06	3								
06-07	27			1					
07-08	23			2					
08-09	34		2	1					
09-10	37	1	4	2					
10-11	47	1	5	1					
11-12	47	1	1						
12-13	43		5	3		1			
13-14	24	2	1	1					
14-15	16		2	1					
15-16	6		1	2					
16-17	10		1	1					
17-18	1	1	1	1					
18-19	3		1	2					
19-20	5		1		1				
20-21	3	1	1						
21-22	1								
22-23	2			1					
23-24									
TOTAL	336	8	28	19	1	1	0	0	393

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	29/04/2018								
	Taquil - Villonaco								
HORA	AUTOS	2D	2DA	2DB	2DB	3A	4C	+S32	TOTAL
	CAMIONESTAS	BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUEÑO	DINAS	BUSETAS BUS GRANDES	CAMIÓN GRANDE VOLQUETAS	CAMION 3 EJES	CAMIÓN 4 EJES	TRACTO CAMIÓN 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	
00-01	19	1	4						
01-02	8		3						
02-03	16		1						
03-04	18		3	1					
04-05	5	1	6						
05-06	4			3					
06-07	4		1	2					
07-08	7			1					
08-09	5			1					
09-10	7			1					
10-11	8		5	1					
11-12	10			1	1				
12-13	14		1	1					
13-14	9								
14-15	26		1						
15-16	23		2	1					
16-17	32	1	2	2					
17-18	36	4	8	3					
18-19	34		3	2					
19-20	30		4	2					
20-21	25	1	7	2					
21-22	14			1					
22-23	5		1						
23-24									
TOTAL	366	8	52	25	1	1	0	0	453

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	28/04/2018								
SENTIDO:	Villonaco - Taquil								
HORA	AUTOS	2D	2DA	2DB	2DB	3A	4C	+S32	TOTAL
	CAMIONESTAS	BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUEÑO	DINAS CAMION MEDIANO	BUSETAS BUS GRANDES	CAMIÓN GRANDE VOLQUETAS	CAMION 3 EJES	CAMIÓN 4 EJES	TRACTO CAMIÓN 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	
00-01	3		1						
01-02	1								
02-03	1								
03-04	1								
04-05		1	1						
05-06	2			1	1				
06-07	5		3	1					
07-08	5		1						
08-09	16	1	1	1	1				
09-10	18		2	2					
10-11	35		2	2					
11-12	20	1	7	1	3				
12-13	17			2	1				
13-14	16	1	1	2	2				
14-15	22		1	1					
15-16	25	1	2	2					
16-17	20	2	4	3					
17-18	29		3	1					
18-19	26	1	7	2					
19-20	37		1	4	1				
20-21	34		5						
21-22	20								
22-23	7		3						
23-24	4								
TOTAL	364	9	45	25	9	0	0	0	453

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	28/04/2018								
	Taquil - Villonaco								
HORA	AUTOS	2D	2DA	2DB	2DB	3A	4C	+S32	TOTAL
	CAMIONESTAS	BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUEÑO	DINAS	BUSETAS BUS GRANDES	CAMIÓN GRANDE VOLQUETAS	CAMION 3 EJES	CAMIÓN 4 EJES	TRACTO CAMIÓN 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	
00-01	6			1					
01-02			1						
02-03	3		1						
03-04	1	1	1	1					
04-05	2		1		1				
05-06	1			1					
06-07	3			1	1				
07-08	1		1	1	2				
08-09	3		2	1					
09-10	4		1	2					
10-11	3			1					
11-12	6			1	1				
12-13	3		1	1	1				
13-14	7			2	1				
14-15	10		1	1					
15-16	8			2	2				
16-17	10		2	1					
17-18	11		2	2					
18-19	24	2	4	3					
19-20	12		1	2					
20-21	6		1						
21-22	7		1	1					
22-23	13								
23-24	5	1	2						
TOTAL	149	4	23	25	7	0	0	0	208

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	27/04/2018								
SENTIDO:	Villonaco - Taquil								
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUENO	2DA DINAS CAMION MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMION GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMION 4 EJES	+352 TRACTO CAMION 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
VIDEOS									
00-01									
01-02									
02-03									
03-04									
04-05									
05-06									
06-07									
07-08									
08-09									
09-10									
10-11	3	1		2					
11-12	5		1						
12-13	4	2		2					
13-14	5	3		1					
14-15	6	1	1	1					
15-16	8	7	3	1					
16-17	9	2		1					
17-18	10	1		3					
18-19	9	2		2					
19-20	2		1	2					
20-21	5								
21-22	5		0						
22-23	3	2	2						
23-24									
TOTAL	74	21	8	14	0	0	0	0	117

AFOROS O CONTEOS MANUALES DE VIA									
MES:	27/04/2018								
SENTIDO:	Taquil - Villonaco								
HORA	AUTOS CAMIONESTAS	2D BUSETA ESCOLAR CAMION PEQUENO	2DA DINAS CAMION MEDIANO	2DB BUSETAS BUS GRANDES	2DB CAMION GRANDE VOLQUETAS	3A CAMION 3 EJES	4C CAMION 4 EJES	+352 TRACTO CAMION 3 EJES Y SEMI REMOLQUE	TOTAL
VIDEOS									
00-01									
01-02									
02-03									
03-04									
04-05									
05-06									
06-07									
07-08									
08-09									
09-10									
10-11	1	1							
11-12	5			1					
12-13	4	1		2					
13-14	13	2		2					
14-15	17	3		3					
15-16	15			1					
16-17	13	3		1					
17-18	9		1	3					
18-19	6	1	1	3					
19-20	5	1		4					
20-21	3				1				
21-22			1						
22-23	3		1						
23-24	1		1						
TOTAL	95	12	5	20	1	0	0	0	133

Anexos B

B. Informes impresos en el programa desarrollado

PRO-PAVE



Reporte de análisis granulométrico:

Fecha: enero 05, 2024 10:33:19

Tipo de material: Subrasante

Diámetros:

D60: 26.337 mm
 D30: 12.358 mm
 D10: 1.112 mm

Porcentaje más fino:

F4: 15.9 %
 F10: 11.9 %
 F40: 7.8 %
 F200: 4.8 %

Cu: 23.68 - Coeficiente of Uniformidad

Cc: 5.21 - Coeficiente of Concauidad

LL (%): 0.0 - Límite líquido

PL (%): 0.0 - Límite plástico

Clasificación de suelos:

SUCS: GP (Grava pobremente graduada)

AASHTO: A-1-a GI:1.0

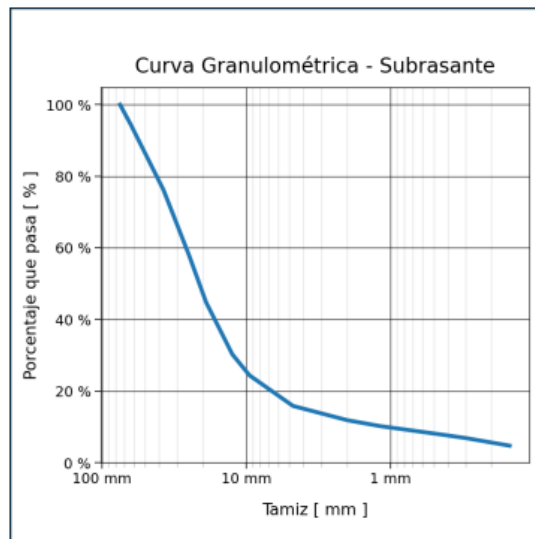


Tabla de datos:

Tamiz (")	Tamiz (mm)	Peso. Ret. 1 (g)	Peso. Ret. 2 (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
3"	75.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
2 1/2"	63.0	679.9	0.0	5.7	5.7	94.3
1 1/2"	37.5	2174.8	0.0	18.1	23.8	76.2
1"	25.0	2176.0	0.0	18.1	41.9	58.1
3/4"	19.0	1589.8	0.0	13.3	55.2	44.8
1/2"	12.5	1742.7	0.0	14.5	69.7	30.3
3/8"	9.5	706.1	0.0	5.9	75.6	24.4
T# 4	4.8	1023.6	0.0	8.5	84.1	15.9
T# 10	2.0	0.0	173.8	4.0	88.1	11.9
T# 16	1.2	0.0	72.7	1.7	89.8	10.2
T# 40	0.4	0.0	107.8	2.5	92.2	7.8
T# 50	0.3	0.0	38.7	0.9	93.1	6.9
T# 100	0.2	0.0	92.3	2.1	95.2	4.8
Peso total		11995.1	693.4			

PRO-PAVE



Sieve Analysis Report:

Date: January 05, 2024 10:34:01

Material type: Base

Diameters:

D60: 4.561 mm

D30: 0.381 mm

D10: 0.075 mm

Percentage Finer:

F4: 60.4 %

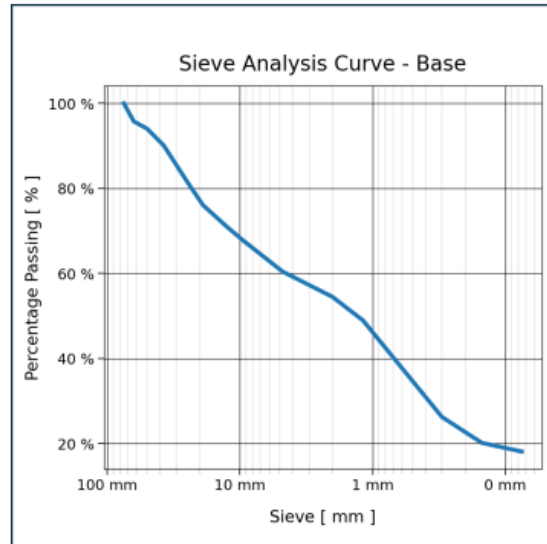
F10: 54.5 %

F40: 32.0 %

F200: 18.1 %

Cu: 60.81 - Coefficient of Uniformity

Cg: 0.42 - Coefficient of Gradation



Data Table:

Sieve (")	Sieve (mm)	Ret. Weight 1 (g)	Ret. Weight 2 (g)	% Retained	% Mass Retained	% Passing
3"	75.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
2 1/2"	63.0	695.9	0.0	4.2	4.2	95.8
2"	50.0	285.2	0.0	1.7	6.0	94.0
1 1/2"	37.5	643.5	0.0	3.9	9.9	90.1
1"	25.0	1397.0	0.0	8.5	18.4	81.6
3/4"	19.0	906.2	0.0	5.5	23.9	76.1
1/2"	12.5	843.6	0.0	5.1	29.0	71.0
3/8"	9.5	517.8	0.0	3.2	32.2	67.8
T# 4	4.8	1215.3	0.0	7.4	39.6	60.4
T# 10	2.0	0.0	84.3	5.9	45.5	54.5
T# 16	1.2	0.0	78.5	5.5	51.1	48.9
T# 40	0.4	0.0	240.3	16.9	68.0	32.0
T# 50	0.3	0.0	82.0	5.8	73.8	26.2
T# 100	0.2	0.0	86.6	6.1	79.9	20.1
T# 200	0.1	0.0	29.0	2.0	81.9	18.1
Total Weight		16428.8	857.8			

PRO-PAVE



Reporte de análisis granulométrico:

Fecha: enero 05, 2024 10:33:41

Tipo de material: Subrasante

Diámetros:

D60: 20.01 mm

D30: 5.965 mm

D10: 0.237 mm

Porcentaje más fino:

F4: 26.8 %

F10: 20.7 %

F40: 12.6 %

F200: 6.2 %

Cu: 84.43 - Coeficiente of Uniformidad

Cc: 7.5 - Coeficiente of Concavidad

LL (%): 25.8 - Límite líquido

PL (%): 21.92 - Límite plástico

Clasificación de suelos:

SUCS: GP-GM (Grava pobremente graduada con limo)

AASHTO: A-1-a Gl:0

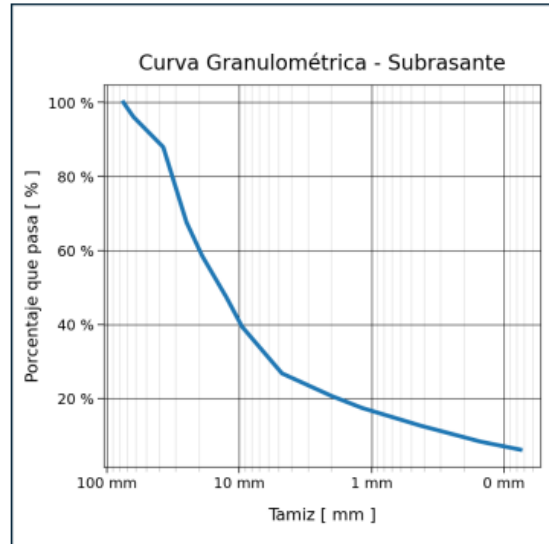


Tabla de datos:

Tamiz (")	Tamiz (mm)	Peso. Ret. 1 (g)	Peso. Ret. 2 (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
3"	75.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
2 1/2"	63.0	390.2	0.0	3.9	3.9	96.1
1 1/2"	37.5	816.6	0.0	8.2	12.1	87.9
1"	25.0	2035.2	0.0	20.4	32.4	67.6
3/4"	19.0	911.4	0.0	9.1	41.5	58.5
1/2"	12.5	1111.4	0.0	11.1	52.6	47.4
3/8"	9.5	798.3	0.0	8.0	60.6	39.4
T# 4	4.8	1258.9	0.0	12.6	73.2	26.8
T# 10	2.0	0.0	140.1	6.1	79.3	20.7
T# 16	1.2	0.0	73.6	3.2	82.6	17.4
T# 40	0.4	0.0	110.0	4.8	87.4	12.6
T# 50	0.3	0.0	32.8	1.4	88.8	11.2
T# 100	0.2	0.0	65.7	2.9	91.7	8.3
T# 200	0.1	0.0	49.8	2.2	93.8	6.2
Peso total		10000.0	613.2			

PRO-PAVE



Reporte de combinación de áridos:

Fecha: enero 03, 2024 07:10:04

Combinación de dos áridos:

Proporción A (%): 38.2
 Proporción B (%): 61.8

Diámetros:

D60: 7.5 mm
 D30: 1.9 mm
 D10: 0.1 mm

Porcentaje más fino:

F4: 50.0 %
 F10: 31.4 %
 F40: 16.6 %
 F200: 7.4 %

Cu: 75.0 Coeficiente of Uniformidad
 Cc: 4.8 Coeficiente of Concavidad

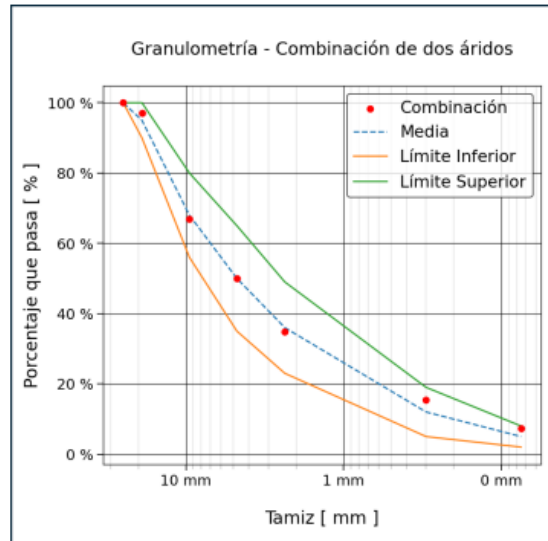


Tabla de datos:

Tamiz (")	Tamiz (mm)	% Pasa A	% Pasa B	% Pasa (L.I.)	% Pasa (L.S.)	% Media	% Total
1"	25.0	38.2	61.8	100.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19.0	35.3	61.8	90.0	100.0	95.0	97.1
3/8"	9.5	5.2	61.8	56.0	80.0	68.0	67.0
T# 4	4.75	0.4	49.6	35.0	65.0	50.0	50.0
T# 8	2.36	0.3	34.5	23.0	49.0	36.0	34.8
T# 50	0.3	0.2	15.2	5.0	19.0	12.0	15.4
T# 200	0.075	0.1	7.2	2.0	8.0	5.0	7.4



PRO-PAVE

Reporte de Diseño de M.A.C. usando el Método Marshall:

Fecha: enero 05, 2024 12:15:16

Página: 1 / 2

Gravedad específica del asfalto (G_b): 1.016

Gravedad específica del Agregado (G_{sb}): 2.577

Gravedad específica aparente del agregado (G_{sa}): 2.70

Muestras: 5

Tabla de Datos:

Descripción	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C	5A	5B	5C
C.A.(%)	5.0	5.0	5.0	5.5	5.5	5.5	6.0	6.0	6.0	6.5	6.5	6.5	7.0	7.0	7.0
WD	1154.0	1151.0	1141.0	1149.0	1173.0	1191.0	1159.0	1159.0	1167.0	1123.0	1123.0	1148.0	1190.0	1227.0	1182.0
WSSD	1156.0	1153.0	1155.0	1150.0	1173.0	1193.0	1160.0	1160.0	1169.0	1125.0	1124.0	1150.0	1191.0	1228.0	1182.0
Ww	664.0	664.0	660.0	663.0	678.0	685.0	671.0	668.0	674.0	648.0	646.0	655.0	676.0	700.0	677.0
Est. sin corregir (lbs)	2466.0	2495.0	2406.0	2693.0	2654.0	2609.0	2680.0	2644.0	2614.0	2459.0	2480.0	2465.0	2385.0	2394.0	2339.0
Fluencia (.01")	17.0	18.0	14.0	15.0	16.0	16.0	16.0	14.0	14.0	14.0	14.0	15.0	18.0	18.0	16.5
Volumen de Muestra (cm³)	492.0	489.0	495.0	487.0	495.0	508.0	489.0	492.0	495.0	477.0	478.0	495.0	515.0	528.0	505.0
Gmb	2.346	2.354	2.305	2.359	2.37	2.344	2.37	2.356	2.358	2.354	2.349	2.319	2.311	2.324	2.341
Gmm	2.51	2.51	2.51	2.5	2.5	2.5	2.488	2.488	2.488	2.43	2.43	2.43	2.387	2.387	2.387
VTM (%)	6.53	6.22	8.17	5.64	5.2	6.24	4.74	5.31	5.23	3.13	3.33	4.57	3.18	2.64	1.93
VMA (%)	20.05	19.44	23.19	19.13	18.29	20.28	18.29	19.37	19.21	17.72	18.11	20.43	19.78	18.77	17.44
VFA (%)	67.41	68.02	64.79	70.52	71.57	69.24	74.07	72.61	72.81	82.35	81.59	77.64	83.91	85.94	88.95
Factor de Corrección	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.04	1.09	1.09	1.09	1.14	1.14	1.09	1.0	0.96	1.04
Estabilidad Corr. (lbs)	2686.0	2720.0	2623.0	2935.0	2893.0	2713.0	2921.0	2882.0	2849.0	2803.0	2827.0	2686.0	2385.0	2296.0	2433.0



PRO-PAVE

Reporte de Diseño de M.A.C. usando el Método Marshall:

Fecha: enero 05, 2024 12:15:16

Página: 2 / 2

Gráficos:

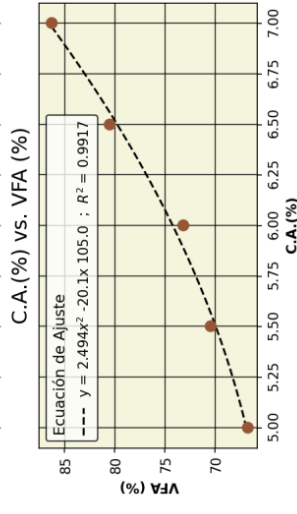
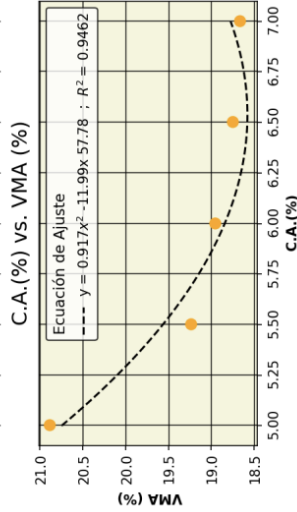
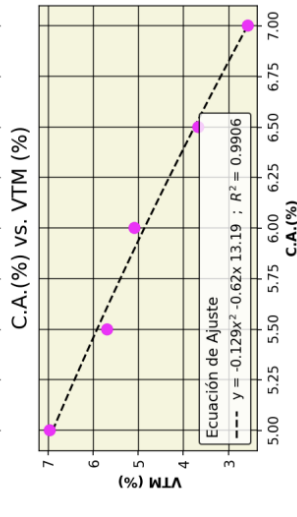
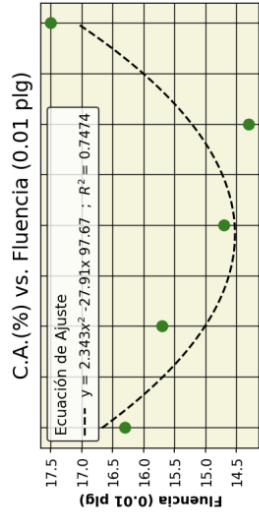
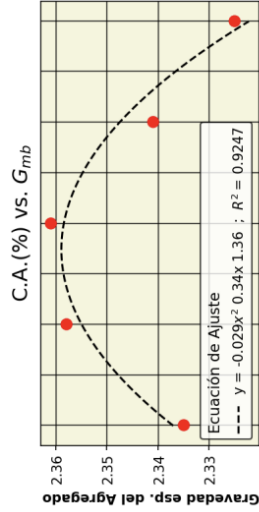
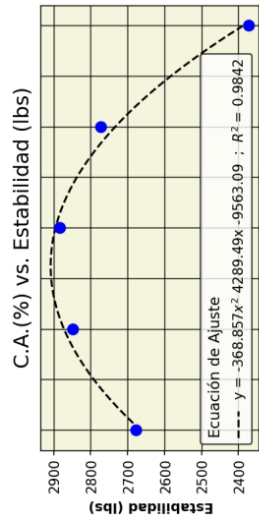


Tabla de Datos - Valores de la Mezcla: (Alto Tráfico)

C.A.(%)	Estabilidad (lbs)	Gmb	Fluencia (0.01")	VTM (%)	VMA (%)	VFA (%)
5.0	2676.7	2.335	16.3	6.97	20.89	66.74
5.5	2847.2	2.358	15.7	5.69	19.24	70.44
6.0	2884.1	2.361	14.7	5.09	18.96	73.16
6.5	2772.8	2.341	14.3	3.68	18.75	80.53
7.0	2371.9	2.325	17.5	2.58	18.67	86.27

Método: AIM

C.A. Óptimo (%): 6.0
 Estabilidad (lbs): 2894.97 / Cumple
 Gmb: 2.358
 Fluencia (0.01"): 14.53
 VTM (%): 4.87 / Cumple
 VMA (%): 18.84 / Tamiz - T #4
 VFA (%): 74.18 / Cumple

Método: NAPA

C.A. Óptimo (%): 6.8
 Estabilidad (lbs): 2549.46 / Cumple
 Gmb: 2.334
 Fluencia (0.01"): 16.19
 VTM (%): 3.06 / Cumple
 VMA (%): 18.64 / Tamiz - T #4
 VFA (%): 83.64

Anexos C

C. Análisis de daño de la estructura de pavimento en el programa KENPAVE

```

INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\jan_04_main_test_No_DAMA.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -NPROB

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 4
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 3
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 5 25 20
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.4 0.4 0.5
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 5 50.001
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 2.635E+06 2 1.920E+05
3 1.050E+05 4 1.070E+05

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
CONTACT RADIUS (CR)----- = 9.65
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 685
NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 3
WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 33

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000 0.000 2 0.000 8.250
3 0.000 16.500

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT VERTICAL VERTICAL VERTICAL MAJOR MINOR INTERMEDIATE
NO. COORDINATE DISP. STRESS PRINCIPAL PRINCIAL P. STRESS
(STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (HORIZONTAL
1 0.00000 0.06257 685.000 2291.108 720.875 2228.648
(STRAIN) -3.268E-04 4.777E-04 -3.268E-04 4.457E-04
1 5.00000 0.06000 391.448 391.531 -1625.042 -1480.580
(STRAIN) 5.611E-04 5.611E-04 -4.721E-04 -4.721E-04
1 50.00100 0.02670 40.806 42.242 3.436 6.061
(STRAIN) 3.303E-04 3.504E-04 -1.936E-04 -1.936E-04
2 0.00000 0.06058 685.000 1795.692 482.165 1407.052
(STRAIN) -2.424E-04 4.305E-04 -2.424E-04 2.314E-04
2 5.00000 0.05760 275.905 281.725 -1171.037 -473.768
(STRAIN) 3.224E-04 3.254E-04 -4.189E-04 -4.189E-04
2 50.00100 0.02767 43.841 44.200 3.614 6.786
(STRAIN) 3.595E-04 3.645E-04 -2.045E-04 -2.045E-04
3 0.00000 0.05679 0.000 1187.420 271.070 751.312
(STRAIN) -1.546E-04 3.148E-04 -1.546E-04 9.140E-05
3 5.00000 0.05320 133.419 775.680 -467.679 133.419
(STRAIN) 9.722E-06 3.388E-04 -2.982E-04 -2.982E-04
3 50.00100 0.02799 44.838 44.838 3.674 7.060
(STRAIN) 3.689E-04 3.689E-04 -2.082E-04 -2.082E-04
    
```



```

INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\jan_04_main_test.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -NPROB

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA=2, SO DAMAGE ANALYSIS WITH DETAILED PRINTOUT WILL BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 4
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 0
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 5 25 20
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.4 0.4 0.5
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 2.635E+06 2 1.920E+05
3 1.050E+05 4 1.070E+05

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
CONTACT RADIUS (CR)----- = 9.65
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 685
NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 3
WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 33

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000 0.000 2 0.000 8.250
3 0.000 16.500

NUMBER OF LAYERS FOR BOTTOM TENSION (NLBT)---- = 1
NUMBER OF LAYERS FOR TOP COMPRESSION (NLTC)--- = 1
LAYER NO. FOR BOTTOM TENSION (LNBT) ARE: 1
LAYER NO. FOR TOP COMPRESSION (LNTC) ARE: 4

LOAD REPETITIONS (TNLR) IN PERIOD 1 FOR EACH LOAD GROUP ARE : 1213000

DAMAGE COEF.'S (FT) FOR BOTTOM TENSION OF LAYER 1 ARE: 0.0796 3.291 0.854

DAMAGE COEFFICIENTS (FT) FOR TOP COMPRESSION OF LAYER 4 ARE: 1.365E-09 4.477

DAMAGE ANALYSIS OF PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT VERTICAL VERTICAL VERTICAL MAJOR MINOR INTERMEDIATE
NO. COORDINATE DISP. STRESS PRINCIPAL PRINCIAL P. STRESS
(STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) P. STRAIN
1 5.00000 0.06000 391.448 391.531 -1625.042 -1480.580
(STRAIN) 5.611E-04 5.611E-04 -4.721E-04 -4.721E-04
1 50.00010 0.02670 40.807 42.243 3.436 6.062
(STRAIN) 3.303E-04 3.504E-04 -1.936E-04 -1.936E-04

2 5.00000 0.05760 275.905 281.725 -1171.037 -473.768
(STRAIN) 3.224E-04 3.254E-04 -4.189E-04 -4.189E-04
2 50.00010 0.02767 43.842 44.201 3.614 6.787
(STRAIN) 3.595E-04 3.645E-04 -2.045E-04 -2.045E-04

3 5.00000 0.05320 133.419 775.680 -467.679 133.419
(STRAIN) 9.722E-06 3.388E-04 -2.982E-04 -2.982E-04
3 50.00010 0.02800 44.839 44.839 3.674 7.060
(STRAIN) 3.689E-04 3.689E-04 -2.082E-04 -2.082E-04

AT BOTTOM OF LAYER 1 TENSILE STRAIN = -4.721E-04
ALLOWABLE LOAD REPETITIONS = 2.309E+04 DAMAGE RATIO = 5.253E+01

AT TOP OF LAYER 4 COMPRESSIVE STRAIN = 3.689E-04
ALLOWABLE LOAD REPETITIONS = 3.200E+06 DAMAGE RATIO = 3.791E-01

*****
* SUMMARY OF DAMAGE ANALYSIS *
*****
AT BOTTOM OF LAYER 1 SUM OF DAMAGE RATIO = 5.253E+01
AT TOP OF LAYER 4 SUM OF DAMAGE RATIO = 3.791E-01
    
```

Anexos D

D. Análisis estructural lineal, no-lineal y viscoelástico en el programa

D.1 Cargas aplicadas

Las cargas aplicadas corresponden a los vehículos que transitan por el pavimento diseñado en el capítulo 5.

PRO-PAVE - Análisis Estructural

Archivo

Tipo de Análisis

Lineal No Lineal Visco Elástico Combinado No. Periodos: 1

Configurar Visco-Elastico Análisis de Daño Correr Programa

Tráfico

Cargas: 5 Carga #1:

Eje: Simple - Doble Neumático Mostrar Leyenda

Radio (cm): 9.65

Presión de Contacto (kPa): 923

Espaciamiento entre ejes - Eje X (cm):

Espaciamiento entre neumáticos - Eje Y (cm): 33

Número de Coordenadas 1

#	X (cm)	Y (cm)
1		

PRO-PAVE - Análisis Estructural

Archivo

Tipo de Análisis

Lineal No Lineal Visco Elástico Combinado No. Periodos: 1

Configurar Visco-Elastico Análisis de Daño Correr Programa

Tráfico

Cargas: 5 Carga #2:

Eje: Simple - Un Neumático Mostrar Leyenda

Radio (cm): 9.65

Presión de Contacto (kPa): 668

Espaciamiento entre ejes - Eje X (cm):

Espaciamiento entre neumáticos - Eje Y (cm):

Número de Coordenadas 1

#	Coordenada R (cm)
1	

PRO-PAVE - Análisis Estructural

Archivo

Tipo de Análisis

Lineal No Lineal Visco Elástico Combinado No. Periodos: 1

Configurar Visco-Elastico Análisis de Daño Correr Programa

Tráfico

Cargas: 5 Carga #3:

Eje: Simple - Doble Neumático Mostrar Leyenda

Radio (cm): 9.65

Presión de Contacto (kPa): 586

Espaciamiento entre ejes - Eje X (cm):

Espaciamiento entre neumáticos - Eje Y (cm): 33

Número de Coordenadas 1

#	X (cm)	Y (cm)
1		

PRO-PAVE - Análisis Estructural

Archivo

Tipo de Análisis

Lineal
 No Lineal
 Visco Elástico
 Combinado
 No. Periodos: 1

 Análisis de Daño

Tráfico

Cargas: 5 | Carga #4:

Eje: Tandem Mostrar Leyenda

Radio (cm):

Presión de Contacto (KPa):

Espaciamiento entre ejes - Eje X (cm):

Espaciamiento entre neumáticos - Eje Y (cm):

Número de Coordenadas:

#	X (cm)	Y (cm)
1		

Carga #4

Eje Tandem

PRO-PAVE - Análisis Estructural

Archivo

Tipo de Análisis

Lineal
 No Lineal
 Visco Elástico
 Combinado
 No. Periodos: 1

 Análisis de Daño

Tráfico

Cargas: 5 | Carga #5:

Eje: Tridem Mostrar Leyenda

Radio (cm):

Presión de Contacto (KPa):

Espaciamiento entre ejes - Eje X (cm):

Espaciamiento entre neumáticos - Eje Y (cm):

Número de Coordenadas:

#	X (cm)	Y (cm)
1		

Carga #5

Eje Tridem

D.2 Análisis lineal

Se realiza el análisis lineal considerando los parámetros de resistencia de cada capa.

D.2.1 Parámetros de capa

Parámetros por Capa

Capas: 4

Módulo Elástico por Capa (KPa):

Capa	Espesor (cm)	Coefficiente de Poisson
1	5.0	0.35
2	25.0	0.4
3	20.0	0.4
4	-	0.5

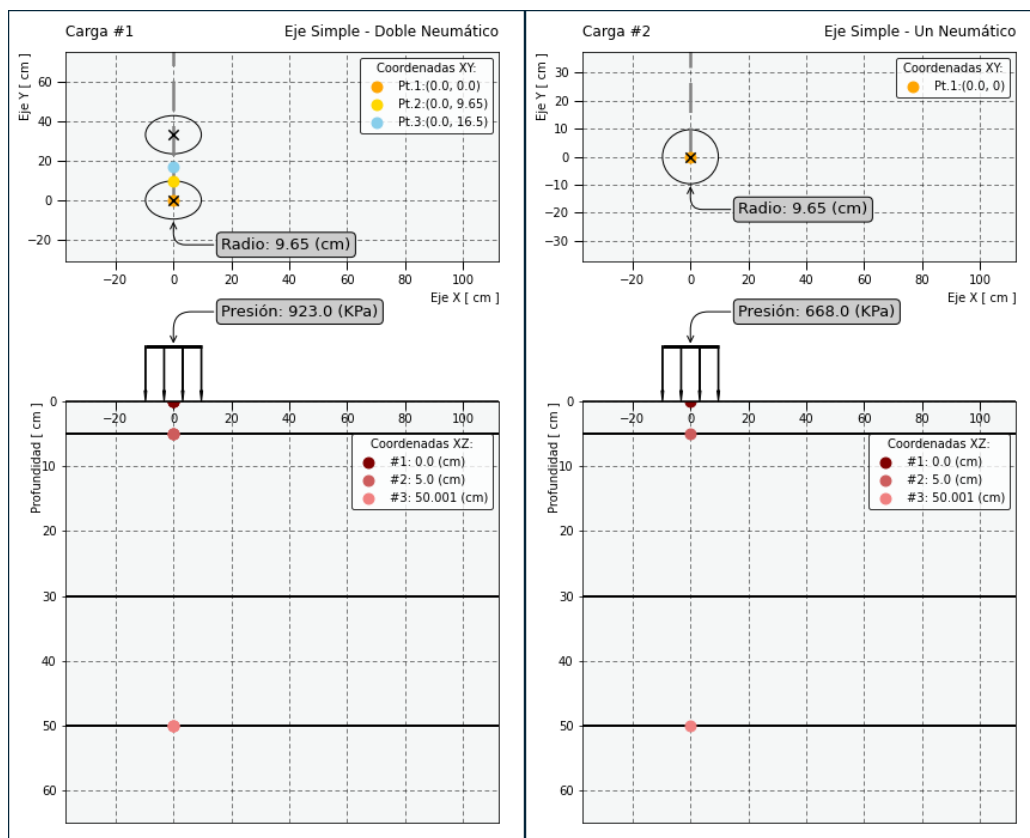
Módulo Elástico (KPa)

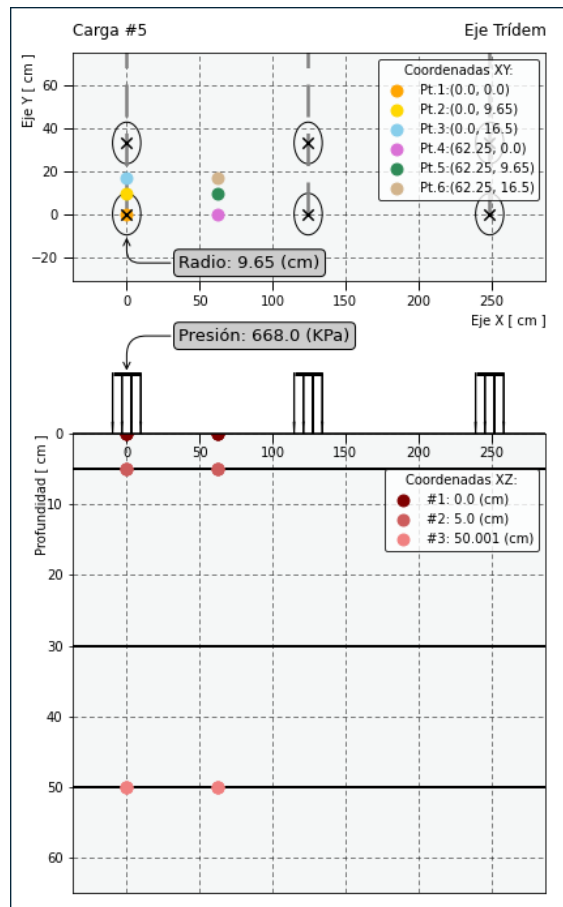
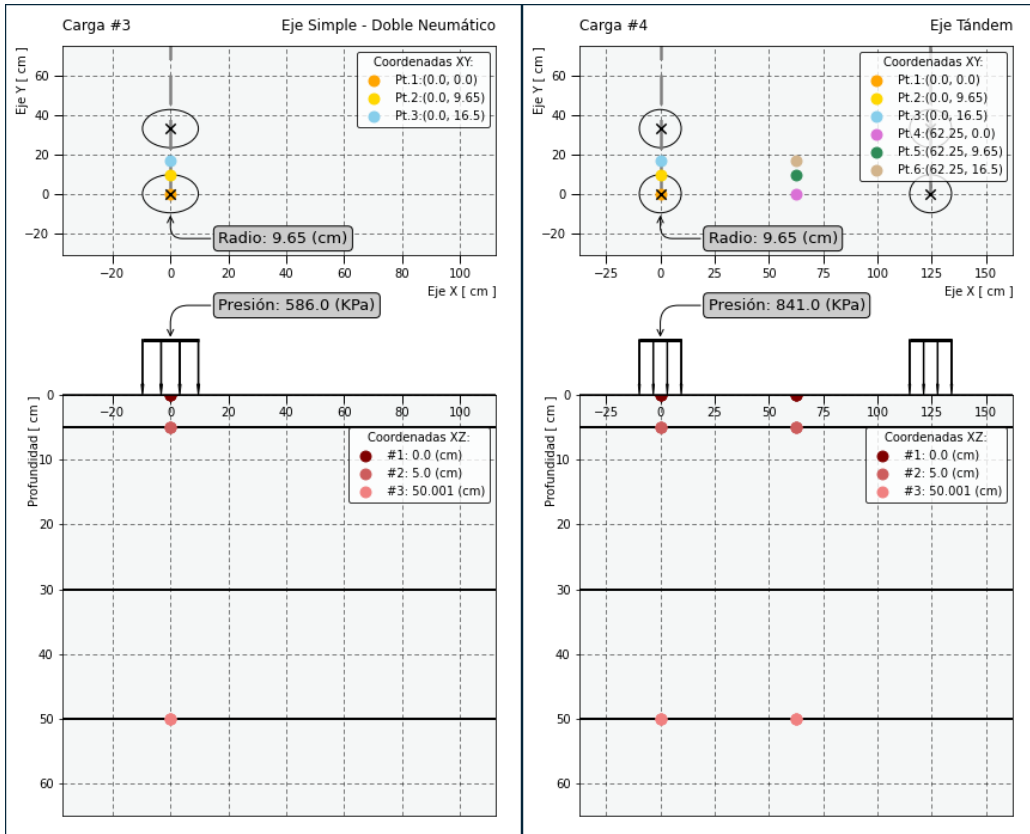
Capa	Periodo 1
1	2.635E+06
2	1.92E+05
3	1.05E+05
4	1.07E+05

Aceptar Cancelar

D.2.2 Resultados

Se muestra la ubicación de los puntos para ejecutar el análisis de daño.





Las tablas a continuación muestran los esfuerzos, deformaciones y deflexiones que genera cada carga sobre el pavimento.

En la Carga #1: Eje Simple - Doble Neumático

Radio: 9.65 (cm)
 Presión de Contacto: 923.0 (KPa)
 Espaciamiento Vertical: 33.0 (cm)

(X,Y) (cm)	Z (cm)	Deflexión	Esfuerzos (KPa)				Deformaciones			
		ω_z (cm)	σ_z	σ_1	σ_2	σ_3	ϵ_z	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
(0.0, 0.0)	0.0	0.08158	923.0	3328.298	3070.42	923.0	-4.996E-04	7.327E-04	6.006E-04	-4.996E-04
	5.0	0.08085	527.487	527.599	-1995.343	-2190.145	7.561E-04	7.562E-04	-6.362E-04	-6.362E-04
	50.0	0.03598	18.414	22.542	-3.534	-5.162	1.928E-04	2.478E-04	-1.216E-04	-1.216E-04
(0.0, 9.65)	0.0	0.0763	460.463	2090.146	845.347	460.463	-2.152E-04	6.198E-04	-1.798E-05	-2.152E-04
	5.0	0.07603	317.232	335.273	-126.876	-1320.5	3.102E-04	3.195E-04	-5.288E-04	-5.288E-04
	50.0	0.03747	59.143	59.419	-0.67	-5.332	5.851E-04	5.888E-04	-2.746E-04	-2.746E-04
(0.0, 16.5)	0.0	0.07147	0	1126.49	0.0	-543.147	-7.748E-05	4.997E-04	-3.558E-04	-3.558E-04
	5.0	0.07168	179.804	1044.555	179.804	-630.466	1.323E-05	4.563E-04	-4.019E-04	-4.019E-04
	50.0	0.03769	60.389	60.389	-0.871	-5.667	6.000E-04	6.000E-04	-2.807E-04	-2.807E-04

En la Carga #2: Eje Simple - Un Neumático

Radio: 9.65 (cm)
 Presión de Contacto: 668.0 (KPa)

R (cm)	Z (cm)	Deflexión	Esfuerzos (KPa)				Deformaciones			
		ω_z (cm)	σ_z	σ_r	σ_t	τ_{rz}	ϵ_z	ϵ_r	ϵ_t	ν_{rz}
0.0	0.0	0.04467	668.0	2338.506	2338.506	0.0	-3.677E-04	4.881E-04	4.881E-04	0.000E+00
	5.0	0.04407	380.9	-1591.915	-1591.915	0.0	5.675E-04	-4.433E-04	-4.433E-04	0.000E+00
	50.0	0.0147	26.467	-2.351	-2.351	0.0	2.700E-04	-1.143E-04	-1.143E-04	0.000E+00

En la Carga #3: Eje Simple - Doble Neumático

Radio: 9.65 (cm)
 Presión de Contacto: 586.0 (KPa)
 Espaciamiento Vertical: 33.0 (cm)

(X,Y) (cm)	Z (cm)	Deflexión	Esfuerzos (KPa)				Deformaciones			
		ω_z (cm)	σ_z	σ_1	σ_2	σ_3	ϵ_z	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
(0.0, 0.0)	0.0	0.05183	586.044	2113.925	1950.557	586.044	-3.175E-04	4.653E-04	3.816E-04	-3.175E-04
	5.0	0.05133	334.894	334.966	-1266.816	-1390.493	4.800E-04	4.801E-04	-4.039E-04	-4.039E-04
	50.0	0.02284	34.909	35.936	-0.65	-3.277	3.435E-04	3.572E-04	-1.656E-04	-1.656E-04
(0.0, 9.65)	0.0	0.04844	292.342	1327.005	536.699	292.342	-1.366E-04	3.935E-04	-1.141E-05	-1.366E-04
	5.0	0.04827	201.406	212.86	-80.552	-838.367	1.970E-04	2.028E-04	-3.357E-04	-3.357E-04
	50.0	0.02379	37.549	37.724	-0.425	-3.385	3.715E-04	3.738E-04	-1.743E-04	-1.743E-04
(0.0, 16.5)	0.0	0.04536	0	715.193	0.0	-344.837	-4.919E-05	3.172E-04	-2.259E-04	-2.259E-04
	5.0	0.04551	114.155	663.174	114.155	-400.279	8.403E-06	2.897E-04	-2.552E-04	-2.552E-04
	50.0	0.02393	38.34	38.34	-0.553	-3.598	3.810E-04	3.810E-04	-1.782E-04	-1.782E-04

En la Carga #4: Eje Tandem

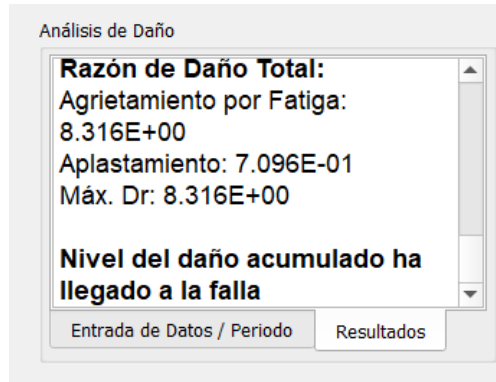
Radio: 9.65 (cm)
 Presión de Contacto: 841.0 (KPa)
 Espaciamiento Horizontal: 124.5 (cm)
 Espaciamiento Vertical: 33.0 (cm)

(X,Y) (cm)	Z (cm)	Deflexión	Esfuerzos (KPa)				Deformaciones			
		ω_z (cm)	σ_z	σ_1	σ_2	σ_3	ϵ_z	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
(0.0, 0.0)	0.0	0.08354	841.02	3015.245	2803.422	841.02	-4.537E-04	6.602E-04	5.516E-04	-4.537E-04
	5.0	0.08287	480.648	480.75	-1813.651	-1997.159	6.886E-04	6.886E-04	-5.809E-04	-5.809E-04
	50.0	0.0422	17.806	21.66	-1.281	-3.332	1.725E-04	2.239E-04	-8.634E-05	-1.094E-04
(0.0, 9.65)	0.0	0.07879	419.555	1884.366	775.875	419.555	-1.941E-04	5.563E-04	-1.158E-05	-1.941E-04
	5.0	0.07855	289.069	305.687	-111.185	-1204.742	2.823E-04	2.908E-04	-4.830E-04	-4.830E-04
	50.0	0.04363	54.945	55.254	-0.774	-1.301	5.300E-04	5.341E-04	-2.214E-04	-2.199E-04
(0.0, 16.5)	0.0	0.07441	0	1006.175	0.0	-489.186	-6.867E-05	4.468E-04	-3.193E-04	-3.193E-04
	5.0	0.0746	163.849	956.402	163.849	-576.004	1.165E-05	4.177E-04	-3.674E-04	-3.674E-04
	50.0	0.04384	56.086	56.136	-0.976	-1.571	5.437E-04	5.443E-04	-2.244E-04	-2.251E-04
(62.25, 0.0)	0.0	0.03738	0	64.946	0.0	-100.208	4.684E-06	3.796E-05	-4.666E-05	-4.666E-05
	5.0	0.03741	0.667	70.394	38.666	0.57	-1.422E-05	2.150E-05	5.198E-06	-1.427E-05
	50.0	0.03615	18.465	19.132	16.054	-0.959	1.158E-04	1.247E-04	-1.343E-04	-1.432E-04
(62.25, 9.65)	0.0	0.03823	0	75.809	0.0	-106.446	4.069E-06	4.291E-05	-5.047E-05	-5.047E-05
	5.0	0.03826	0.697	75.486	39.894	0.678	-1.506E-05	2.326E-05	5.014E-06	-1.507E-05
	50.0	0.03687	19.447	19.566	17.008	-1.142	1.243E-04	1.259E-04	-1.486E-04	-1.502E-04
(62.25, 16.5)	0.0	0.0384	0	76.63	0.0	-109.715	4.395E-06	4.365E-05	-5.182E-05	-5.182E-05
	5.0	0.03844	0.704	76.537	40.183	0.704	-1.524E-05	2.362E-05	4.990E-06	-1.524E-05
	50.0	0.03702	19.658	19.658	17.213	-1.182	1.262E-04	1.261E-04	-1.517E-04	-1.517E-04

En la Carga #5: Eje Tridem

Radio: 9.65 (cm)
 Presión de Contacto: 668.0 (KPa)
 Espaciamiento Horizontal: 124.5 (cm)
 Espaciamiento Vertical: 33.0 (cm)

(X,Y) (cm)	Z (cm)	Deflexión	Esfuerzos (KPa)				Deformaciones			
		ω_z (cm)	σ_z	σ_1	σ_2	σ_3	ϵ_z	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
(0.0, 0.0)	0.0	0.06992	668.068	2392.054	2228.684	668.068	-3.602E-04	5.230E-04	4.393E-04	-3.602E-04
	5.0	0.06935	381.775	381.856	-1440.019	-1587.47	5.470E-04	5.471E-04	-4.619E-04	-4.619E-04
	50.0	0.03708	40.623	41.87	-0.445	-0.959	3.875E-04	4.041E-04	-1.671E-04	-1.669E-04
(0.0, 9.65)	0.0	0.06612	333.25	1493.57	616.747	333.25	-1.538E-04	4.406E-04	-8.594E-06	-1.538E-04
	5.0	0.06593	229.605	242.828	-87.776	-958.012	2.243E-04	2.311E-04	-3.842E-04	-3.842E-04
	50.0	0.03823	43.656	43.906	-0.509	-0.697	4.194E-04	4.227E-04	-1.736E-04	-1.720E-04
(0.0, 16.5)	0.0	0.06262	0	796.438	0.0	-387.793	-5.428E-05	3.538E-04	-2.530E-04	-2.530E-04
	5.0	0.06279	130.144	760.205	130.144	-458.73	9.346E-06	3.321E-04	-2.924E-04	-2.924E-04
	50.0	0.0384	44.562	44.607	-0.77	-0.81	4.303E-04	4.308E-04	-1.747E-04	-1.747E-04
(62.25, 0.0)	0.0	0.03445	0	53.049	0.0	-85.574	4.320E-06	3.150E-05	-3.953E-05	-3.952E-05
	5.0	0.03447	0.531	54.039	31.882	0.458	-1.120E-05	1.621E-05	4.818E-06	-1.124E-05
	50.0	0.03356	14.77	15.362	13.779	-0.822	8.905E-05	9.694E-05	-1.118E-04	-1.188E-04
(62.25, 9.65)	0.0	0.03514	0	61.756	0.0	-90.588	3.830E-06	3.547E-05	-4.258E-05	-4.258E-05
	5.0	0.03516	0.553	58.056	32.888	0.539	-1.187E-05	1.759E-05	4.690E-06	-1.188E-05
	50.0	0.03414	15.552	15.724	14.534	-0.973	9.580E-05	9.809E-05	-1.233E-04	-1.245E-04
(62.25, 16.5)	0.0	0.03528	0	62.425	0.0	-93.197	4.087E-06	3.607E-05	-4.366E-05	-4.366E-05
	5.0	0.03531	0.56	58.879	33.128	0.56	-1.201E-05	1.787E-05	4.677E-06	-1.201E-05
	50.0	0.03427	15.72	15.803	14.695	-1.005	9.725E-05	9.835E-05	-1.258E-04	-1.258E-04



D.3 Análisis no-lineal

Para el análisis no-lineal se ha considerado a las capas de base, subbase y terreno de subrasante como un material granular con un coeficiente $K_2 = 0.317$.

D.3.0.1 Parámetros de capa

Parámetros por Capa

Capas: 4

Módulo Elástico por Capa (KPa):

Capa	Espesor (cm)	Coefficiente de Poisson	Peso Específico (KN/m ³)
1	5.0	0.35	24.85
2	25.0	0.4	17.65
3	20.0	0.4	17.65
4	-	0.5	16.07

Módulo Elástico (KPa)

Capa	Periodo 1
1	2.635E+06
2	1.92E+05
3	1.05E+05
4	1.07E+05

Aceptar Cancelar

Propiedades No-Lineales de las Capas

Capas: 3 Propiedades por Temporada:

Punto Medio Dividir Capas: Tres

Capa	Dividir	K_2	Tipo
2	Capa/3	0.6	Granular
3	Capa/3	0.6	Granular
4	Capa/3	0.6	Granular

Espesor a dividir de la última capa (cm): 5

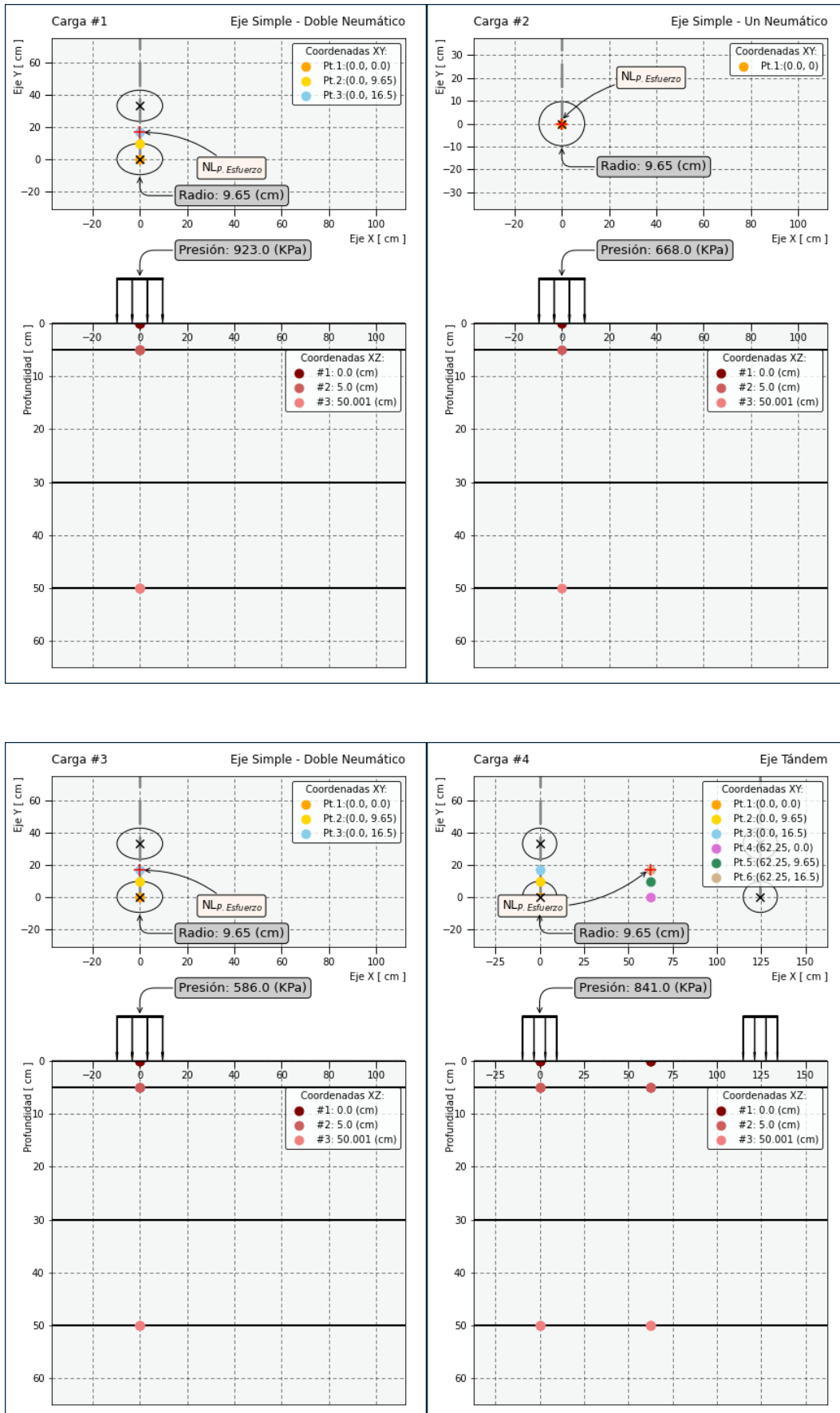
Propiedades por Temporada (KPa)

K1 Módulo Máx. Módulo Mín.

Capa	Periodo 1
2	68948
3	48263
4	48263

Aceptar Cancelar

D.3.0.2 Resultados



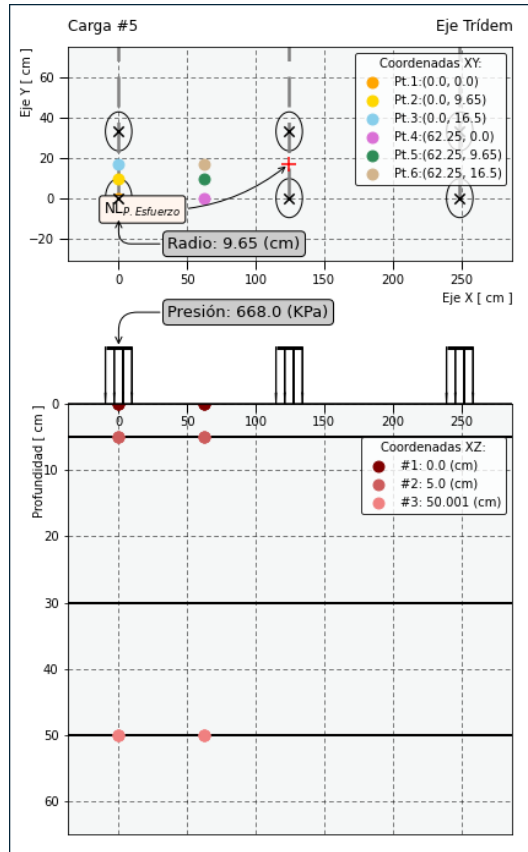


Tabla de Módulos Elásticos Calculados

Layer		Módulo Elástico (KPa)				
		Carga 1	Carga 2	Carga 3	Carga 4	Carga 5
1	Lineal	2.635E+06	2.635E+06	2.635E+06	2.635E+06	2.635E+06
2	No-Lineal	4.389E+05	4.443E+05	3.809E+05	1.589E+05	3.982E+05
3	No-Lineal	3.696E+05	3.339E+05	3.226E+05	2.015E+05	3.396E+05
4	No-Lineal	3.188E+05	2.713E+05	2.768E+05	2.293E+05	2.897E+05
5	No-Lineal	2.117E+05	1.705E+05	1.886E+05	1.650E+05	2.003E+05
6	No-Lineal	2.000E+05	1.627E+05	1.797E+05	1.694E+05	1.913E+05
7	No-Lineal	1.914E+05	1.579E+05	1.734E+05	1.722E+05	1.850E+05
8	No-Lineal	1.975E+05	1.629E+05	1.791E+05	1.831E+05	1.921E+05
9	No-Lineal	1.932E+05	1.611E+05	1.760E+05	1.835E+05	1.890E+05
10	No-Lineal	1.899E+05	1.599E+05	1.738E+05	1.837E+05	1.867E+05

Análisis de Daño

Razon de Daño Total:

Agrietamiento por Fatiga: 1.998E+00

Aplastamiento: 6.170E-02

Máx. Dr: 1.998E+00

Nivel del daño acumulado ha llegado a la falla

Entrada de Datos / Periodo Resultados

En la Carga #1: Eje Simple - Doble Neumático

Radio: 9.65 (cm)

Presión de Contacto: 923.0 (KPa)

Espaciamiento Vertical: 33.0 (cm)

Coordenadas introducidas para el cálculo del Módulo Elástico:

Coordenada X: 0 (cm)

Coordenada Y: 16.5 (cm)

Pendiente: 0.0

Número de capas No-Lineales y esfuerzos normales con esfuerzos geostáticos:

Capa	Z (cm)	Esfuerzos por Carga (KPa)			Esfuerzos Geoestáticos (KPa)		Total (KPa)		
		σ_z	σ_x	σ_y	σ_v	σ_h	σ_z	σ_x	σ_y
2	9.17	172.737	12.828	162.69	1.98	1.188	174.717	14.016	163.878
3	17.5	167.554	-23.614	52.863	3.45	2.07	171.004	-21.544	54.933
4	25.83	127.921	-36.024	0.891	4.92	2.952	132.841	-33.072	3.843
5	33.33	99.072	-10.21	6.004	6.24	3.744	105.312	-6.466	9.748
6	40.0	80.118	-7.627	1.896	7.42	4.452	87.538	-3.175	6.348
7	46.67	65.866	-5.877	0.048	8.6	5.16	74.466	-0.717	5.208
8	52.5	56.37	2.828	6.905	9.59	5.754	65.96	8.582	12.659
9	57.5	49.741	2.846	5.88	10.39	6.234	60.131	9.08	12.114
10	62.5	44.17	2.927	5.222	11.19	6.714	55.36	9.641	11.936

Módulo Elástico por Capa:

Capa 1: 2.635E+06 (KPa)

Capa 2: 4.389E+05 (KPa)

Capa 3: 3.696E+05 (KPa)

Capa 4: 3.188E+05 (KPa)

Capa 5: 2.117E+05 (KPa)

Capa 6: 2.000E+05 (KPa)

Capa 7: 1.914E+05 (KPa)

Capa 8: 1.975E+05 (KPa)

Capa 9: 1.932E+05 (KPa)

Capa 10: 1.899E+05 (KPa)

(X,Y) (cm)	Z (cm)	Deflexión	Esfuerzos (KPa)				Deformaciones			
		ω_z (cm)	σ_z	σ_1	σ_2	σ_3	ϵ_z	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
(0.0, 0.0)	0.0	0.04603	923.063	2298.63	2150.93	923.063	-2.407E-04	4.640E-04	3.884E-04	-2.407E-04
	5.0	0.0453	651.76	651.914	-934.342	-1005.132	5.049E-04	5.050E-04	-3.439E-04	-3.439E-04
	50.0	0.02027	54.915	56.553	-1.458	-5.609	2.983E-04	3.102E-04	-1.445E-04	-1.444E-04
(0.0, 9.65)	0.0	0.04189	456.292	1400.377	617.329	456.292	-9.484E-05	3.888E-04	-1.234E-05	-9.484E-05
	5.0	0.04158	341.636	417.115	65.735	-552.046	1.842E-04	2.229E-04	-2.736E-04	-2.736E-04
	50.0	0.02111	58.93	59.207	-1.094	-5.838	3.218E-04	3.238E-04	-1.520E-04	-1.520E-04
(0.0, 16.5)	0.0	0.03827	13.328	667.356	13.328	-361.443	-3.558E-05	2.995E-04	-2.276E-04	-2.276E-04
	5.0	0.03855	133.791	818.061	133.791	-145.808	-3.852E-05	3.121E-04	-1.818E-04	-1.818E-04
	50.0	0.02122	60.185	60.185	-1.298	-6.192	3.301E-04	3.301E-04	-1.554E-04	-1.554E-04

En la Carga #2: Eje Simple - Un Neumático

Radio: 9.65 (cm)

Presión de Contacto: 668.0 (KPa)

Coordenadas introducidas para el cálculo del Módulo Elástico:

Coordenada R : 0 (cm)

Pendiente: 0.0

Número de capas No-Lineales y esfuerzos normales con esfuerzos geoestáticos:

Capa	Z (cm)	Esfuerzos por Carga (KPa)			Esfuerzos Geoestáticos (KPa)		Total (KPa)		
		σ_z	σ_r	σ_t	σ_v	σ_h	σ_z	σ_r	σ_t
2	9.17	322.707	20.14	20.14	1.98	1.188	324.687	21.328	21.328
3	17.5	148.021	-16.269	-16.269	3.45	2.07	151.471	-14.199	-14.199
4	25.83	76.263	-19.962	-19.962	4.92	2.952	81.183	-17.01	-17.01
5	33.33	49.135	-4.198	-4.198	6.24	3.744	55.375	-0.454	-0.454
6	40.0	36.343	-2.853	-2.853	7.42	4.452	43.763	1.599	1.599
7	46.67	28.194	-2.191	-2.191	8.6	5.16	36.794	2.969	2.969
8	52.5	23.318	1.382	1.382	9.59	5.754	32.908	7.136	7.136
9	57.5	20.132	1.255	1.255	10.39	6.234	30.522	7.489	7.489
10	62.5	17.575	1.136	1.136	11.19	6.714	28.765	7.85	7.85

En la Carga #2: Eje Simple - Un Neumático

Radio: 9.65 (cm)

Presión de Contacto: 668.0 (KPa)

Módulo Elástico por Capa:

Capa 1: 2.635E+06 (KPa)

Capa 2: 4.443E+05 (KPa)

Capa 3: 3.339E+05 (KPa)

Capa 4: 2.713E+05 (KPa)

Capa 5: 1.705E+05 (KPa)

Capa 6: 1.627E+05 (KPa)

Capa 7: 1.579E+05 (KPa)

Capa 8: 1.629E+05 (KPa)

Capa 9: 1.611E+05 (KPa)

Capa 10: 1.599E+05 (KPa)

R (cm)	Z (cm)	Deflexión	Esfuerzos (KPa)				Deformaciones			
		w_z (cm)	σ_z	σ_r	σ_t	τ_{rz}	ϵ_z	ϵ_r	ϵ_t	ν_{rz}
0.0	0.0	0.02776	668.0	1642.045	1642.045	0.0	-1.827E-04	3.163E-04	3.163E-04	0.000E+00
	5.0	0.02733	466.116	-751.004	-751.004	0.0	3.764E-04	-2.472E-04	-2.472E-04	0.000E+00
	50.0	0.00962	25.211	-2.256	-2.256	0.0	1.711E-04	-7.244E-05	-7.244E-05	0.000E+00

En la Carga #3: Eje Simple - Doble Neumático

Radio: 9.65 (cm)
 Presión de Contacto: 586.0 (KPa)
 Espaciamiento Vertical: 33.0 (cm)

Coordenadas introducidas para el cálculo del Módulo Elástico:

Coordenada X: 0 (cm)
 Coordenada Y: 16.5 (cm)
 Pendiente: 0.0

Número de capas No-Lineales y esfuerzos normales con esfuerzos geoestáticos:

Capa	Z (cm)	Esfuerzos por Carga (KPa)			Esfuerzos Geoestáticos (KPa)		Total (KPa)		
		σ_z	σ_x	σ_y	σ_v	σ_h	σ_z	σ_x	σ_y
2	9.17	112.203	8.155	99.797	1.98	1.188	114.183	9.343	100.985
3	17.5	106.788	-14.494	32.617	3.45	2.07	110.238	-12.424	34.687
4	25.83	81.562	-21.147	1.599	4.92	2.952	86.482	-18.195	4.551
5	33.33	63.292	-5.945	4.22	6.24	3.744	69.532	-2.201	7.964
6	40.0	51.243	-4.513	1.498	7.42	4.452	58.663	-0.061	5.95
7	46.67	42.156	-3.607	0.162	8.6	5.16	50.756	1.553	5.322
8	52.5	36.089	2.022	4.618	9.59	5.754	45.679	7.776	10.372
9	57.5	31.843	1.914	3.854	10.39	6.234	42.233	8.148	10.088
10	62.5	28.268	1.847	3.32	11.19	6.714	39.458	8.561	10.034

En la Carga #3: Eje Simple - Doble Neumático

Radio: 9.65 (cm)
 Presión de Contacto: 586.0 (KPa)
 Espaciamiento Vertical: 33.0 (cm)

Módulo Elástico por Capa:

Capa 1: 2.635E+06 (KPa)
 Capa 2: 3.809E+05 (KPa)
 Capa 3: 3.226E+05 (KPa)
 Capa 4: 2.768E+05 (KPa)
 Capa 5: 1.886E+05 (KPa)
 Capa 6: 1.797E+05 (KPa)
 Capa 7: 1.734E+05 (KPa)
 Capa 8: 1.791E+05 (KPa)
 Capa 9: 1.760E+05 (KPa)
 Capa 10: 1.738E+05 (KPa)

(X,Y) (cm)	Z (cm)	Deflexión	Esfuerzos (KPa)				Deformaciones			
		ω_z (cm)	σ_z	σ_1	σ_2	σ_3	ϵ_z	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
(0.0, 0.0)	0.0	0.0323	586.04	1555.253	1451.56	586.04	-1.770E-04	3.196E-04	2.665E-04	-1.770E-04
	5.0	0.03193	400.136	400.228	-701.313	-757.043	3.456E-04	3.456E-04	-2.473E-04	-2.473E-04
	50.0	0.01412	35.132	36.182	-0.791	-3.435	2.100E-04	2.185E-04	-1.015E-04	-1.015E-04
(0.0, 9.65)	0.0	0.02955	292.221	959.294	415.344	292.221	-7.169E-05	2.701E-04	-8.610E-06	-7.169E-05
	5.0	0.02942	214.175	253.792	27.829	-424.133	1.287E-04	1.490E-04	-1.984E-04	-1.984E-04
	50.0	0.01471	37.733	37.911	-0.553	-3.573	2.268E-04	2.282E-04	-1.068E-04	-1.068E-04
(0.0, 16.5)	0.0	0.02718	10.839	469.981	10.839	-248.718	-2.528E-05	2.100E-04	-1.583E-04	-1.583E-04
	5.0	0.02735	90.25	548.559	90.25	-134.726	-2.072E-05	2.141E-04	-1.360E-04	-1.360E-04
	50.0	0.01479	38.529	38.529	-0.672	-3.786	2.325E-04	2.325E-04	-1.092E-04	-1.092E-04

En la Carga #4: Eje Tandem

Radio: 9.65 (cm)
 Presión de Contacto: 841.0 (KPa)
 Espaciamiento Horizontal: 124.5 (cm)
 Espaciamiento Vertical: 33.0 (cm)

Coordenadas introducidas para el cálculo del Módulo Elástico:

Coordenada X: 62.25 (cm)
 Coordenada Y: 16.5 (cm)
 Pendiente: 0.0

Número de capas No-Lineales y esfuerzos normales con esfuerzos geoestáticos:

Capa	Z (cm)	Esfuerzos por Carga (KPa)			Esfuerzos Geoestáticos (KPa)		Total (KPa)		
		σ_z	σ_x	σ_y	σ_v	σ_h	σ_z	σ_x	σ_y
2	9.17	0.828	7.233	1.304	1.98	1.188	2.808	8.421	2.492
3	17.5	3.284	17.416	0.459	3.45	2.07	6.734	19.486	2.529
4	25.83	6.92	27.291	-0.837	4.92	2.952	11.84	30.243	2.115
5	33.33	10.55	23.508	0.564	6.24	3.744	16.79	27.252	4.308
6	40.0	13.698	22.607	-0.077	7.42	4.452	21.118	27.059	4.375
7	46.67	16.422	20.737	-0.708	8.6	5.16	25.022	25.897	4.452
8	52.5	18.297	23.719	4.134	9.59	5.754	27.887	29.473	9.888
9	57.5	19.542	21.675	3.701	10.39	6.234	29.932	27.909	9.935
10	62.5	20.458	19.6	3.306	11.19	6.714	31.648	26.314	10.02

En la Carga #4: Eje Tandem

Radio: 9.65 (cm)
 Presión de Contacto: 841.0 (KPa)
 Espaciamiento Horizontal: 124.5 (cm)
 Espaciamiento Vertical: 33.0 (cm)

Módulo Elástico por Capa:

Capa 1: 2.635E+06 (KPa)
 Capa 2: 1.589E+05 (KPa)
 Capa 3: 2.015E+05 (KPa)
 Capa 4: 2.293E+05 (KPa)
 Capa 5: 1.650E+05 (KPa)
 Capa 6: 1.694E+05 (KPa)
 Capa 7: 1.722E+05 (KPa)
 Capa 8: 1.831E+05 (KPa)
 Capa 9: 1.835E+05 (KPa)
 Capa 10: 1.837E+05 (KPa)

(X,Y) (cm)	Z (cm)	Deflexión	Esfuerzos (KPa)				Deformaciones			
		w_z (cm)	σ_z	σ_1	σ_2	σ_3	ϵ_z	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
(0.0, 0.0)	0.0	0.06475	747.277	2822.215	2625.635	747.277	-4.400E-04	6.230E-04	5.223E-04	-4.400E-04
	5.0	0.06413	468.591	468.619	-1980.026	-2169.367	7.290E-04	7.290E-04	-6.225E-04	-6.225E-04
	50.0	0.02626	60.094	62.061	0.975	-0.257	3.428E-04	3.588E-04	-1.493E-04	-1.479E-04
(0.0, 9.65)	0.0	0.05895	416.371	1782.105	628.312	416.371	-1.622E-04	5.376E-04	-5.357E-05	-1.622E-04
	5.0	0.05853	292.8	305.323	-115.791	-1293.507	2.966E-04	3.031E-04	-5.161E-04	-5.161E-04
	50.0	0.02728	65.228	65.587	1.601	-0.244	3.749E-04	3.778E-04	-1.577E-04	-1.575E-04
(0.0, 16.5)	0.0	0.05403	0	866.502	0.0	-706.06	-2.131E-05	4.226E-04	-3.830E-04	-3.830E-04
	5.0	0.05413	178.412	1035.2	178.412	-613.625	1.171E-05	4.507E-04	-3.941E-04	-3.941E-04
	50.0	0.02745	66.469	66.5	1.615	-0.388	3.831E-04	3.834E-04	-1.603E-04	-1.605E-04
(62.25, 0.0)	0.0	0.02118	0	32.911	0.0	-60.387	3.650E-06	2.051E-05	-2.729E-05	-2.729E-05
	5.0	0.02118	0.091	53.337	23.581	0.044	-1.018E-05	1.710E-05	1.835E-06	-1.020E-05
	50.0	0.02102	16.342	18.174	17.113	-0.805	5.278E-05	6.767E-05	-8.039E-05	-8.666E-05
(62.25, 9.65)	0.0	0.02165	0	39.318	0.0	-63.404	3.199E-06	2.334E-05	-2.928E-05	-2.928E-05
	5.0	0.02168	0.033	57.185	24.047	0.024	-1.078E-05	1.850E-05	1.522E-06	-1.078E-05
	50.0	0.02147	17.319	19.349	17.457	-0.883	5.737E-05	7.388E-05	-8.952E-05	-9.064E-05
(62.25, 16.5)	0.0	0.02176	0	39.185	0.0	-65.975	3.558E-06	2.363E-05	-3.024E-05	-3.024E-05
	5.0	0.02178	0	57.955	24.164	0.0	-1.091E-05	1.878E-05	1.472E-06	-1.091E-05
	50.0	0.02144	17.529	19.597	17.529	-0.938	5.847E-05	7.528E-05	-9.171E-05	-9.170E-05

En la Carga #5: Eje Tridem

Radio: 9.65 (cm)
 Presión de Contacto: 668.0 (KPa)
 Espaciamiento Horizontal: 124.5 (cm)
 Espaciamiento Vertical: 33.0 (cm)

Coordenadas introducidas para el cálculo del Módulo Elástico:

Coordenada X: 124.5 (cm)
 Coordenada Y: 16.5 (cm)
 Pendiente: 0.0

Número de capas No-Lineales y esfuerzos normales con esfuerzos geoestáticos:

Capa	Z (cm)	Esfuerzos por Carga (KPa)			Esfuerzos Geoestáticos (KPa)		Total (KPa)		
		σ_z	σ_x	σ_y	σ_v	σ_h	σ_z	σ_x	σ_y
2	9.17	127.419	10.763	116.113	1.98	1.188	129.399	11.951	117.301
3	17.5	122.556	-12.472	38.427	3.45	2.07	126.006	-10.402	40.497
4	25.83	94.313	-17.523	3.023	4.92	2.952	99.233	-14.571	5.975
5	33.33	73.714	-1.431	5.232	6.24	3.744	79.954	2.313	8.976
6	40.0	60.17	0.525	1.889	7.42	4.452	67.59	4.977	6.341
7	46.67	50.034	1.763	0.207	8.6	5.16	58.634	6.923	5.367
8	52.5	43.332	9.208	6.197	9.59	5.754	52.922	14.962	11.951
9	57.5	38.693	9.061	5.251	10.39	6.234	49.083	15.295	11.485
10	62.5	34.83	8.911	4.59	11.19	6.714	46.02	15.625	11.304

En la Carga #5: Eje Tridem

Radio: 9.65 (cm)
 Presión de Contacto: 668.0 (KPa)
 Espaciamiento Horizontal: 124.5 (cm)
 Espaciamiento Vertical: 33.0 (cm)

Módulo Elástico por Capa:

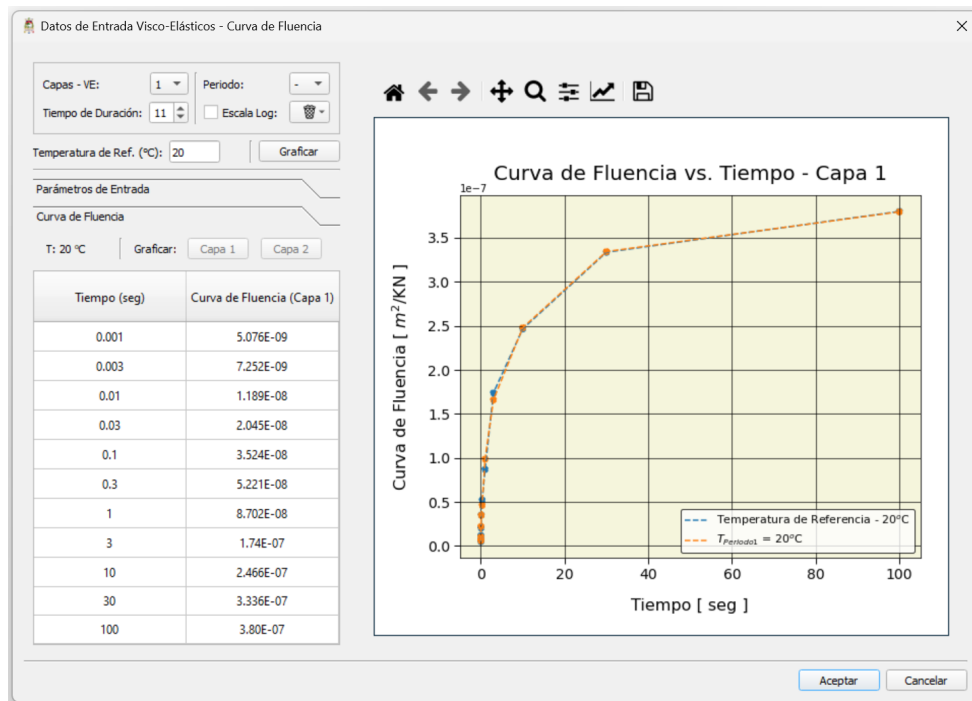
Capa 1: 2.635E+06 (KPa)
 Capa 2: 3.982E+05 (KPa)
 Capa 3: 3.396E+05 (KPa)
 Capa 4: 2.897E+05 (KPa)
 Capa 5: 2.003E+05 (KPa)
 Capa 6: 1.913E+05 (KPa)
 Capa 7: 1.850E+05 (KPa)
 Capa 8: 1.921E+05 (KPa)
 Capa 9: 1.890E+05 (KPa)
 Capa 10: 1.867E+05 (KPa)

(X,Y) (cm)	Z (cm)	Deflexión	Esfuerzos (KPa)				Deformaciones			
		w_z (cm)	σ_z	σ_1	σ_2	σ_3	ϵ_z	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
(0.0, 0.0)	0.0	0.04115	668.077	1709.424	1613.029	668.077	-1.878E-04	3.457E-04	2.963E-04	-1.878E-04
	5.0	0.04073	461.533	461.635	-757.343	-823.938	3.852E-04	3.852E-04	-2.734E-04	-2.734E-04
	50.0	0.02146	41.272	42.56	-0.426	-0.922	2.232E-04	2.330E-04	-9.622E-05	-9.608E-05
(0.0, 9.65)	0.0	0.03808	333.112	1046.599	463.302	333.112	-7.414E-05	2.914E-04	-7.440E-06	-7.414E-05
	5.0	0.03792	245.408	293.892	39.232	-460.909	1.427E-04	1.675E-04	-2.192E-04	-2.192E-04
	50.0	0.02213	44.313	44.565	-0.492	-0.649	2.414E-04	2.433E-04	-9.991E-05	-9.880E-05
(0.0, 16.5)	0.0	0.03543	10.94	495.875	10.94	-280.186	-2.450E-05	2.240E-04	-1.737E-04	-1.737E-04
	5.0	0.03562	101.151	617.397	101.151	-142.488	-2.469E-05	2.398E-04	-1.495E-04	-1.495E-04
	50.0	0.02222	45.232	45.273	-0.698	-0.777	2.476E-04	2.479E-04	-1.003E-04	-1.006E-04
(62.25, 0.0)	0.0	0.01973	0	38.224	0.0	-62.613	3.240E-06	2.282E-05	-2.884E-05	-2.884E-05
	5.0	0.01974	0.564	27.19	19.425	0.522	-5.972E-06	7.669E-06	3.679E-06	-5.994E-06
	50.0	0.0192	14.911	15.514	14.085	-0.708	5.038E-05	5.493E-05	-6.369E-05	-6.782E-05
(62.25, 9.65)	0.0	0.02014	0	45.09	0.0	-65.643	2.730E-06	2.583E-05	-3.090E-05	-3.090E-05
	5.0	0.02015	0.598	29.027	20.933	0.59	-6.408E-06	8.157E-06	4.008E-06	-6.412E-06
	50.0	0.01956	15.713	15.884	14.852	-0.851	5.429E-05	5.558E-05	-7.031E-05	-7.105E-05
(62.25, 16.5)	0.0	0.02023	0.026	45.435	0.026	-67.74	2.973E-06	2.624E-05	-3.175E-05	-3.175E-05
	5.0	0.02022	0.615	29.416	21.195	0.615	-6.489E-06	8.267E-06	4.055E-06	-6.489E-06
	50.0	0.01965	15.886	15.965	15.014	-0.882	5.514E-05	5.574E-05	-7.175E-05	-7.175E-05

D.4 Análisis combinado: Viscoelástico y no-lineal

En este caso para las capas no-lineales se trabaja con una subrasante considerada como arcilla, y para la capa viscoelástica se ha planteado una curva de fluencia con una temperatura de referencia de 20 °C, considerando solo a la primera capa con un comportamiento viscoelástico. La carga dinámica tiene una duración de 0.1 segundos.

D.4.0.1 Parámetros de capa



Propiedades No-Lineales de las Capas

Capa	Dividir	K ₀	Tipo
2	Capa/3	0.6	Granular
3	Capa/3	0.6	Granular
4	Capa/3	0.6	Arcilla

Espesor a dividir de la última capa (cm): 5

Propiedades por Temporada (KPa)

Capa	Periodo 1
2	68948
3	48263
4	85082

Propiedades por Temporada (KPa)

Capa	Periodo 1
4	52435

Material por... (Arcilla)

Coefficiente	Valor
K2	42.75
K3	1110
K4	178

Material por... (Granular)

Coefficiente	Valor
K2	0.317
K3	
K4	

D.4.0.2 Resultados

Los resultados completos del análisis se muestran en el siguiente archivo Drive.

<https://drive.google.com/drive/folders/1AiAN8njbDpFMJxYnBAhWsRJIGKEiI94K?usp=sharing>