UACM
Universidad Autónoma de la Ciudad de México
Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE TRANSPORTE URBANO

Determinación de un modelo de comportamiento mediante el empleo de parámetros mecánicos de materiales térreos que conforman una sección de la estructura de la vía terrestre que será empleada para la construcción del tramo 4 del Tren Maya

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE TRANSPORTE URBANO

PRESENTA

Miguel Ángel Cedillo Sánchez

Director de la Tesis

M. en I. Rubén Téllez Sánchez

Ciudad de México, enero de 2023.

UACM
Universidad Autónoma de la Ciudad de México
Nada humano me es ajeno

CA Coordinación Académica

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO
COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS©

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia en especial a mi hijo y mi esposa por ser el pilar más importante, que me han acompañado en momentos difíciles, y me has dado fuerza para salir adelante y llegar hasta esta etapa de mi vida, ellos son el motor para lograr todas mis metas que me propongo ya que ellos siempre estarán ahí conmigo.

Agradezco a mi director de tesis, el profesor Rubén Téllez Sánchez por ser mi guía académica y poder desarrollar este trabajo para titularme y por todo el apoyo que me brindo.

También quiero agradecer a mi mentor Fernando Shein Tiá Guadarrama Robles, gracias al he podido aprender muchas cosas nuevas profesionalmente y me ha guiado y motivado a seguir adelante y gracias a sus enseñanzas soy la persona profesionalmente que ahora soy.

También, quiero agradecer a mi amigo M. en C. José Darío Mejía Del Ángel, por apoyarme en desarrollar mi trabajo de investigación, por sus consejos, guía, su amistad y el apoyo incondicional que me ha brindado.

Agradezco a mi casa de estudios la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, por brindarme la oportunidad de estudiar, así como su apoyo para el empastado e impresión de mi tesis y durante mi estancia y al final de la misma, .

Agradezco a mis lectores los profesores Juan Gilberto Salas Márquez y José Castro Ramírez por brindarme su apoyo para poder terminar mi trabajo de investigación y poder seguir adelante en mi carrera profesional.

Finalmente agradezco a Geosol S.A. de C.V. por apoyarme con el desarrollo de este trabajo de investigación y brindarme la oportunidad de seguir.

Índice

Introducción..... 6
Justificación..... 8
Objetivo general..... 9
Objetivos particulares..... 9
Metodología..... 10
Hipótesis..... 25
Capítulo 1 Marco Teórico 26
1.1. Antecedentes del desarrollo del proyecto del Tren Maya Tramo 4..... 27
1.2. Marco Teórico de operación del Tren Maya 28
Capítulo 2 Reconocimiento geotécnico del terreno mediante Pozos a Cielo Abierto (PCA, mediciones directas)..... 31
2.1. Generalidades del reconocimiento geotécnico..... 32
2.2. Trabajos de caracterización y construcción de un perfil estratigráfico..... 32
2.2.1. Espesores de pavimento..... 42
2.2.2. Ensayos de laboratorio CBR..... 44
2.2.3. Ensayos complementarios..... 51
Capítulo 3 Mediciones de los desplazamientos verticales por impacto (Deflexiones)..... 55
3.1. Generalidades. Fundamentos teóricos..... 56
3.2. Deflexiones máximas normalizadas..... 57
3.3. Fundamentos y correlaciones..... 68
3.4. Módulo de elasticidad mediante software ELMO (retro cálculo)..... 69
3.4.1. Carpeta asfáltica, Base, Subbase y Subrasante 70
Capítulo 4 Comparación de resultados (construcción de correlaciones) para establecer un modelo de comportamiento de estructura térrea..... 73
4.1. Resultados de la comparación del modelo geotécnico (perfil estratigráfico y parámetros) con los resultados de retro cálculo..... 74
4.2. Propuesta de un modelo de comportamiento..... 98
Conclusión..... 100
Bibliografía..... 102

Índice de figuras

Figura 1. Delimitación de los sitios de trabajo (zona E)..... 12
Figura 2. Retiro de carpeta asfáltica..... 13
Figura 3. Formación de escalón a 0.50 m de profundidad..... 13
Figura 4. Levantamiento del perfil estratigráfico..... 15
Figura 5. Identificación de muestra..... 16
Figura 6. Relleno del PCA producto de la excavación..... 17
Figura 7. Conclusión de trabajos..... 18
Figura 8. Plato de carga y sensores para medir las deflexiones..... 22
Figura 9. FWD y vehículo remolque..... 23
Figura 10. Plato de carga y sensores de desplazamiento..... 23
Figura 11. Mapa de recorrido y estaciones del Tren Maya..... 27
Figura 12. Mapa del tramo IV del Tren Maya..... 29
Figura 13. Diagrama preliminar del tramo IV de la autopista 180 D..... 30
Figura 14. Ensayo de análisis granulométrico..... 34
Figura 15. Grafico de la curva granulométrica..... 35

Figura 16. Trayectoria húmeda – volumen de un suelo amasado…… 37
Figura 17. Equipo, prueba de límite de consistencia y contracción líneal…… 37
Figura 18. Carta de plasticidad…… 38
Figura 19. Diagrama de flujo para clasificación de suelo fino (50% o más que pase la malla No.200 (0.075 mm))…… 40
Figura 20. Diagrama de flujo para clasificación de suelo grueso (más del 50% que retiene la malla No.200 (0.075 mm))…… 40
Figura 21. Perfil estratigrafico Cuerpo A…… 41
Figura 22. Estructura típica de pavimento flexible…… 42
Figura 23. Espesores de pavimento…… 43
Figura 24. Gráfica CBR…… 48
Figura 25. Método de corrección de gráfica…… 48
Figura 26. Gráfica para obtener el valor de CBR…… 49
Figura 27. Valores obtenidos para de CBR para la base, Cuerpo A…… 50
Figura 28. Diagrama para elegir la varinte de compactación 52
Figura 29. Gráfica de compactación, para determinar la masa volumétrica máxima y contenido de agua óptimo…… 54
Figura 30. Esquema del proyecto conceptual del Tren Maya Tramo IV, propuesto por ICA. 56
Figura 31. Croquis de localización del tramo en estudio Carretera Kantunil - Cancún…… 58
Figura 32. Distribución del cuenco de deformación vertical al aplicar un pulso de fuerza sobre el pavimento…… 59
Figura 33. Diagrama típico de una cuenca de deflexión en un pavimento…… 59
Figura 34. *Fotografía del equipo HWD marca Dynatest*…… 61
Figura 35. *Diagrama esquemático de una prueba con el equipo HWD*…… 62
Figura 36. *Perfil de la Deflexión del Carril de Baja, Cuerpo A*…… 65
Figura 37. Perfil de la Deflexión del Carril de Alta, Cuerpo B…… 66
Figura 38. *Perfil de la Deflexión del Carril de Baja, Cuerpo B*…… 66
Figura 39. *Gráfico para la determinación del factor de corrección de deflexiones por temperatura para pavimentos con bases hidráulicas o estabilizadas con asfalto y/o cal…* 68
Figura 40. Gráfico para la determinación del factor de corrección de deflexiones por temperatura para pavimentos con bases estabilizadas con cemento…… 69
Figura 41. Autopista Mérida – Cancún Mex. 180 D cuerpo B, Croquis de localización…… 71
Figura 42. . *Deflexión Normalizada bajo la Carga. Los rangos de Aceptación o Rechazo esta en base a la Norma de la SCT N-CSV-CAR-1-03-010/17*…… 72
Figura 43. *Perfil de la Deflexión del Carril de Baja, Cuerpo A*…… 75
Figura 44. Perfil de la Deflexión del Carril de Alta, Cuerpo B…… 76
Figura 45. Perfil de la Deflexión del Carril de Baja, Cuerpo B…… 76
Figura 46. Gráfica de Zonas Homogéneas del Cuerpo A, Carril de Baja…… 78
Figura 47. Gráfica de Zonas Homogéneas del Cuerpo B, Carril de Alta…… 79
Figura 48. *Gráfica de Zonas Homogéneas del Cuerpo B, Carril de Baja*…… 80
Figura 49. Estratigrafía del cuerpo A carril de Baja…… 82
Figura 50. Estratigrafía del cuerpo B carril de Alta…… 82
Figura 51. *Estratigrafía del cuerpo B carril de Baja*…… 83
Figura 52. *Estratigrafía del cuerpo A carril de Baja, con la nueva capa y nuevo espesor*…… 85
Figura 53. Estratigrafía del cuerpo B carril de Alta, con la nueva capa y nuevo espesor…… 86
Figura 54. Estratigrafía del cuerpo B carril de Baja, con la nueva capa y nuevo espesor…… 88

Figura 55. *Módulos de Elasticidad para la Carpeta Asfáltica + Base Hidráulica y Subbase del Cuerpo A, Carril de Baja. E (Mpa)*…… 90
Figura 56. *Módulos de Elasticidad para la Capa Terraplén del Cuerpo A, Carril de Baja. E (Mpa)*…… 90
Figura 57. *Módulos de Elasticidad para la Capa Terraplén del Cuerpo A, Carril de Baja. E (Mpa)*…… 90
Figura 58. . *Módulos de Elasticidad para la Capa Terraplén del Cuerpo B, Carril de Alta. E (Mpa)*…… 91
Figura 59. *Módulos de Elasticidad para la Carpeta Asfáltica + Base Hidráulica y Subbase del Cuerpo B, Carril de Baja. E (Mpa)*…… 91
Figura 60. *Módulos de Elasticidad para la Capa Terraplén del Cuerpo B, Carril de Baja. E (Mpa)*…… 91
Figura 61. *Comparativa de los Módulos Característicos de los 3 criterios aplicados al retrocálculo (Carpeta Asfáltica)*…… 96
Figura 62. *Comparativa de los Módulos Característicos de los 3 criterios aplicados al retrocálculo (Base Hidráulica)*…… 96
Figura 63. *Comparativa de los Módulos Característicos de los 3 criterios aplicados al retrocálculo (Sub-Base)*…… 96
Figura 64. *Comparativa de los Módulos Característicos de los 3 criterios aplicados al retrocálculo (Sub-Rasante)*…… 97
Figura 65. Gráfica de comportamiento de CBR vs Deflexión Máxima dr…… 99

Índice de Tablas

Tabla 1. Relación de material y equipo para la ejecución de los PCA…… 11
Tabla 2. Masa mínima de la muestra de ensayo…… 34
Tabla 3. Juego estándar de mallas para gravas…… 35
Tabla 4. Juego estándar de mallas para arenas…… 35
Tabla 5. Terminología del tipo de suelo…… 39
Tabla 6. Criterios para la clasificación SUCS…… 39
Tabla 7. Energía de compactación por unidad volumetrica /kg/cm^2)…… 45
Tabla 8. Características de equipo y ensayo 51
Tabla 9. Rangos de Valores Representativos de Deflexiones (mm)…… 63
Tabla 10. *Rangos de Aceptación del Índice de Capa BLI*…… 63
Tabla 11. Rangos de Aceptación del Índice de Capa MLI…… 64
Tabla 12. Rangos de Aceptación del Índice de Capa LLI…… 64
Tabla 13. Rangos de Aceptación del Radio de Curvatura…… 64
Tabla 14. Estructura del Pavimento del Cuerpo B carril de Baja, con respecto a las zonas homogéneas…… 74
Tabla 15. *Resultado de Deflexiones Máxima por Zona Homogénea del Cuerpo A, Carril de Baja*…… 79
Tabla 16. Resultado de Deflexiones Máxima por Zona Homogénea del Cuerpo B, Carril de Alta…… 80
Tabla 17. Resultado de Deflexiones Máxima por Zona Homogénea del Cuerpo B, Carril de Baja…… 81
Tabla 18. *Estructura del Pavimento del Cuerpo A carril de Baja, con respecto a las zonas homogéneas*…… 82

Tabla 19. Estructura del Pavimento del Cuerpo B carril de Alta, con respecto a las zonas homogéneas…… 82
Tabla 20. Estructura del Pavimento del Cuerpo B carril de Baja, con respecto a las zonas homogéneas…….. 83
Tabla 21. Cálculo del Espesor Equivalente Cuerpo A, C. Baja. Espesores dados en (cm)…….. 85
Tabla 22. Espesor Equivalente Cuerpo A, C. Baja. Espesores dados en (cm)…….. 85
Tabla 23. *Cálculo del Espesor Equivalente Cuerpo B, C. Alta. Espesores dados en (cm)…….* 86
Tabla 24. Espesor Equivalente Cuerpo B, Carril de Alta. Espesores dados en (cm)…….. 86
Tabla 25.Cálculo del Espesor Equivalente Cuerpo B, C. Baja. Espesores dados en (cm)…… 87
Tabla 26. *Espesor Equivalente Cuerpo B, Carril de Baja. Espesores dados en (cm)……* 87
Tabla 27. *Módulos Semilla……* 89
Tabla 28. *Factor de Ajuste para Capas de Base o Subbase Granular…….* 93
Tabla 29. Factor de Ajuste para Suelos de Subrasante…….. 93
Tabla 30. *Factor de Ajuste para suelos de Subrasante Fino – Granulares……..* 93
Tabla 31. *Módulos Característicos para el Criterio 1……..* 94
Tabla 32. *Módulos Característicos para el Criterio 2……..* 94
Tabla 33. *Módulos Característicos para el Criterio 3……* 95
Tabla 34. Comparativa de los módulos característicos…… 95

Introducción

El presente trabajo de investigación se ha desarrollado para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería de Sistemas de Transporte Urbano, y se fundamenta en el proyecto del tren Maya tramo IV, que se realizaron trabajos en el tramo carretero Kantunil – Cancún correspondiente a la Carretera Federal México 180D Mérida – Cancún, el tramo evaluado corresponde al proyecto ejecutivo del Tramo IV del Tren Maya.

El Tren Maya es un proyecto orientado a incrementar la demanda económica del turismo en la Península de Yucatán mediante un servicio de transporte de pasajeros eficiente por confiable y una red ferroviaria de transporte de carga moderno que permita crear empleos, impulsar el desarrollo sostenible, proteger el medio ambiente de la zona y proporcionar el ordenamiento territorial de la región, tendrá un recorrido de 1 525 kilómetro, pasará por los estados de Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo e interconectará las principales ciudades y sitios turísticos de la Península de Yucatán. La mayor parte de su ruta pasará por derecho de vía ya existentes, como vías férreas, carreteras y tendidos eléctrico. Por tal motivo el análisis se basa en la información recabada en la estructura de pavimento tanto no destructiva de deflexiones con equipo HWD (Heavy Weight Deflectometer), así como destructiva (pozo a cielo abierto, PCA), para poder determinar correlaciones válidas para conocer el estado estructural actual del pavimento del cuerpo A y B de la carretera federal Mérida – Cancún, que será empleada para la construcción del tramo IV del Tren Maya.

Capítulo 1 contiene los antecedentes del desarrollo del Tren Maya Tramo IV, el cual se aprovechará la infraestructura ya existente de la Autopista 180 D Mérida – Cancún que contempla el uso de uno de los cuerpos de la infraestructura para sustentar la plataforma de la vía férrea y el marco teórico de operación del Tren Maya en el que se aprovechará el derecho de vía de la carretera para poder mejorar la conectividad entre Cancún y Mérida que son dos de los principales centros de población de la península, reduciendo el tiempo de recorrido entre ellas.

Capítulo 2 se realizó un reconocimiento geotécnico de la estructura de pavimento mediante Pozos a Cielo Abierto (PCA) los cuales son mediciones directas para poder tener la caracterización de los materiales y con ello poder construir un perfil estratigráfico conociendo los espesores del pavimento, y apoyándonos en ensayos del laboratorio.

Capítulo 3 se realizó un reconocimiento geotécnico de la estructura mediante mediciones no destructivas empleando el equipo de deflexiones Heavy Weight Deflectometer (HWD) , y empleando un software especializado (ELMOD) para determinar los módulos de elasticidad de las capas que conforman la estructura del pavimento donde se evaluó en ambos sentidos de la carretera federal Mérida – Cancún y con ello poder determinar el comportamiento de la estructura de pavimento que está asociada a la capacidad que tiene para soportar las cargas de los vehículos pesados, produciendo una pérdida lenta y progresiva de la capacidad de soporte de la estructura donde será empleado para construir la vía del tren Maya Tramo IV.

Finalmente, el capítulo 4 se realizará una comparación de los resultados obtenidos mediante las mediciones no destructivas HWD y destructivas PCA, para poder construir y establecer un modelo de comportamiento de la estructura térrea, para atender las necesidades de diversas organizaciones (públicas y/o privadas), para la construcción y rehabilitación para la conservación de la infraestructura.

Justificación

A lo largo de vida útil de un pavimento se van presentando distintos grados de deteriodo debido a múltiples causas, principalmente a la acción del tránsito y a las condiciones climaticas entre otros, lo que hace llevar acabo trabajos de conservación con el fin de mantener en buen estado tanto la superficie de rodamiento como la capacidad estructural para la que fue diseñado, minimizando los sobecostos de operación en los que incurriría el transporte al transitar por carreteras en mal estado superficial por ello el Instituto Mexicano de Transporte desarrolla un sistema de administación o gestión de pavimentos dando herramientas útiles al Sector Comunicaciones y Transporte, involucradas en la evaluacuón y conservación de los pavimentos que conforman la red federal de carreteras en México.

Es importante hacer notar que el sistema de evaluaciones de pavimentos constituyen a una base fundamental, y proporciona datos que alimentarán a cualquier sistema de administración de la conservación, por lo cual la SCT propone alternativas de solución de tramos evaluados que contemplan 5, 10 y 15 años solamente, en virtud a lo anterios el sistema de evaluación de pavimentos, es importante señalar que la evalución estructural involucra la determinación de la amplitud de un pavimento para soportar un tránsito sin presentar deformaciones acumuladas mayores a 3.5 cm al final de su vida útil, la evalución estructural se estima tanto en condición presente de pavimento como en su vida de servicio futura.

En dichas evaluaciones de realizan en campo de las deflexión que el pavimento presenta, bajo la aplicación de carga estándar y con el procedimiento propuesto por el Instituto Norteamericano del Asfalto.La deflexión tolerable se establece de acuerdo con los criterios del Departamento de Transporte del Estado de California, con base al espesor de carpeta existente sin agrietamiento y el índice de tránsito de diseño.Tomando en cuenta la información de la evaluación estructural no destructiva y pruebas de laboratorio con base a los críterios en las normas ASTM-D-2487-11 (CBR) y AASHTO 1993, se establecen una alternativa para el desarrollo del proyecto del tren maya en su tramo IV

Objetivo General

Establecer elementos y técnicas que permitan desarrollar modelos de comportamiento para una evaluación estructural de una estructura de pavimento, a partir del análisis de información de ensayos directos a materiales y uso de software especializado para determinación de parámetros mecánicos.

Objetivos Particulares

- Analizar la información de los trabajos en campo para poder construir un perfil estratigráfico.
- Determinar los espesores de pavimento.
- Analizar la información realizada en el laboratorio para caracterizar la estructura de pavimento.
- Analizar la información de campo mediante el uso de las mediciones de desplazamiento verticales por impacto (Deflexiones).
- Determinar los módulos de elasticidad mediante el software ELMOD (retro cálculo), de las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento.
- Comparar los resultados obtenidos para establecer un modelo de comportamiento de la estructura térrea.

Metodología

Preliminares.

Las especificaciones del proyecto van sujetas a la solicitud de servicio que el cliente solicite, en dicha solicitud contiene la información y cantidad necesaria para poder desempeñar los trabajos necesarios, en ese documento indica la cantidad de Pozos a Cielo Abierto programados, ubicación de cada uno o criterio a seguir, asignación de la identificación del Pozo a Cielo Abierto, profundidad de muestreo, pruebas a realizar y el tiempo de entrega de información.

Recopilación de información

En primer lugar, se hará la recopilación y análisis de la información disponible sobre la ejecución de los trabajos, es decir, se deberá generar un plano con la ubicación de los sondeos a ejecutar, mismo que se buscará superponer con un plano existente de los accesos, caminos e infraestructura en general, con la que pudiera llegar a contar el sitio, para poder definir las distancias entre sondeos con los puntos de interés. Esta información podrá ser generada a partir de las coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator) de los sondeos que proporcione el cliente

Reconocimiento del sitio.

Una vez analizada la información mencionada, se realizará un reconocimiento detallado del sitio de los trabajos, a fin de identificar los accesos, tipo y condiciones de los caminos existentes, así como las restricciones físicas o de permisos que pudieran tener cada uno de ellos.

También se deberán ubicar los puntos a estudiar con ayuda de un plano del lugar en donde se realizarán los trabajos, así como de un GPS de mano. Se deberá anotar si los puntos se encuentran balizados o si dichos puntos corresponden a la ubicación que señalen las coordenadas, o se encuentren en zonas inundadas que impidan el acceso y la ejecución de los trabajos. En todo momento se notificará al cliente de las condiciones observadas.

Frentes de trabajo

Con base a la información recopilada en los puntos anteriores, se procederá a establecer frentes de trabajo y número de brigadas a ingresar en consideración del programa de trabajo que se presenta en la Propuesta Técnica.

Método directo.

En este método de exploración se obtienen muestras que sirven para conocer las propiedades físicas, mecánicas del suelo, se obtienen muestras representativas y muestras alteradas de cada uno de los estratos.

Ejecución de Pozos a Cielo Abierto (PCA)

Material y equipo para la ejecución del PCA

A continuación, se menciona el equipo y material necesario para la correcta ejecución de PCA, cualquier material no contemplado en el presente listado no inhibe la correcta ejecución de los trabajos.

Material	Equipo
Flexómetro de 5 m.	Cortadora de pavimento
Carpa con lona	Bailarina compactadora
Costales de polipropileno	Rotomartillo
Cordel	Generador de Energía
Bolsas de polietileno	Estufa o soplete
Lona ahulada (1.5X1.5 m)	Tanque de gas (10 kg)
Etiquetas para muestras	Pala cuadrada
Banderolas	Zapapico
Chalecos reflejantes	Barreta
Cucharon capacidad 1L.	Cucharón capacidad 1L.
Brea y/o parafina	Cámara fotográfica
Manta de cielo	GPS de mano
Extensión Eléctrica	Traficonos y/o trafitambos

Tabla 1 Fuente: Elaboración propia. Relación de material y equipo para la ejecución de PCA.

Delimitación de sitio de los trabajos (zona E)

Una vez ubicado el sitio de los trabajos mediante un GPS de mano, se realizará la delimitación de la zona a excavar (zona E) mediante dispositivos de canalización (traficonos y/o trafitambos) para protección en zonas de obras viales. El propósito de los dispositivos de canalización es encauzar el tránsito de vehículos y peatones, así como indicar cierres, estrechamientos y cambios de dirección ocasionados por dichos trabajos (ver figura 1).



Figura 1 Fuente: elaboración propia. Delimitación de los sitios de trabajo (zona E).

Procedimiento – Excavación del PCA.

Se colocará una carpa con lona, la cual tiene como objetivo proporcionar protección a la excavación de las condiciones ambientales de sitio tales como lluvia, sol, polvo, entre otros.

Se retirará la carpeta asfáltica, realizando cortes en el pavimento con forma rectangular (1.00 X 1.50 m como mín.) mediante una cortadora de pavimento.



Figura 2 Fuente: elaboración propia. Retiro de carpeta asfáltica.

Una vez retirado el pavimento existente se realizará la excavación del material subsecuente; las dimensiones deberán permitir las operaciones de labrado y extracción de muestras, con un avance sensiblemente vertical con ayuda de herramientas manuales (zapapico y pala). Es recomendable formar escalones con el mismo material a medida que se va profundizando la excavación de PCA para el ingreso y salida del personal al fondo de la excavación. En caso de que la profundidad de la excavación exceda 1.5 veces la mayor dimensión del PCA (profundidad>2.25 m.) se procederá a colocar un dispositivo de seguridad en dicha excavación mediante el apuntalamiento de las paredes con polines de madera.



Figura 3 Fuente: elaboración propia. Formación de escalón a 0.50 m de profundidad.

En caso de que el nivel de aguas freáticas se encuentre a un nivel somero, se intentará abatir manualmente para extraer alguna de las muestras. Si después de un cierto tiempo no se logra abatir el nivel freático (NAF) esto se anotará en el registro de campo. Finalmente se deberá reportar el nivel de aguas freáticas en el registro del PCA

Procedimiento- Levantamiento de perfil estratigráfico y medición de espesores de los estratos.

Una vez alcanzada la profundidad deseada, que dependerá de lo solicitado por el cliente, por la dureza del material o por la elevación del NAF, se limpiará una de las paredes de la excavación con una brocha o cepillo de cerdas, cuando la superficie de la pared esté completamente limpia se realizará el levantamiento del perfil estratigráfico de dicha pared, para esto se identifican visualmente los cambios de material por lo coloración de estos.

Con ayuda de herramienta manual (espátula) se obtendrá una porción representativa de cada estrato identificado visualmente. A cada muestra representativa se le realizarán las pruebas de identificación visual y al tacto que se integran en las normativas NMX-C-416-ONNCCE-2003 y ASTM D 2488-09a, Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual Manual Procedure).

Una vez identificadas las interfaces entre estratos se realizará la medición de sus espesores, utilizando un flexómetro tal y como se aprecia en la Figura 4.

En el registro de PCA se anotará el tipo de material encontrado por estrato, así como la profundidad en la que se localizó dicho estrato.



Figura 4 Fuente: elaboración propia. Levantamiento del perfil estratigráfico.

Procedimiento - Muestreo

Una vez identificados los estratos se procede a realizar el muestreo con forme a lo indicado en la norma mexicana NMX-C-467-ONNCCE-2013 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION - GEOTECNIA - MATERIALES PARA TERRACERÍAS - MÉTODOS DE MUESTREO. Estas actividades se realizan con las condiciones ambientales del lugar y las peculiaridades se anotarán en el registro del PCA.

El muestreo se realiza en las condiciones ambientales de lugar, y el propósito de muestreo es determinar la estratigrafía y se obtiene en una de las paredes o frente abierto del PCA una muestra alterada representativa (MR) por cada estrato, con una masa mínima de 4 kg, colocada en una bolsa de polietileno, con el objeto de evitar la pérdida del contenido de agua natural y dos costales de tejido cerrado 50 kg aproximadamente cada uno, para poder realizar los ensayes descrito en el concepto de los trabajos del laboratorio, dichas muestras son utilizadas para determinar la caracterización del material que está conformada la estructura de pavimento y con ello conocer sus propiedades índice de los suelos muestreados, para su posterior clasificación, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Procedimiento-Número de identificación de Muestras

Cada muestra obtenida se identifica con dos etiquetas, una en el interior y otra en el exterior, donde se detalla el tipo de sondeo, profundidad, número de

muestra y tipo, espesor del estrato, tipo y descripción del material, número de servicio, carretera, kilometraje, cuerpo, nivel freático (cuando exista), además de realizar un registro del pozo a cielo abierto.

El número de identificación de la muestra se asigna de acuerdo con el siguiente criterio:
Número de sondeo iniciando en 01 por obra.
Número de muestra (s) obtenida (s) por sondeo iniciando en 1.



Figura 5 Fuente: elaboración propia. Identificación de muestra.

Transporte y Almacenamiento de las muestras.

El transporte y almacenamiento de las muestras del sitio de su obtención al laboratorio en acomodar las bolsas o los recipientes de tal modo que se evite su perforación o ruptura, así como su desplazamiento dentro del vehículo.

Una vez recibidas las muestras en el laboratorio, el personal encargado registra las muestras asignándoles un número de identificación y almacenar en un área asignada que estará limpia y seca; se colocarán ordenadamente sobre una tarima a 15 cm del suelo, como mínimo, para permitir el paso del aire.

Conclusión de los trabajos de campo (PCA)

Una vez concluido el muestreo se procede a realizar el relleno del PCA con el mismo material producto de la excavación.

El relleno se hará por medio de capas no mayores a 10 cm de espesor entre capa y capa; el material se compactará con medios mecánicos (bailarina), se seguirá este procedimiento hasta alcanzar el nivel de desplante de la carpeta asfáltica (ver Figura 6).



Figura 6 Fuente: elaboración propia. Relleno del PCA producto de la excavación.

En caso de no ser suficiente el material producto de la excavación, se utilizará material de banco para relleno con el propósito de alcanzar el nivel de desplante de la carpeta asfáltica.

Cuando el material ya este compactado y al nivel de desplante se alcance, se realizará un riego con una emulsión asfáltica (riego de impregnación o riego de liga) sobre la superficie del material compactado del PCA.

Posteriormente se colocará mezcla asfáltica en frío, en capas no mayores de 5 cm de espesor, entre capa y capa, dicho material será compactado con medios mecánicos (bailarina) este proceso se seguirá hasta alcanzar el nivel del pavimento actual (ver Figura 7).



Figura 7 Fuente: elaboración propia. Conclusión de trabajos.

Presentación Informe Técnico

Se elaborará un informe técnico que comprenderá lo siguiente:

1. Descripción de los trabajos,

Se entregará un informe donde se describirán los trabajos ejecutados en el sitio, así como un plano de ubicación de los sondeos ejecutados, con algunas observaciones particulares de cada sondeo. Asimismo, se anexará un reporte fotográfico por sondeo.

Método indirecto

Con base a la propuesta de ejecución de las pruebas de deflectómetro en el cuerpo A en donde se tendrá la vía férrea, se considera la carga de diseño por el eje del proyecto, por lo tanto, deberá emplearse una carga mayor en la prueba del deflectómetro HWD que debe de estar entre 15 y 20 toneladas.

Se estableció una serie de pruebas de carga para establecer la metodología de trabajo, bajo las necesidades expuestas por el proyectista y con el equipo HWD Dynatest tomando en cuenta sus capacidades.

Factores que afectan o influencian los valores de la cuenca de deflexiones

Temperatura

Todos los materiales son susceptibles a los gradientes térmicos, debido a esto el valor de la deflexión deberá someterse a una normalización de temperatura base, con el fin de obtener valores comparados y sobre todo poder calificarlos.

Humedad

Debido a la naturaleza de los equipos de medición y la naturaleza de la estructura de pavimentos, se recomienda que se efectúen en época de estiaje, y sin presencia de lluvia.

Esfuerzo

El esfuerzo aplicado por el equipo no es constante entre mediciones, por lo que el valor obtenido de cuenca de deflexión está comprometido. Por lo que el esfuerzo aplicado será objeto de una normalización contra un esfuerzo base.

Medición de Deflexiones

- Las coberturas de los trabajos de campo consistirán en la medición de deflexiones mediante equipo Heavy Weight Deflectometer (HWD)
- La medición de deflexiones se hará de la siguiente manera:
- A cada 100 m sobre carril de baja al centro de carril
- Carga 150 KN
- Plato de carga para la distribución de esfuerzo de 30 cm de diámetro.
- La distribución de sensores de desplazamiento vertical será de la siguiente manera

D1 0 cm (µm)	D2 20 cm (µm)	D3 30 cm (µm)	D4 45 cm (µm)	D5 60 cm (µm)	D6 90 cm (µm)	D7 120 cm (µm)	D8 150 cm (µm)

- Se darán 2 impactos por posición.
- Cada una de las lecturas de Deflexión deberán contener sus coordenadas geográficas (latitud, longitud y elevación) y Universal Transverse Mercator (UTM). Indicando la zona geográfica correspondiente.
- Las mediciones de Deflexión se deberán iniciar y terminar en los puntos indicados en el Programa de campo, esto con la finalidad de abarcar la totalidad de la longitud a auscultar. Deberá realizarse una medición en el punto de término, independientemente de la distancia a la que haya quedado el ensaye inmediato anterior

- Se deberán identificar los kilómetros inicial y final del tramo carretero.
- En caso de que sea imposible medir, se deberá registrar el incidente por el cual no se midió (reconstrucción, rehabilitación, modernización, conservación, accidente, etc.) en la bitácora de incidencias de campo y tomar fotografías de la incidencia reportada.
- Los trabajos se realizarán durante el día, fuera de las horas pico de tránsito vehicular. Asimismo, las mediciones no se deberán realizar en presencia de elementos contaminantes que puedan interferir en la obtención de resultados.
- La evaluación se deberá realizar estrictamente en los carriles estipulados, sin cambiar de carril; en caso fortuito de cambio de carril se debe registrar en la bitácora de medición.
- Para los tramos en donde se presenten trabajos de reparación, construcción o mantenimiento, se deberá de identificar su ubicación (coordenadas), y tomar fotografías en sitio para la generación de un informe fotográfico que muestre el motivo por el cual no se realizó la evaluación.
- Se tomará fotografías con vista de la superficie de rodamiento en el punto de medición (relacionada con el poste de kilometraje y coordenadas geográficas). y una de la vista en general o panorámica de la carretera.

Metodología de Medición

- Antes de iniciar los trabajos, se deberá realizar a diario el procedimiento de calentamiento del equipo HWD y la verificación de todos y cada uno de los sistemas (Voltajes, planta de luz, gasolina, aceite, aceite del equipo HWD, etc.), en un lugar adecuado para ello y verificar la comunicación entre el sistema CP15 con la computadora. (Esta actividad se puede realizar en algún lugar que sea adecuado y no obstruya el tránsito vehicular)
- Una vez realizado el punto anterior, se preparará el archivo de campo donde se registrarán los datos de deflexiones, dicho archivo deberá contener la siguiente información: nombre de la carretera, nombre del inicio y final del tramo, Carril-sentido y cuerpo, kilómetro de inicio y km final.

- Creado el archivo de campo, deberán Trasladar el equipo al sitio de prueba y alinear el plato de carga con el punto de aplicación del impacto. En la medida de lo posible, el sitio deberá estar libre de partículas de roca, desperdicios, basura, etc., a fin de asegurar que el plato de carga y los sensores hagan el contacto correctamente. En todo momento el equipo "HWD" deberá estar acompañado por el o los vehículos piloto, para la protección del mismo y del personal de campo.
- Para cada punto de medición se deberán realizar las siguientes acciones:

    a. Registrar la distancia con respecto al origen del tramo carretero o autopista, con base en las lecturas del dispositivo DMI (Distance Measuring Instrument), asociándolo con sus coordenadas geográficas y UTM (Universal Transverse Mercator).

    b. Medir y registrar las temperaturas del aire y de la superficie del pavimento. Verificar la firmeza y estabilidad de la superficie en medición, haciendo descender el plato de carga y los sensores hasta que entren en contacto con el pavimento.

    c. Aplicar el impacto de asentamiento, considerando la altura de caída 1 que se marca en el equipo.

    d. Producir un impacto considerando la altura de caída que se marca en el equipo, de tal manera que se genere un impacto mayor o igual al esfuerzo solicitado, registrando el valor del impacto y de la deflexión resultante en cada uno de los sensores."
- Repetir el impacto anterior y comparar las deflexiones obtenidas en ambas mediciones. La diferencia entre los resultados no deberá ser mayor de 3% en cualquiera de los sensores y serán registradas en la bitácora de medición. Cuando la diferencia sea mayor de 3%, se tendrán que repetir las pruebas y registrar la justificación técnica de la variación en la bitácora.
- Durante la medición se deberán revisar las pantallas y verificar que las deflexiones sobre todo del sensor 8 ubicado a 150 mm respecto al sensor 1 ubicado bajo la carga.
- Una vez efectuadas las deflexiones con el equipo HWD, el conductor del auto remolque avisará por radio a los conductores de los vehículos piloto

que podrán avanzar al siguiente punto; verificando en todo momento que, durante el recorrido de un punto a otro, el plato de carga nunca se quede abajo ya que podría dañarse.

- Al llegar al segundo punto se debe repetir la operación de medición.
- Es conveniente mencionar que en las zonas donde existan puentes NO SE DEBERÁ REALIZAR MEDICIÓN en el claro de la estructura. En caso de que la longitud del claro se menor al intervalo de medición, bastará con recorrer ligeramente el sitio del ensaye. En caso de que el claro sea mayor al intervalo de medición, se realizarán mediciones en los terraplenes de acceso (aproches) al inicio y término del puente, retomando el cadenamiento con la secuencia original después del ensaye el término de la estructura. Por otro lado, en el caso de que alguna medición, llegue a caer sobre una alcantarilla la prueba tendrá que realizarse unos metros antes o después de esta.

Personal y equipo de medición

Debido a que las mediciones requieren que el equipo se quede inmóvil por unos segundos, convirtiéndose en un obstáculo para los vehículos en operación, siempre dispone de un vehículo escolta el cual desvía el flujo vehicular a través de una señal luminosa, rótulos de precaución y la indicación de un banderero (ver Figura 8 a 10).



Figura 8 Fuente: elaboración propia. Plato de carga y sensores para medir las deflexiones.



Figura 9 Fuente: elaboración propia. FWD y vehículo remolque.

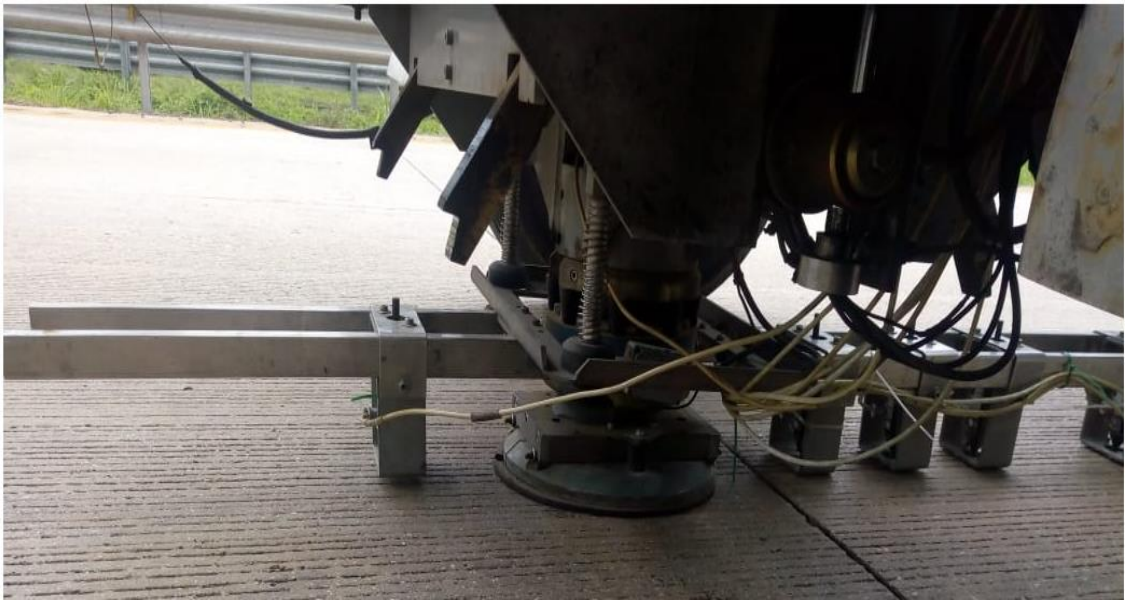


Figura 10 Fuente: elaboración propia. Plato de carga y sensores de desplazamiento.

El equipo para atender los trabajos en el Tramo 4 del Tren Maya son:

- Dynatest HWD-085 placa remolque C-33-56
- Camioneta de remolque instrumentada: Silverado placa JV-57-840
- Camioneta de escolta: Silverado placa NNR-58-42

Para la ejecución de estas mediciones se requiere de una brigada compuesta por: jefe de brigada (operador equipo), un operador del vehículo de arrastre (remolque), operador del vehículo escolta y un banderero.

Informe y presentación de resultados

Se entregará un informe donde se incluye de forma tabular los resultados de la evaluación en campo, incluyendo como mínimo los siguientes apartados.

1. Identificación del tramo
2. Descripción general de los trabajos efectuados
3. Resumen de resultados de la evaluación
4. Resumen fotográfico.
5. Acreditación de la vigencia de la calibración y verificación del equipo.

Programa de pruebas

- Alcance de 4,340 puntos de deflexión con una separación de cada 100m lineales.
- Se establece un periodo de medición en campo de 8 horas diarias. Con un rendimiento de 25 km/día (250 puntos de deflexión)
- Días laborales: lunes a viernes jornada completa y sábado media jornada.
- Día de descanso: Domingos.
- El alcance será logrado en un periodo de 22 días naturales.
- Fecha tentativa de inicio: 21 de agosto de 2020.
- Fecha tentativa de fin, estudio en campo: 12/09/2020.
- Fecha tentativa de entrega de informe de resultados (7 días): 18/09/2020

Hipótesis

Los resultados obtenidos en el laboratorio desarrollan un comportamiento mecánico el cual se puede representar a través de un modelo de comportamiento.

La comparación de resultados favorables de laboratorio y campo produce un modelo de comportamiento el cual predice en que situación se encuentra la estructura de pavimento que será empleada para el desarrollo de la construcción de la infraestructura del Tren Maya Tramo IV.

Capítulo 1

Marco Teórico.



1.1. Antecedentes del desarrollo del proyecto del Tren Maya Tramo IV

El proyecto de Tren Maya es un proyecto de infraestructura económica que consiste en construir y operar la infraestructura de un tren que conecta la región del sur sureste de la república.

El proyecto se compone de 7 tramos, que plantean el siguiente recorrido:

- Tramo 1, denominado Selva 1, Palenque Escárcega, con una longitud aproximada de 228 km.
- Tramo 2, denominado Golfo 1, Escárcega – Límite del estado Campeche, con una longitud aproximada de 235 km.
- Tramo 3, denominado Golfo 2, Límite del Estado de Campeche – Izamal, con una longitud aproximada de 172 km.
- Tramo 4, denominado Golfo 3, Izamal – Cancún, con una longitud aproximada de 257 km.
- Tramo 5 parte norte, denominada Caribe 2, Cancún – Playa del Carmen, con una longitud aproximada de 49.8 km.
- Tramo 5 parte sur, denominada Caribe 2, Playa del Carmen – Tulum, con una longitud aproximada de 60.3 km.
- Tramo 6, denominada Caribe 1, Tulum – Bacalar, con una longitud aproximada de 254 km.
- Tramo 7. Denominado Selva 2, Bacalar – Escárcega, con una longitud aproximada de 287 km.

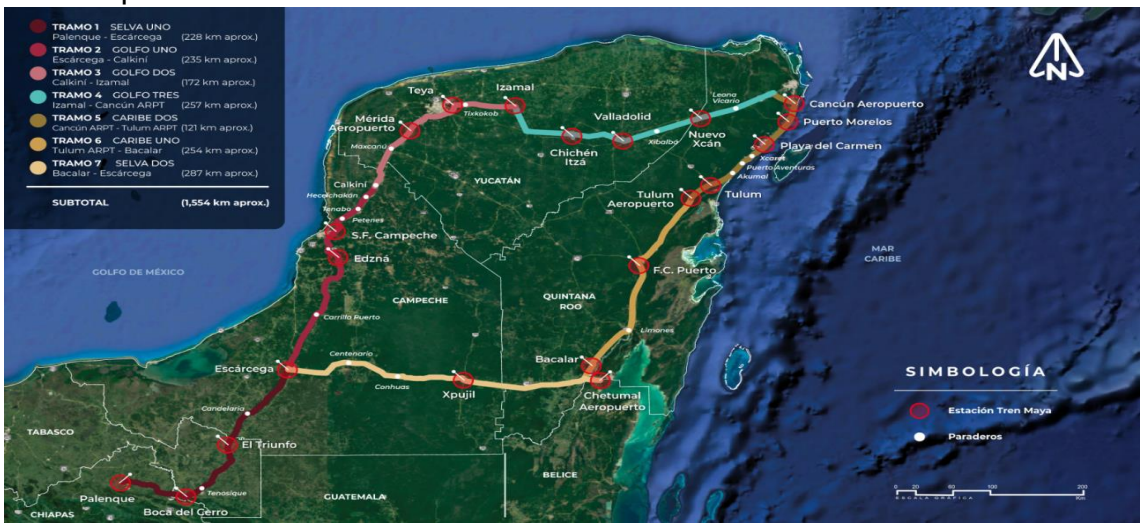


Figura 11. Fuente: Trazo Tren Maya-GobMX. Mapa de recorrido y estaciones del proyecto Tren Maya.

El tramo IV correrá sobre el trazo de la Autopista 180 D Mérida – Cancún. El aprovechamiento de la infraestructura existente de la autopista contempla el uso del cuerpo A de la carretera para sustentar la plataforma de la vía férrea, considerando que dicha plataforma ya cuenta con un terraplén consolidado y se aprovechará el derecho de vía para alojar los espacios requeridos para el funcionamiento y construcción de la doble vía del Tren Maya.

El recorrido del proyecto del Tren Maya consiste en aproximadamente 1502 km de vía con 30 estaciones localizadas en grandes ciudades y poblados de la región, además de contar con señalización y sistemas de telecomunicaciones y el material rodante que incluye 30 locomotoras y 180 carros de pasajeros; patios de encierro y talleres. El tramo IV albergará 3 estaciones intermedias: Chichén Itzá, Valladolid y El Tintal.

1.2. Marco Teórico de operación del Tren Maya.

El tren maya tendrá un recorrido principal de 250 km, y contiene un ramal para conectar a la estación de Chichén Itzá, con una longitud de 7.2 kilómetros, obteniendo una longitud total del tramo de aproximadamente 257 kilómetros. El tramo albergará 3 estaciones intermedia: Chichén Itzá, Valladolid y El Tinta (véase figura 2).

El inicio del tramo sitúa en concreto al sur de la localidad de Izamal por donde transita por una alineación en dirección oeste – este, aprovechando el derecho de vía de la carretera federal 180 D Mérida – Cancún, desde el km 76+000 situado a la altura de la localidad de Kantunil, hasta el final de la vía, en la confluencia de esta carretera con la avenida de Huayacan, situada en el extremo oeste de los terrenos ocupados por las instalaciones del aeropuerto de Cancún, el trazo posibilita utilizar el derecho de vía ya liberado de la autopista, a su vez implica la utilización del cuerpo derecho de la autopista (dirección Mérida – Cancún, cuerpo A), por lo que este cuerpo se tendrá que reponer ampliando el cuerpo izquierdo de la autopista (dirección Cancún – Mérida, cuerpo B).



Figura 12 Fuente: elaboración propia con ArcGis. Mapa de tramo IV del Tren Maya.

Con la afectación y reposisción mencionadas, la autopista continuaría siendo un A4 (dos carriles por sentido), pero sin franja separadora central, separados con una barrera tipo New Jersey, por lo que la velocidad de circulación no se verá afectada, asimismo, una de las principales afectaciones a la infraestructura existente de la autopista son todas las obras de drenaje, pasos inferirores vehiculares y entronques, ya que el gálibo vertical den tren es de 7.5 m miesntras que para una carrera es de 5.5 m, por lo que todas las estructuras se tendrían que elevar para cumplir con la normativa del tren.

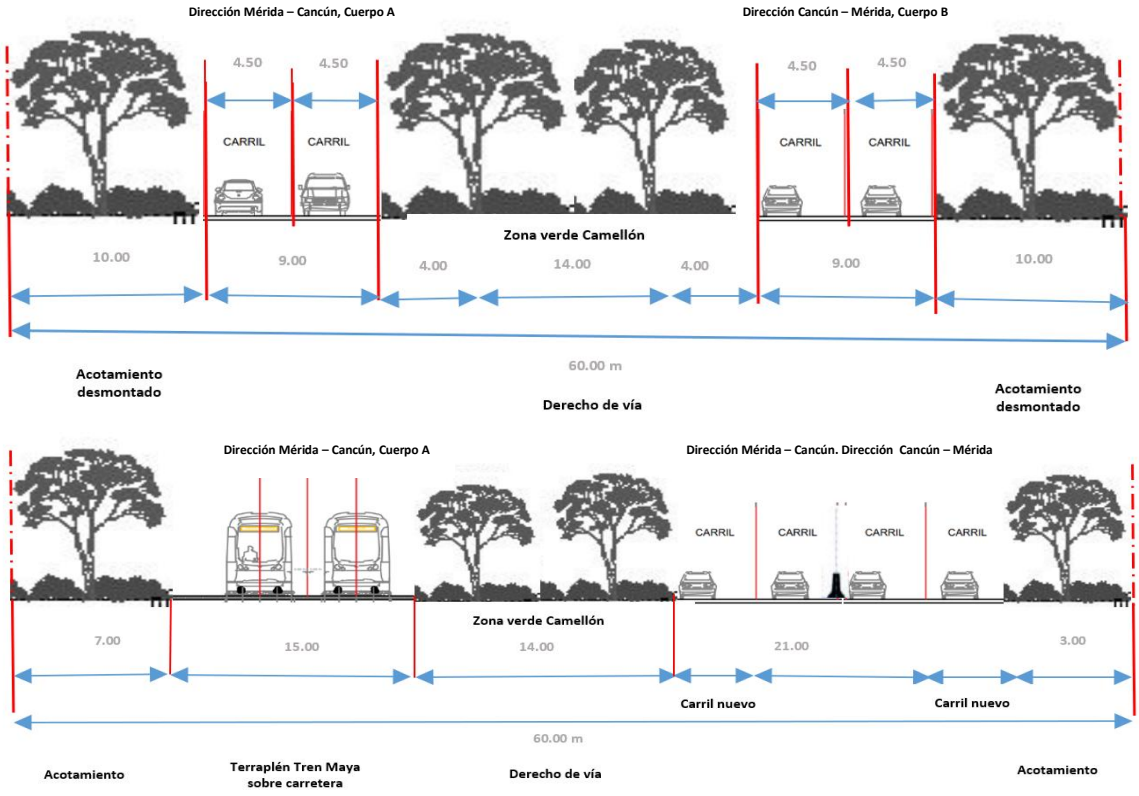


Figura 13 Fuente: Elaboración propia. Diagrama preliminar tramo IV sobre la autopista 180 D

Como se ha mencionado anteriormente en el diagrama se aprecia uno de los cuerpos de la autopista Mérida – Cancún, va a ser empleado para la construcción del tren maya correspondiente al cuarpo A y el cuerpo B se le va a hacer una ampliación de dos carriles adicionales.

Capítulo 2

Reconocimiento geotécnico del terreno mediante Pozos a Cielo Abierto (PCA, mediciones directas).



2.1. Generalidades del reconocimiento geotécnico

El reconocimiento geotécnico que se desarrolló en los trabajos realizados para la ejecución de Pozos a Cielo Abierto (PCA), con el fin de tomar muestras alteradas representativas (MR) de cada estrato, para observar y levantar un perfil estratigráfico de sus paredes.

Dichas excavaciones deben de tener un área mínima de 1.00 x 1.50 m, con separaciones y profundidades variables, los cuales dependen de la zona donde se ubique el sitio en estudio, del material encontrado y de la importancia del proyecto.

La información recabada de dichos sondeos (clasificación visual y al tacto, espesores de los estratos, etc.) serán de suma importancia en términos cuantitativos para estimar el comportamiento del subsuelo.

Las muestras alteradas optenidas por cada estrato nos ayudará mediante ensayos de laboratorio poder caracterizar el material que está conformada la estructura de pavimento y con ello conocer sus propiedades índices de los suelos muestreados, para su posterior clasificación, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

2.2. Trabajos de caracterización y construcción de un perfil estratigráfico.

Los trabajos desempeñados para poder desarrollar la caracterización del material que conforma una estructura de pavimento evaluada en la autopista 180 D Mérida – Cancún que será empleada para la contrucción del Tren Maya Tramo IV, se utilizará un sistema que nos permita categorizar y clasificar el suelo en base a su comportamiento más probable y permita diferenciar gravas, arena, limos y arcilla.

Este método de clasificación representa un lenguaje de comunicación, de tal forma que nos sea posible distinguir los suelos encontrados a partir de su comportamiento.

El sistema de clasificación de suelos no elimina la necesidad de realizar ensayos más sofisticados para poder determinar ciertas propiedades del suelo. Sin embargo, las propiedades índice y de clasificación nos permite tener una idea general de suelo para ser usado en una aplicasión en particular, su comportamiento durante la construcción y bajo cargas estructurales, durante la vidad útil del proyecto.

El comportamiento de los suelos es muy complejo, y por ende, se emplea un sistema de clasificasión de suelo (SUCS), que está regido por la norma ASTM D-2487. Que fue propuesta inicialmente por Arthur Casagrande en 1932, y adoptada por el departamento de Ingeniería de los EEUU en 1942, y se presentó definitivamente a la American Sociaty of Civil Engineers el cual se emepezó a emplear en 1953. Está basada en el análisis granulométrico y en los límites de Atterberg (límites líquidos y plásticos) de los suelos.

El sistema divide entre suelos grueso y suelos finos, considerando el porcentaje que pasa por la malla No. 200 (0.075 mm). Si menos del 50% en masa del suelo pasa por dicha malla, entonces se considera un suelo grueso, y a su vez se sub-clasifica en arenas y gravas por medio de la malla No. 4 (4.75 mm). Caso contrario, el suelo es considerado fino, y se sub-clasifica en limo o arcilla según los valores obtenidos en el límite líquido e índice plástico.

Las pruebas desarroladas en el laboratorio a las muestras obtenidas en campo se llevan a cabo bajo normas vigentes, y procedimientos desarrollados por el mismo labaratorio, esto es para asegurar que la calidad de los ensayos y su confiablidad en los resultados obtenidos.

Los ensayos para poder determinar una clasificación SUCS estan basados en el análisis granulométrico, y límites de consistencia, los resultados obtenidos de dichas pruebas nos permite caracterizar el suelo analizado.

El análisis granulométrico nos permite conocer el tamaño de las diferentes partículas que componen el suelo analizado, y se realiza mediante un juego de mallas estandarizadas de diferentes aberturas.

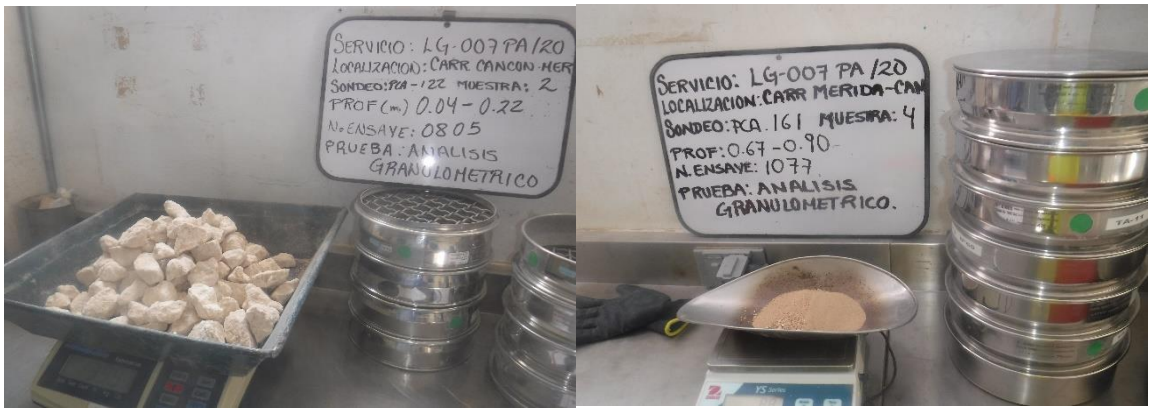


Figura 14. Fuente: elaboración propia. Ensayo de análisis granulométrico.

Para poder realizar el ensayo se toma una muestras seca obtenida mediante cuarteos, este proceso se realiza para obtener la cantidad de masa mínima para realizar el ensayo, con apoyo de la tabla 2, podemos saber la masa mínima que se debe de tener para realizar el proceso de análisis granulométrico, tomando en cuenta el tamaño nominal el cual se define como la malla inmediata superior a la primera malla que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie estándar de mallas y este valor es obtenido en el proceso de la preparación de la muestra.

Tamaño máximo nominal, aberturas cuadradas mm (pulgadas)	Masa mínima de la muestra de ensayo (kg)
9.5 (3/8”)	1.0
12.5 (1/2”)	2.0
19.0 (3/4”)	5.0
25.0 (1”)	10.0
37.5 (1 ½”)	15.0
50.0 (2”)	20.0
75.0 (3”)	30.0

Tabla 2 Fuente: norma NMX-C-496-ONNCCE-2014, Industria de la Construcción- Geotecnia – Materiales para Terracerías – Determinación de la Composición Granular. Masa mínima de la muestra de ensayo.

Una vez obtenida la muestra representaiva mediante cuarteos, se procede a tamizar dicha muestras a través de una serie de mallas estándar ver tabla 3 y 4.

Mallas para composición granular de gravas	
Designación (pulgadas)	Abertura nominal (mm)
3	75.0
2	50.0
1 ½	37.5
1	25.0
¾	19.0
½	12.5
3/8	9.5
¼	6.3
No. 4	4.75

Tabla 3. Fuente: norma NMX-C-496-ONNCCE-2014, Industria de la Construcción- Geotecnia – Materiales para Terracerías – Determinación de la Composición Granular. Juego de mallas estándar para gravas.

Mallas para composición granular de arenas	
Designación	Abertura nominal (mm)
No. 10	2.000
No. 20	0.850
No. 40	0.425
No. 60	0.250
No. 100	0.150
No. 200	0.075

Tabla 4. Fuente: norma NMX-C-496-ONNCCE-2014, Industria de la Construcción- Geotecnia – Materiales para Terracerías – Determinación de la Composición Granular. Juego de mallas estándar para arenas.

Este proceso nos permite obtener los retinidos por cada malla los porcentajes de dichos valores permiten construir una gráfica donde en el eje de las abscisas representa el tamaño de las partículas, expresado en mm, y el eje de las ordenadas representa el material que pasa, expresado en %.

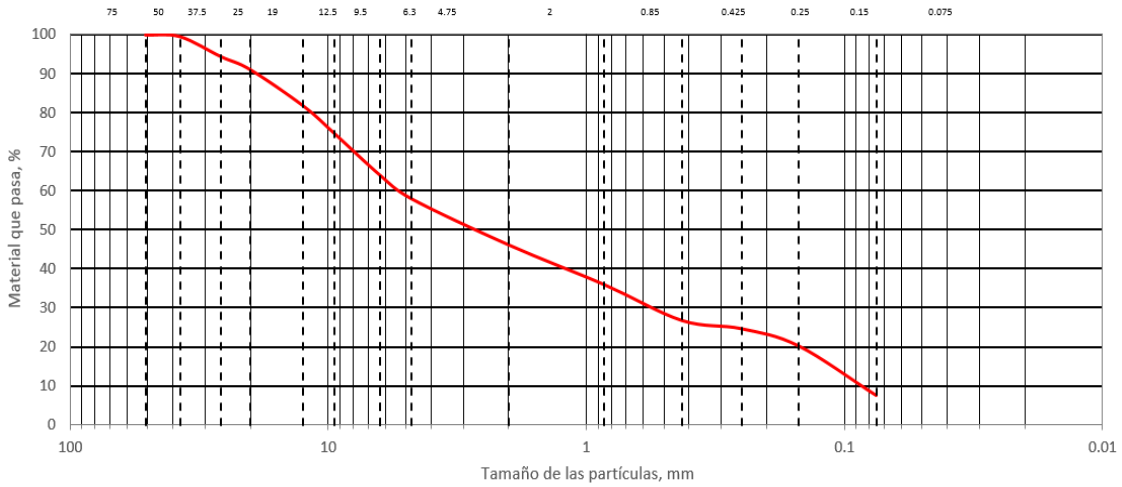


Figura 15. Fuente: elaboración propia. Grafico de la curva granulométrico.

Dichas gráfica nos permite obtener mediante la ecuación 1, el Coeficiente de uniformidad (Cu) el cual mide qué tan uniforme es la muestra, y se considera que el suelo con Cu inferior a 4 es mal graduado en el caso de las gravas y un Cu inferior a 6 en el caso de las arenas.

(1)

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Además, de obtener el Coeficiente de curvatura, el cual es un indicador del equilibrio relativo que existe entre los diferentes rangos y tamaños de la partículas de los suelos y se calcula mendiente la ecuación 2.

(2)

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60} * D_{10})}$$

Donde:

D_{10}: Es el tamaño de las partículas para cual el 10% del material es menor que este tamaño, determinado gráficamente de la curva granulométrica mm.

D_{30}: Es el tamaño de las partículas para cual el 30% del material es menor que este tamaño, determinado gráficamente de la curva granulométrica mm.

D_{60}: Es el tamaño de las partículas para cual el 60% del material es menor que este tamaño, determinado gráficamente de la curva granulométrica mm.

Y se considera que el suelo con Cc inferior a 1 y mayor a 3, mal graduado este criterio es en ambos casos ya sea para gravas o arenas. Si el suelo analizado cumple con los dos criterios (Cu y Cc), se considera que el material esta bien graduado.

El límite de Atterberg o límites de consistencia, nos permite definir la resistencia del suelo a ser deformado por las fuerzas que se le aplican sobre él, y caracterizar del tipo de suelo y sus propiedades.

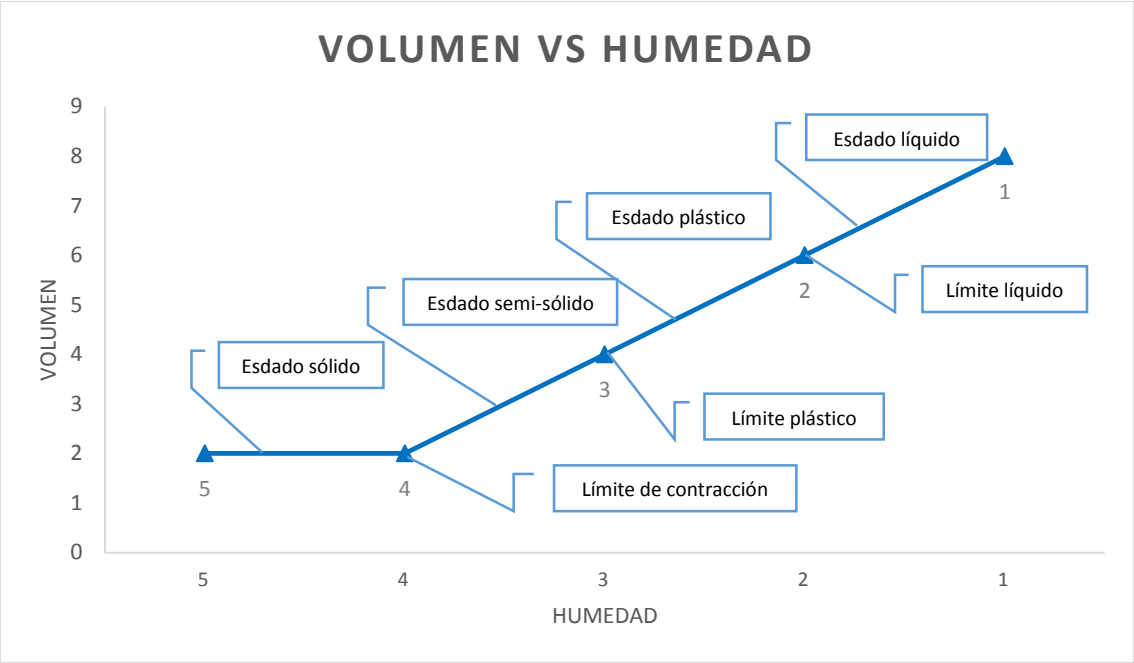


Figura 16. Fuente: Elaboración propia. Trayectoria húmeda - volumen de un suelo amasado

El límite establecido por Atterberg para diferenciar los distintos estados de consistencia se deben obtener a partir de las fracción que pasa por la malla No. 40 (0.425 mm), el cual establece una trayectoria húmeda – volumen de un suelo amasado. La frontera entre el estado sólido y semisólido se llama límite de contracción y se define como la humedad presente al haber añadido agua suficiente para llenar todos los vacíos, la frontera entre los estados semisólido y plástico se llama límite plástico y se obtiene cuando el suelo empieza a agrietarse en churros de 3 mm de diámentro. A la forntera entre el límite plástico y líquido se le llama límite líquido y se determina midiendo la cantidad de agua que contien el suelo cuando con 25 golpes se cierra una ranura de 13 mm de longitud mediante un aparato normalizado llamado copa de casagrande.



Figura 17. Fuente: elaboración propias. Equipo, prueba de límite de consistencia y contracción líneal

Una vez obtenido los resultados del límite líquido a los 25 golpes y el promedio del límite plástico se calcula el índice plástico mediante la ecuación 3.

(3)

$$Ip = Ll - Lp.$$

Donde:
Ip: Índice plástico
Ll: Límite líquido
Lp: Límite plástico

Los valores obtenidos se gráfican en la carta de plásticidad, donde el eje de las abscisas representa el Límite líquido a 25 golpes, expresado en % y el eje de las ordenadas representa el Índice plástico.

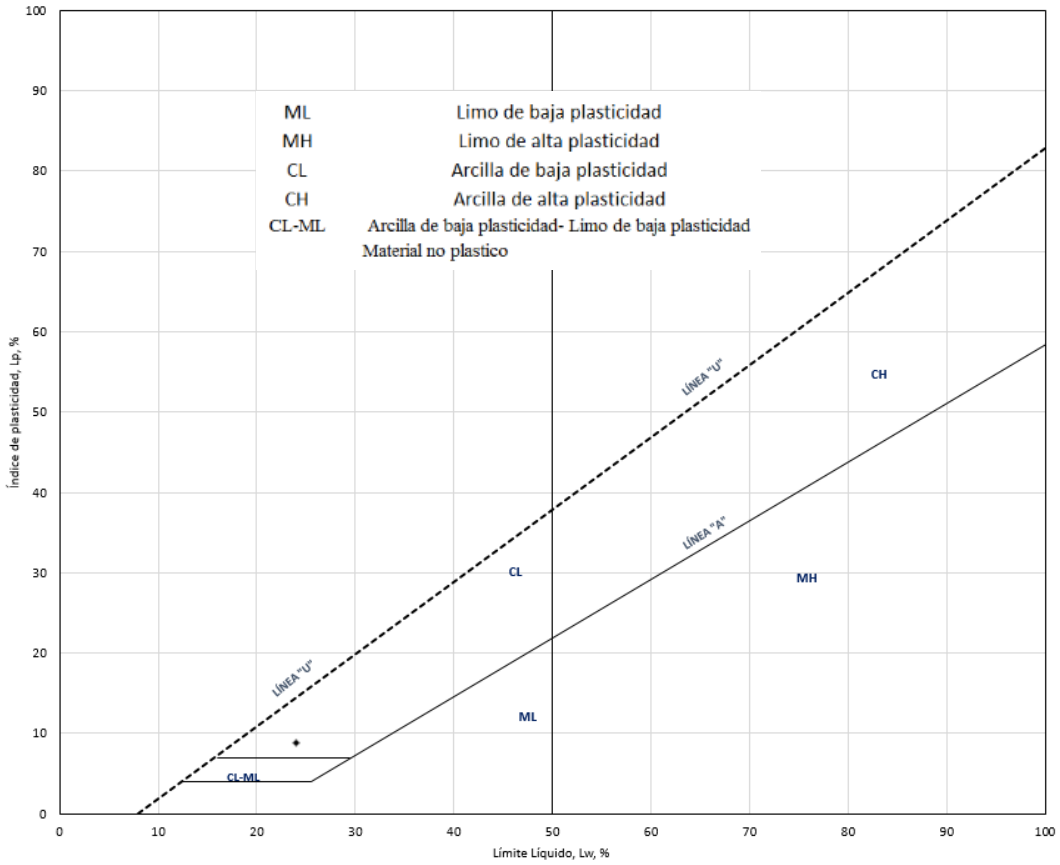


Figura 18. Fuente: Elaboración propia. Carta de plasticidad

Para poder clasificar un suelo se emplea el sistema de clasificación de suelos (SUCS), se debe saber el tipo de suelo, prefijo, subgrupo y sufijo, el cual esta empleado mediante la siguiente tabla.

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
GRAVA	G	Bien graduado	W
AREMA	S	Mal graduado	P
LIMO	M	Limoso	M
ARCILLA	C	Arcilloso	C
ORGANICO	O	Baja plasticidad	L
		Alta plasticidad	H

Tabla 5. Fuente: Elaboración propia. Terminología del tipo de suelo.

Para la clasificasión se toman criterios, los cuales se deben de analizar los porcentajes que pasan de suelo por la malla No.200 (0.075 mm), si el porcejante que pasa en la malla No.200 es mayor al 50% se considera un suelo fino, pero si el porcentaje que pasa por la malla No.200 es menor al 50% entonces se considera un suelo grueso.

En el caso de que un suelo es mayor al 50% que pasa la malla No.200, se debe clasificar conforme a la carta de plásticidad, para poder determinar el tipo de suelo fino que se esta estudiando, en caso contrario si la muestras es menor al 50% que pasa la malla No.200, se debe analizar en la malla No.4 (4.75 mm), que porcentaje es mayor si las arenas o gravas para poder saber, estos porcentajes se obtienen mediante el ensayo de análisis granulométrico y con apoyo de la norma ASTM D2487-11, nos dice que:

Finos < 5%		**5%<Finos<12%**		**12%<Finos**	
Arenas	Gravas	Arenas	Gravas	Arenas	Gravas
SP	GP	SP-SM	GP-GM	SM	GM
SW	GW	SP-SC	GP-GC	SC	GC
		SW-SM	GW-GM		
		SW-SC	GW-GC		

Tabla 6. Fuente: Elaboración propia, ASTM D2487-11. Criterios para clasificación SUCS.

Mediante a los digramas de flujo que la norma ASTM D2487-11, contiene nos apoyaremos para poder obtener la clasificasión final de nuestro suelo.

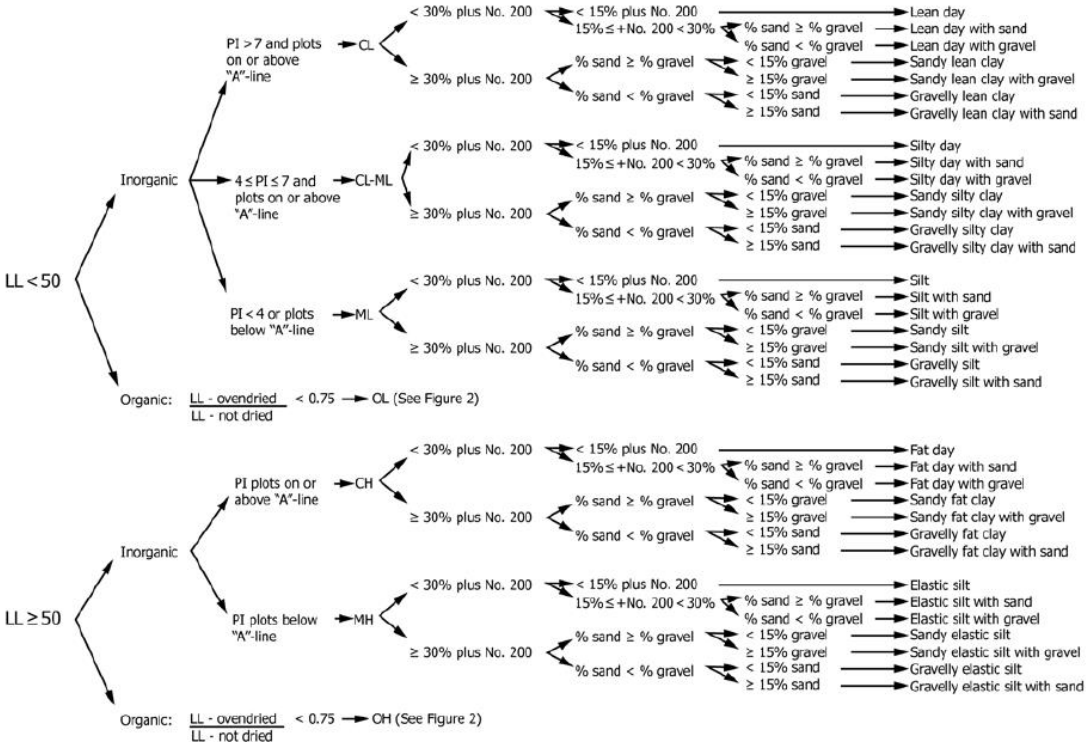
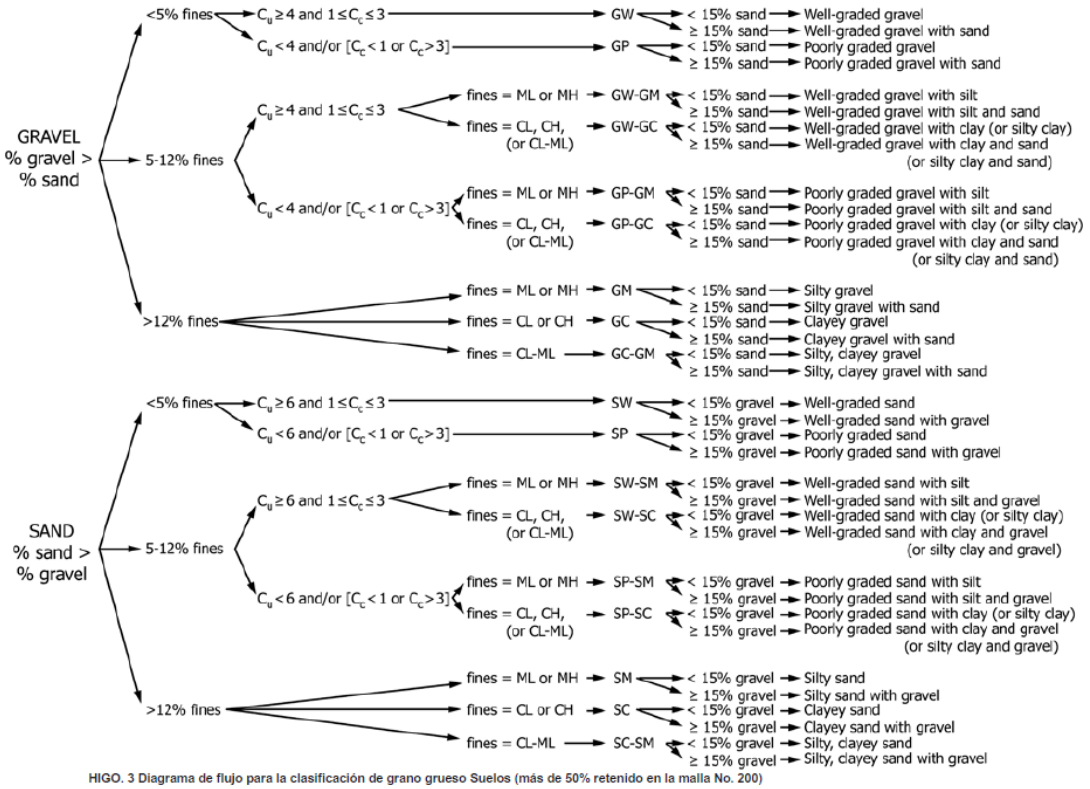


Figura 19. Fuente: ASTM D2487-11. Diagrama de flujo para clasificación de suelo fino (50% o más que pase la malla No. 200 (0.075 mm)).



HIGO. 3 Diagrama de flujo para la clasificación de grano grueso Suelos (más de 50% retenido en la malla No. 200)

Figura 20. Fuente: ASTM D2487-11. Diagrama de flujo para clasificación de suelo grueso (más del 50% que retiene la malla No. 200 (0.075 mm)).

Con esta información podemos determinar la clasificación de nuestra estructura de pavimento que va a conformar el Tren Maya Tramo IV, y poder construir nuestro perfil estratigrafico.

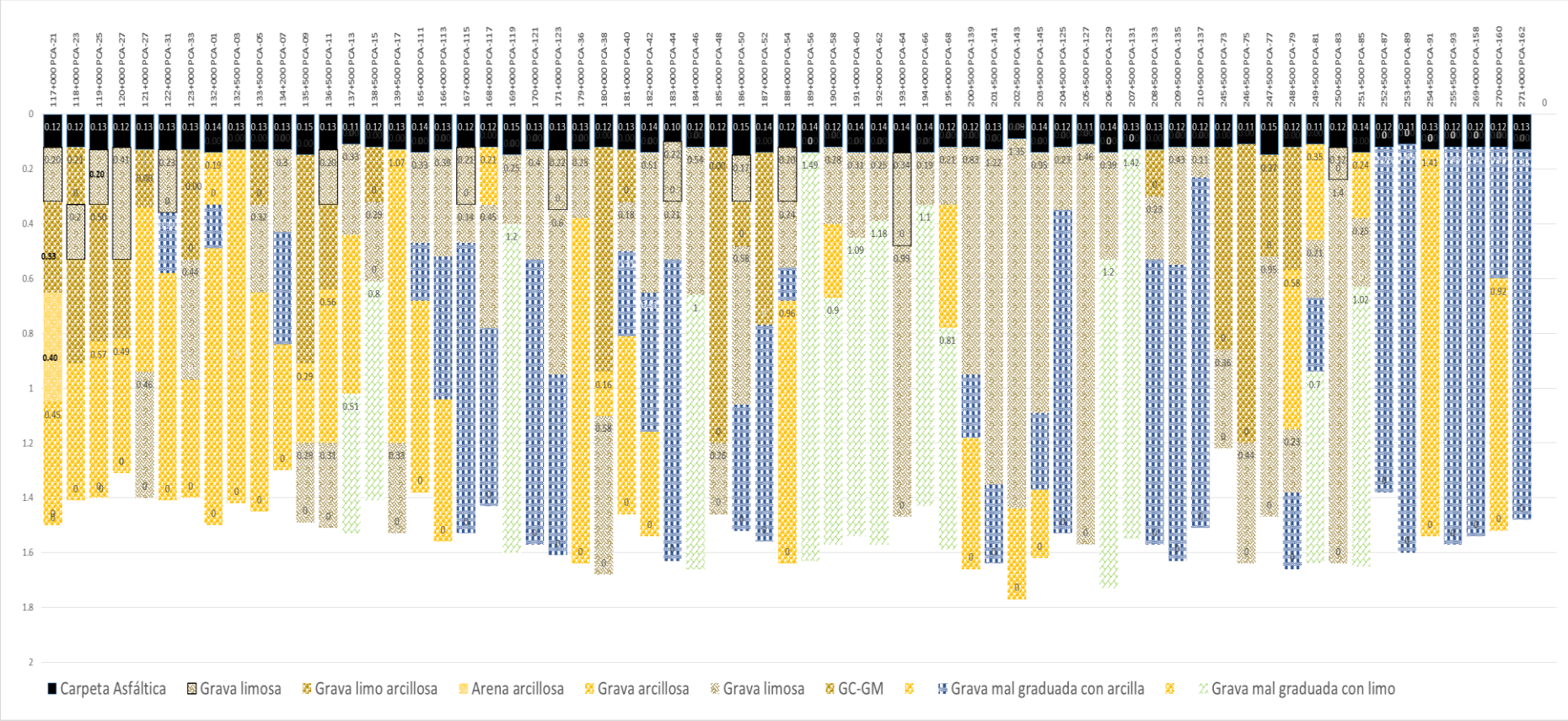


Figura 21 Fuente: Elaboración propia. Perfil estratigráfico Cuerpo A

2.2.1. Espesoros de pavimento

Considerados los materiales de los cuales esta construida la estructura de pavimento los cuales se denominan materiales gruesos (arenas, gravas, fragmentos de rocas), que construye un primer grupo, siendo el segundo el formado por los suelos finos, cuyo arquetipo son los materiales arcillosos.

Deberá reconocerse que para pavimentos flexibles, la estructura de varias capas esta diseñado de acuerdo al número estructural SN" sobre la capa subrasante o cuerpo del terraplén.

El espesor máximo permitido de cualquier capa depende del diseño que se empleo por cada tramo carretero, esto puede variar el espesor y el número de capas; como pueden ser carpeta asfáltica, base, subbase, Subrasante, térraplen o terreno natural.

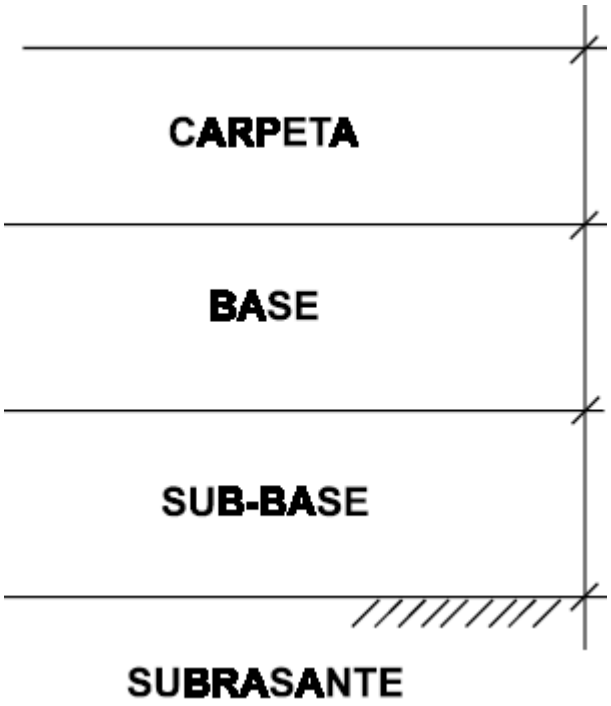


Figura 22 Fuente: pavimentos flexibles. Estructura típica de un pavimento flexible.

Los espesores determinados en la estructura de pavimento en el Tren Maya Tramo IV son los siguientes:

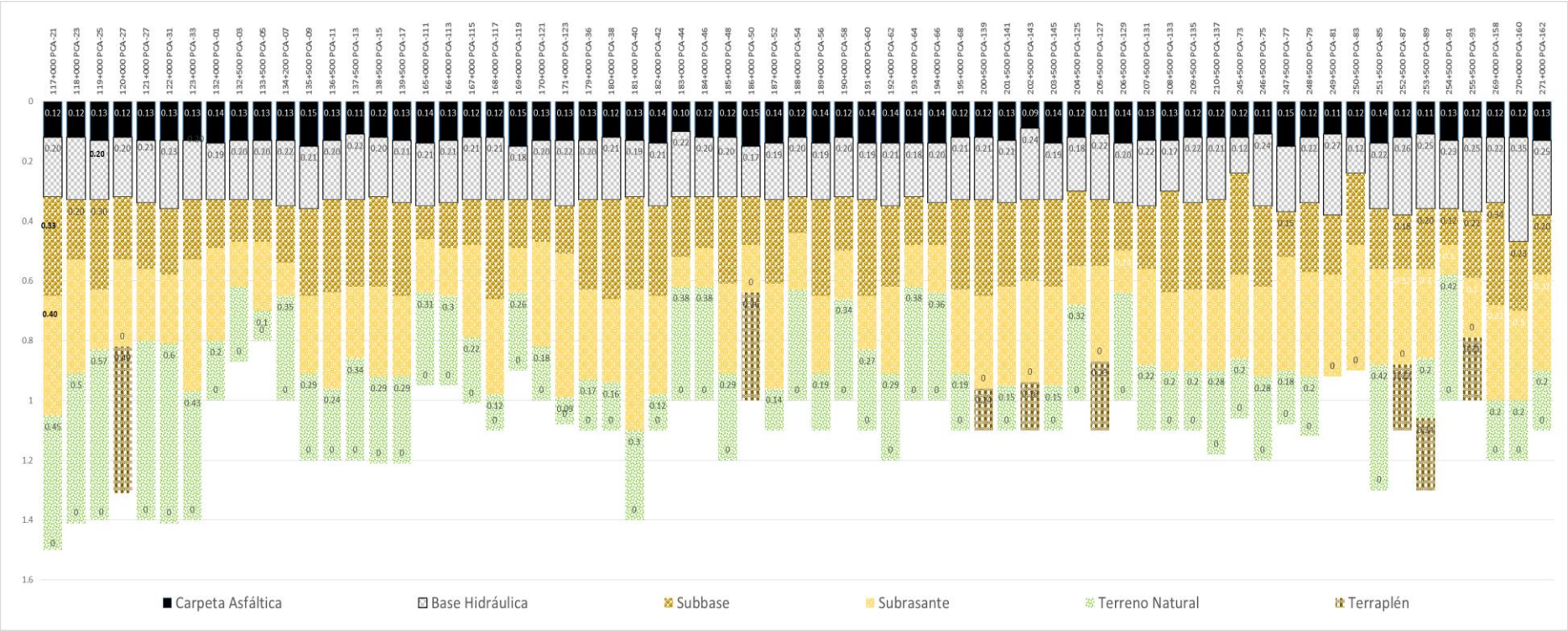


Figura 23 Fuente: Elaboración propia. Espesores de pavimento.

2.2.2. Ensayos de laboratorio CBR

Este método fue propuesto en 1929 por ingenieros del departamento de carreteras de california (USA). Desde esa fecha tanto en Europa como en américa, el método CBR (Valor de Soporte de California) se ha generalizado y es una forma de clasificación de suelos para ser utilizados tanto en subrasante, Subbase o material de base en la construcción de carreteras.

Este método tiene como objetivo determinar la capacidad de soporte de un material en el lugar donde será sometido a las condiciones de la estructura que soporta. El ensayo de CBR se considera como un indicador satisfactorio de la capacidad de soporte del suelo que forma parte del pavimento.

El ensayo se realiza de acuerdo con las condiciones ambientales del laboratorio, las muestras son obtenidas de la estructura de pavimento en campo y son preparados en en el laboratorio, se incorpora uniforme la cantidad de agua necesaria para que tenga un contenido de agua ± 0.5% del óptimo obtenido de acuerdo a la compactación dinámica estándar o modificada; esto depende de la variante y capa de estuctura de pavimento al que se le va a realizar el ensayo.

Las CBR que se realizarón en tres especímenes, con masas volumétricas diferentes a la masa volumétrica seca máxima (MVSM), variando la energía de compactación y determinando el número de golpes correspondientes según la relación:

(4)

$$EC = \frac{nNPC}{V}$$

Donde

EC	Energía de Compactación
n	Número de golpes por capa
N	Número de capas
P	Masa del pisón
C	Altura de caída del pisón
V	Volumen del molde

Las energías de compactación, para cada tipo de compactación (estándar y modificada) se define conforme la siguiente tabla:

CBR. Estándar	CBR Modificada
1.08	4.88
2.69	12.21
6.03	27.36

Tabla 7. Fuente: NMX-C-522-ONNCCE-2016. Energía de compactación por unidad volumétrica (kg/cm²).

Finalizando el ensayo de CBR con tres especímenes, compactados, se coloca un papel filtro en la parte superior e inferior, además de una placa de expansión con vástago ajustable y placas de carga que son necesarias para producir una sobrecarga equivalente a la de las capas que se encuentran construidas sobre el material que se esta estudiando, pero nucna menor de 4.54 kg ± 0.02 kg. Si no se especifican la sobrecarga será de 4.54 kg ± 0.02 kg.

Los especímenes, se introducen cuidadosamente en un tanque de saturación de manera que se permita el libre flujo de agua solo superior del espécimen. Se le coloca un trípode del dispostivo de medición de expansión sobre el molde con el collarín, con su extensómetro arriba del vástago de la placa de expansión, el que se ajusta hasta hacer contacto con el vástago del extensómetro y se efectúa una lectura inicial para la determinación de la expansión, la cual se registra como *ho* en mm con una aproximación de 0.01 mm, y dejar saturar durante 96 horas manteniendo el nivel de agua del tanque aproximadamente a 25 mm (mínimo) sobre la parte superior del molde con el collarín.

Transcurrido el tiempo de saturación, inmediatamente después de obtenida la masa del molde con espécimen saturado, se ensambla el molde a la placa base sin perforaciones, en la misma posición que tenía durante el proceso de saturación, se coloca sobre el espécimen una placa de carga anular de 4.54 kg ± 0.02 kg y se inserta el pistón de penetración en su orificio central, se aplica una carga inicial no mayor de 43 N (4.38 kg) y se colocan las placas ranuradas necesarias para producir la sobrecarga utilizada durante la saturación, y se procede a la penetración de tal manera que el rango de penetración sea aproximadamente de 1.27 mm/min, las lecturas de la carga a 0.64 mm, 1.27 mm, 1.91 mm, 2.54 mm, 3.18 mm, 3.81 mm, 4.45 mm, 5.08 mm, 7.62 mm, 10.16 mm,

12.70 mm, o bien la carga máxima y la penetración, si se produce una penetración de menos de 12.70 mm, esto se realiza en los tres especímenes, se determina el contenido de agua de la capa superior de 25.4 mm de espesor.

Con estos valores se determina la masa volumétrica seca y el contenido de agua de compactación de cada espécimen compactado, empleando la siguiente expresión:

(5)

$$\gamma_{dj} = \frac{1000 \cdot \left(M_{mj+ef} - M_{mj}\right)}{0.25 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{mj}}{10}\right)^2 \cdot \left(\frac{H_{mj} - H_{dek}}{10}\right) \cdot \left(1 + \frac{w_{sat\ j}}{100}\right)}$$

Donde

γ_{dj} Masa volumétrica seca del espécimen compactado en el molde j, en kg/m^3

M_{mj+ef} Masa del molde j más espécimen saturado

M_{mj} Masa del molde j, en g

D_{mj} Diámetro del molde j, en mm

H_{mj} Altura del molde j, en mm

H_{dek} Altura del disco espaciador k, en mm

$w_{sat\ j}$ Contenido de agua del espécimen en estado saturado compactado en el molde j

El cálculo y reporte del contenido de agua del espécimen compactado se hará empleando la siguiente expresión:

(6)

$$w_{cj} = w_{sat\ j} - \frac{(100 + w_{sat\ j}) \cdot (M_{mj+ef} - M_{mj+ei})}{(M_{mj+ef} - M_{mj})}$$

Donde

w_{cj} Contenido de agua del espécimen compactado en el molde j, en %

$w_{sat\ j}$ Contenido de agua del espécimen en estado saturado, compactado en el molde j

M_{mj+ef} Masa del molde j más espécimen saturado en g

M_{mj+ei} Masa del molde j más espécimen compactado en g

M_{mj} Masa del molde j, en g

Para determinar la expansión de cada especímen compactado mediante la siguiente expresión:

(7)

$$Exp_j = \frac{100 \cdot \Delta H_j}{(H_{mj} - H_{dek})}$$

Donde,

Exp_j Expansión del espécimen compactado en el molde j, en %

Δ_{hj} Diferencia entre las lecturas h_o y h_f en el extensómetro del dispositivo de expansión en mm

H_{mj} Altura del molde j, en mm

H_{dek} Altura del disco espaciador k, en mm

Valor Relativo de Soporte de California VRS (California Bearing Ratio CBR), para cada espécimen penetrado se representan gráficamente las cargas determinadas donde el eje de las abscisas, indica las penetraciones y el de las ordenadas las cargas estos puntos se unen con una línea continua que no presente cambios bruscos de pendiente ver Figura 25.

En los casos en que el inicio de la curva presente una concavidad hacia arriba, se efectuará una corrección trazando una tangente en el punto de inflexión hasta cortar al eje de las abscisas en el punto que se designe cómo o', este o' se tomará como nuevo origen de las penetraciones y a partir de él, se marcarán las ordenadas correspondientes a las penetraciones de 2.54 y 5.08 mm. Las ordenadas respectivas representan las cargas corregidas para estas penetraciones, en kN ver Figura 26.

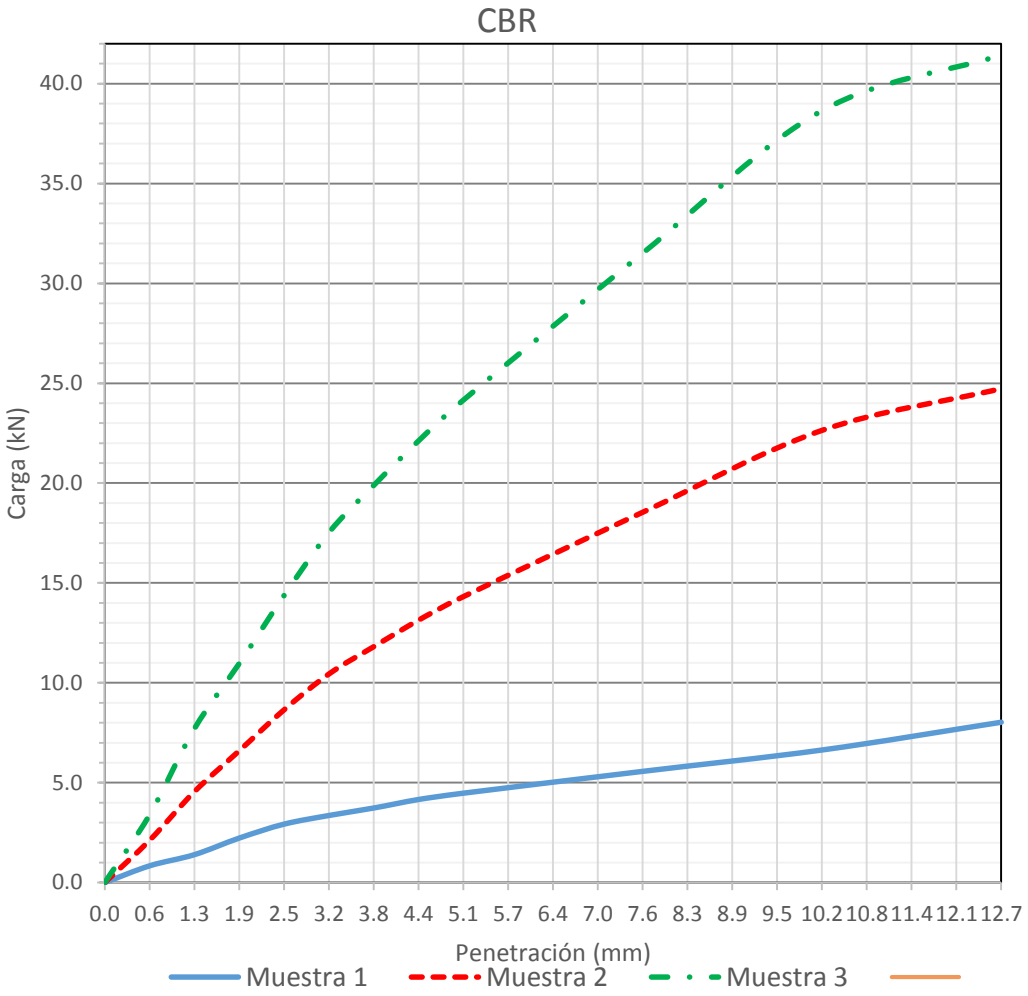


Figura 24. Fuente: NMX-C-522-ONNCCE-2016. Gráfica CBR.

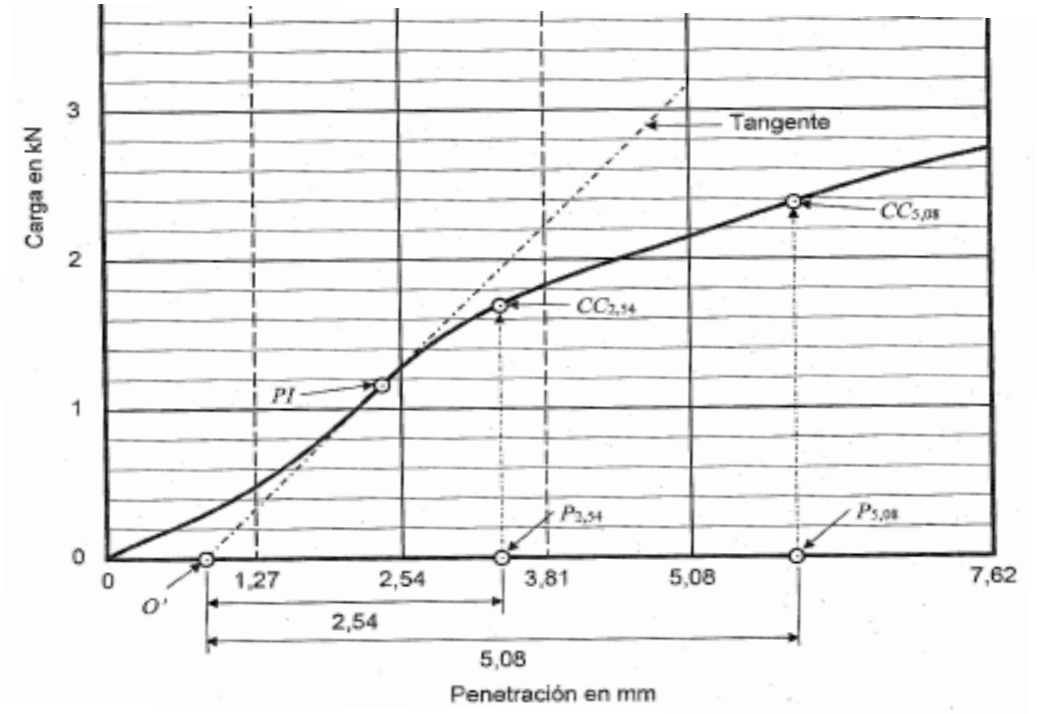


Figura 25. Fuente: NMX-C-522-ONNCCE-2016. Método de corrección de la gráfica.

Se calculará con una décima de aproximación los valores CBR a 2.54 mm y a 5.08 mm de penetración del espécimen compactado mediante las expresiones siguientes:

(8)

$$CBR_{2.54} = \frac{100 \cdot C_{2.54}}{13.34}$$

(9)

$$CBR_{5.08} = \frac{100 \cdot C_{5.08}}{20.01}$$

Donde

$CBR_{2.54}$ Valor Soporte de California determinado para una penetración de 2.54 mm

$CBR_{5.08}$ Valor Soporte de California determinado para una penetración de 5.08 mm

$C_{2.54}$ Carga aplicada o corregida en kN para una penetración de 2.54 mm

$C_{5.08}$ Carga aplicada o corregida en kN para una penetración de 5.08 mm

El CBR de cada espécimen compactado será el que resulte menor entre los valores CBR2.54 y CBR5.08.

La determinación del CBR para una masa volumétrica determinada se obtendrá a partir de un gráfico como el que se muestra en la Figura 27.

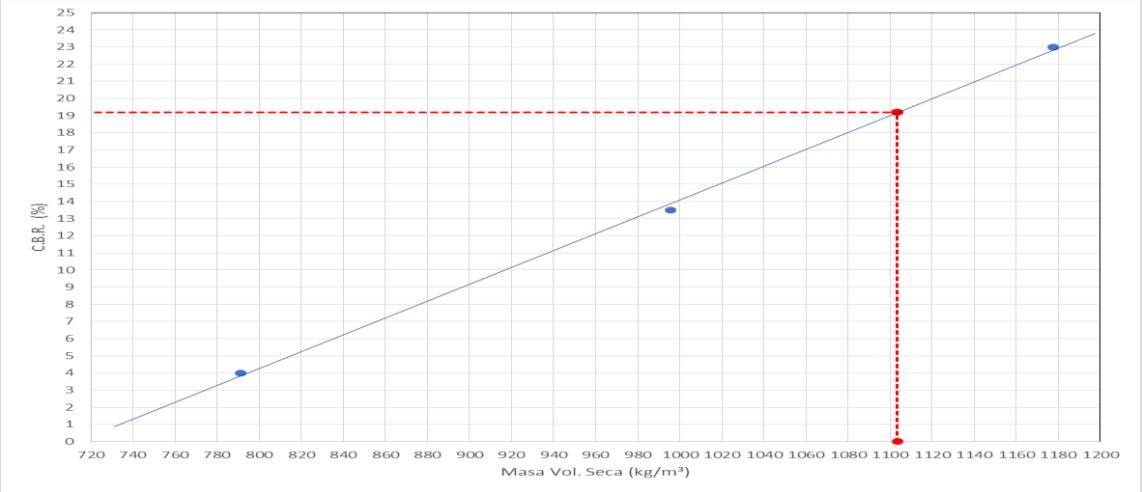


Figura 26. Fuente: NMX-C-522-ONNCCE-2016. Gráfica para obtener el valor del CBR.

Los valores obtenidos de CBR de cada capa se encuetran representados en las siguientes Figuras

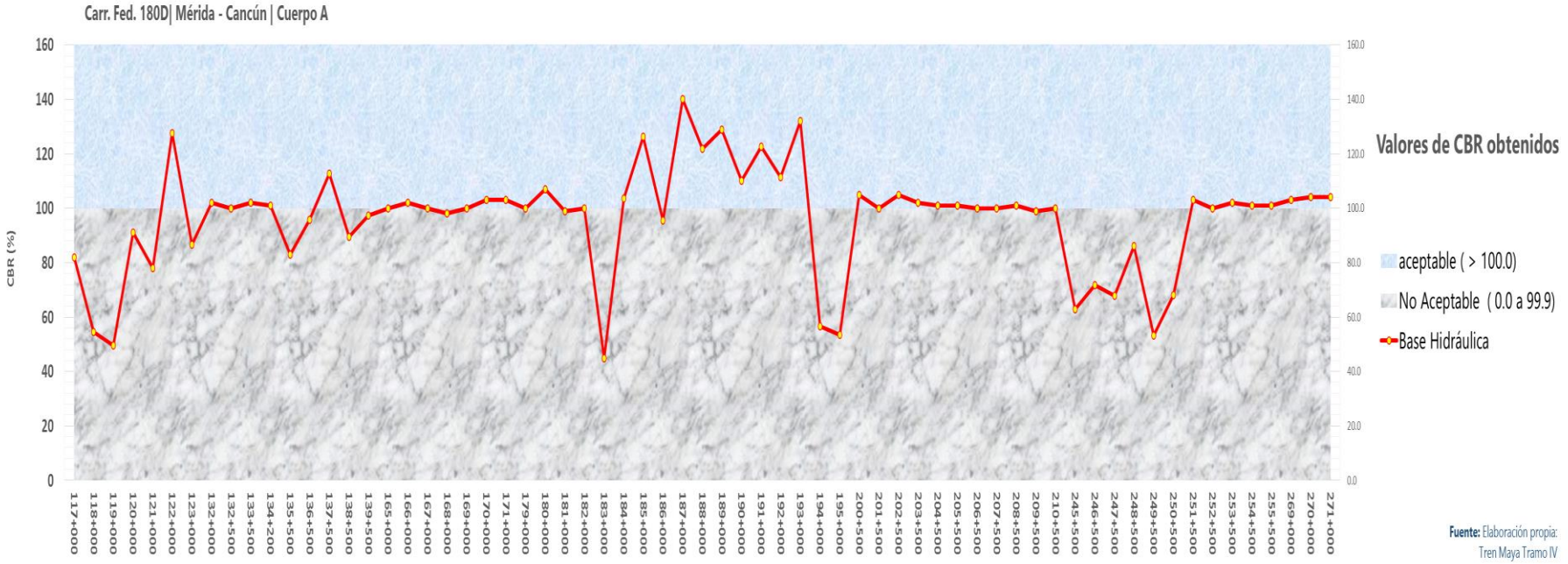


Figura 27. Fuente: Elaboración propia. Valores obtenidos de CBR para la capa Base, Cuerpo A.

2.2.3. Ensayos complementarios

Entre los ensayos complemetarios se encuentran las compactaciones dinámicas estándar o modificada la cual se determina para poder obtener una masa volumétrica seca máxima y el contenido de agua óptimo, estos valores obtenidos nos sirven para poder realizar el ensayo de CBR.

La variante como anteriormente se menciona, depende de la preparación de la muestra el tipo de agregado que predomina, y con apoyo a la tabla 8 nos indica las carácterísticas del equipo y ensayo, existen cuatro variantes las cuales son:

Variante A, se aplica a materiales que pasan la malla 4.75 mm (No. 4) y se compactan en el molde de 101.6 mm de diámetro interior.

Variante B, que se aplica a materiales que pasan la malla 4.75 mm (No. 4) y se compactan en el molde de 152.4 mm de diámetro interior.

Variante C, que se aplica a materiales que pasan la malla 19 mm (¾ pulgada) y se compactan en el molde de 101.6 mm de diámetro interior.

Variante D, que se aplica a materiales que pasan la malla 19 mm (¾ pulgada) y se compactan en molde de 152.4 mm de diámetro interior

Tipo de ensayo	**Dinámica**			
	Estándar (E)		**Modificado (M)**	
Masa del pisón (Kg)	2.5 ± 0.01		4.54 ± 0.01	
Diámetro del pisón (mm)	50.8 ± 0.25		50.8 ± 0.25	
Altura de caída del pisón (cm)	30.5 ± 0.1		45.7 ± 0.1	
No. de capas	3		5	
Variantes	**A y C**	**B y D**	**A y C**	**B y D**
Diámetro del molde (mm)	101.6 ± 0.4	152.4 ± 0.7	101.6 ± 0.4	152.4 ± 0.7
Altura del molde (mm)	116.4 ± 0.5	116.4 ± 0.5	116.4 ± 0.5	116.4 ± 0.5
No. golpes por capa	25	56	25	56
Tamaño de la muestra del ensayo (kg)	4.0	7.5	4.0	7.5

Tabla 8 Fuente NMX-C-476-ONNCCE-2013. Características de equipo y ensayo.

Dichas tabla nos indica las carácterísticas del equipo de cada una de las variantes a compactar y se selecciona de acuerdo con la variante de que se trate, con su respectiva extensión, el cual se apoya sobre la base para compactar el material con el pisón que corresponda, aplicando 25 golpes para el caso de las variantes A y C o 56 golpes para las variantes B y D, repartiendo uniformemente los golpes en la superficie de la capa. Para el ensayo estándar se utiliza el pisón de 2.5 kg y para el ensayo modificado, el pisón de 4.54 kg. Terminada la compactación, escarificar la superficie y repetir el procedimiento descrito para las capas subsecuentes, Terminada la compactación de todas las capas, se retira la extensión del molde y se verifica que el material no sobresalga del cilindro en un espesor promedio de 1.5 cm como máximo; de lo contrario el ensayo debe repetirse.

En suelos cohesivos, con la ayuda de la prensa hidráulica o cuando sea factible extraer manualmente; sacar el espécimen del cilindro, cortar longitudinalmente, de la parte central de ambas mitades obtener una porción representativa para determinar su contenido de agua (ω).

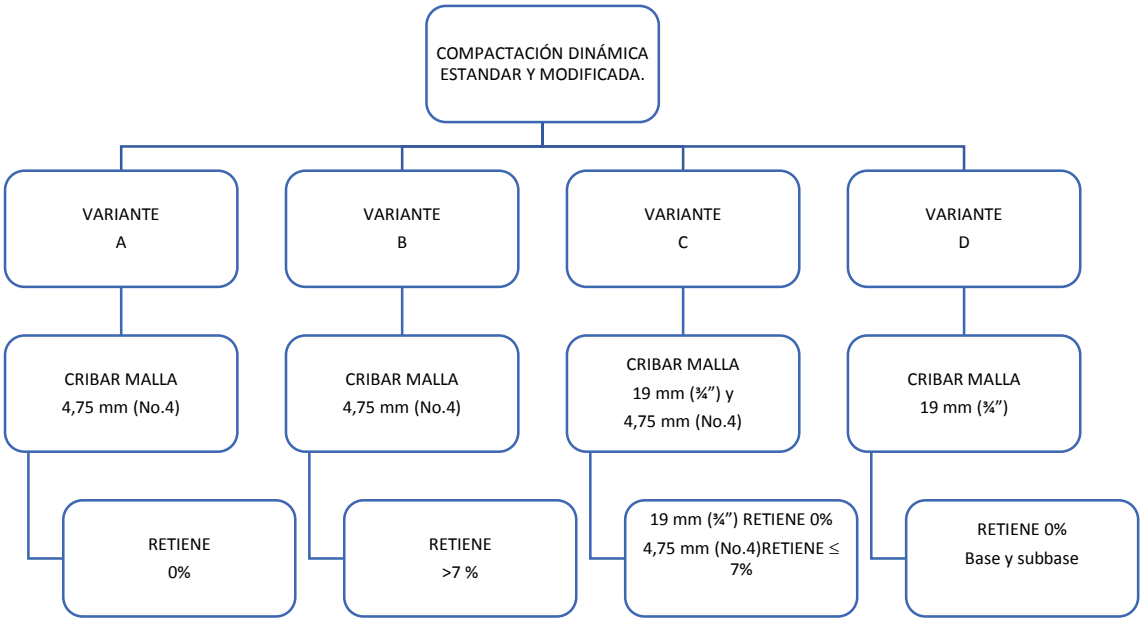


Figura 28. Fuente NMX-C-476-ONNCCE-2013. Diagrama para elegir la variante de compactación.

El cálculo del contenido de agua para cada determinación se obtiene conforme a la siguiente expresión:

(10)

$$\omega = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_r} \times 100 = \frac{W_a}{W_s} \times 100$$

Donde:

ω = Contenido de agua (%).

W_1 = Masa de la muestra húmeda más la masa del recipiente y su tapa, en su caso (g).

W_2 = Masa de la muestra seca más la masa del recipiente y su tapa, en su caso (g).

W_r = Masa del recipiente y su tapa, en su caso (g).

W_a = Masa del agua (g).

w_s= Masa del suelo seco (g).

Para el cálculo de la la masa volumétrica del material húmedo de cada determinación; para calcularla se emplea la siguiente espresión.

(11)

$$\gamma_m = \frac{W_{m1} - W_r}{V} \times 1\ 000$$

Donde:

γ_m *masa volumétrica del material húmedo, (kg/m³).*

W_{m1} *masa del molde con el material húmedo compactado, (g).*

W_r *masa del molde, (g).*

V *volumen del molde, (cm³).*

La masa volumétrica seca se obtiene, empleando la siguiente expresión:

(12)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} \times 100$$

Donde:

γ_d *masa volumétrica seca, (kg/m³).*

γ_m *masa volumétrica del material húmedo, (kg/m³).*

ω *Contenido de agua, (%).*

Se grafican los puntos correspondientes a cada determinación, donde en el eje de las ordenadas se indican las masas volumétricas secas γ_d y en el de las abscisas los contenidos de agua (ω), se unen con una línea continua de forma parabólica denominada curva de compactación. La ordenada en el punto más alto de dicha curva representa la masa volumétrica seca máxima γdmáx y la abscisa de ese punto, el contenido óptimo de agua (ω_0).

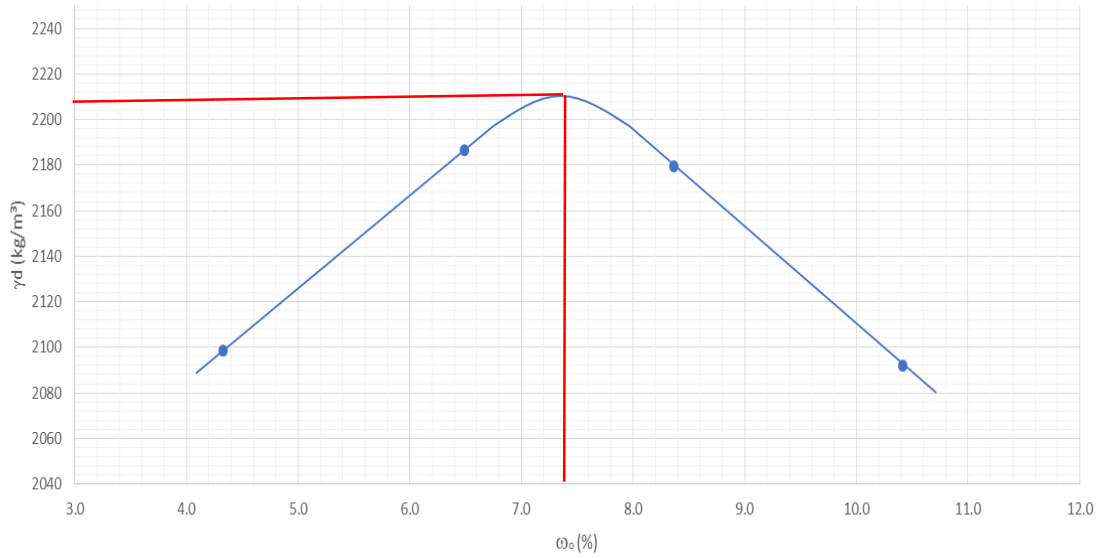


Figura 29. Fuente: Elaboración propia. Gráfica de compactación, para determinar la masa volumétrica seca máxima y contenido de agua óptimo.

Capítulo 3

Mediciones de los desplazamientos verticales por impacto (Deflexiones).



3.1. Generalidades. Fundamentos teoricos

La región donde se encuentra la autopista Mérida Cancún se caracteriza por su topografía prácticamente plana, sin valles, ni montañas y con altitudes someras de no más de 40 m. El subsuelo se compone principalmente de roca caliza, o *Sascab* (tierra blanca) que es el producto de la alteración de la caliza, la cual contiene carbonatos de calcio y magnesio que son ligeramente solubles en agua.

En las rocas calizas, es común que sucedan procesos de disolución de los carbonatos de calcio en presencia de agua, creando oquedades y conductos que van creciendo con el paso del tiempo hasta formar extensas galerías subterráneas, a este proceso se le llama clasificación.

El Tramo IV del proyecto del Tren Maya, comprende desde la población de Izamal en el Estado de Yucatán, hasta las cercanías del Aeropuerto Internacional de Cancún. Este tramo tiene una longitud de 247 km, de los cuales 216 se desarrollan sobre la autopista Mérida-Cancún, aprovechando su derecho de vía. La intención de utilizar el cuerpo A de dicha autopista para desplantar el terraplén donde correrá el Tren, lo que a su vez obliga a una ampliación de su cuerpo B. Además, se construirá un camino auxiliar para futuro mantenimiento de las instalaciones del Tren Maya. Este proyecto conceptual se puede observar en el esquema de la *Figura 31*.

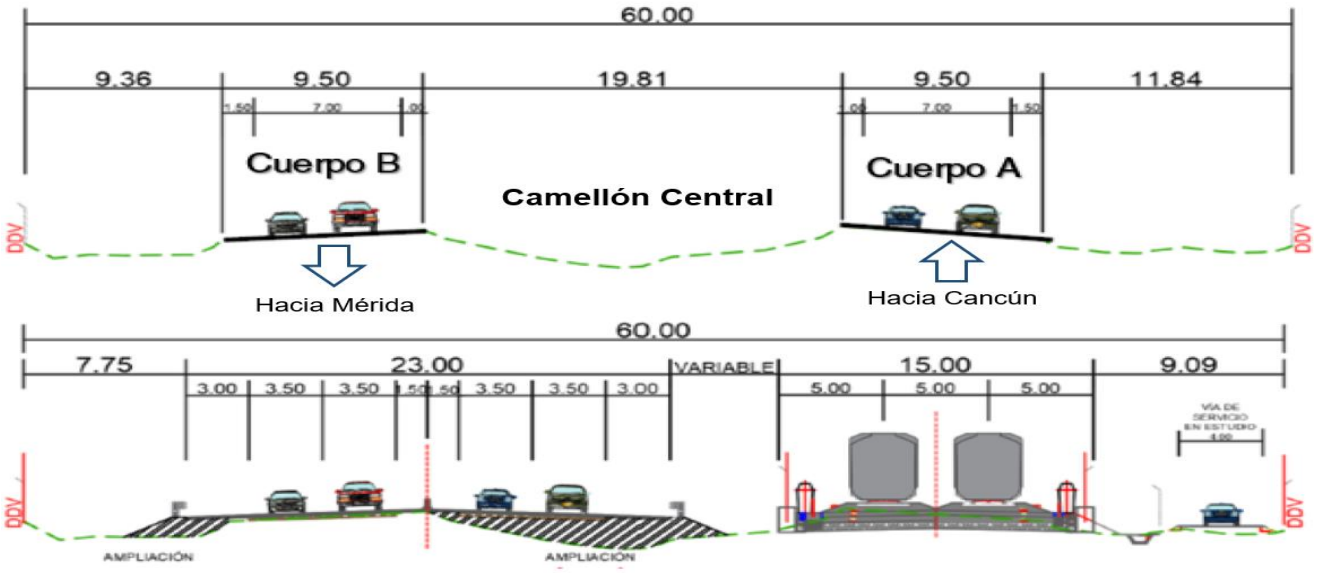


Figura 30 Fuente ICA: Esquema del proyecto conceptual del Tren Maya Tramo IV, propuesto por ICA.

3.2. Deflexiones máximas normalizadas

En términos generales, la carretera conecta las ciudades de Mérida y Cancún de Estado de Yucatán y Quintana Roo respectivamente, se localiza el tramo carretero Mérida – Cancún con un pavimento Asfáltico, Ver Figura 32. Para objeto de este estudio se realizaron deflexiones tanto el cuerpo A de la autopista y B de la misma, la cual para el primer cuerpo mencionado albergará la nueva estructura para el Tren Maya y posteriormente el B será reconstruido; el cual se ampliará para pernoctar 4 carriles, 2 para ambos sentidos y sus respectivos acotamientos.

Mejor conocida como la "Autovía del Mayab", la Autopista Mérida - Cancún es una vía de 4 carriles con 241 km de longitud.

Conforma el corredor turístico de la Península de Yucatán, ya que a su paso se encuentra el sitio arqueológico de Chichén Itzá y diversos cenotes.

Asimismo, cuenta con el Ramal Cedral – Tintal – Playa del Carmen que agiliza el recorrido entre la Riviera Maya.

Esta ampliación cuenta con 2 entronques: el primero es Cedral - Tintal con 10 km de longitud; se trata de una autopista de 2 carriles que conecta directamente la Riviera Maya con el norte del Estado, en este lugar predomina el clima cálido subhúmedo con temperatura media anual mayor de 22ºC y temperatura del mes más frio mayor de 18ºC.

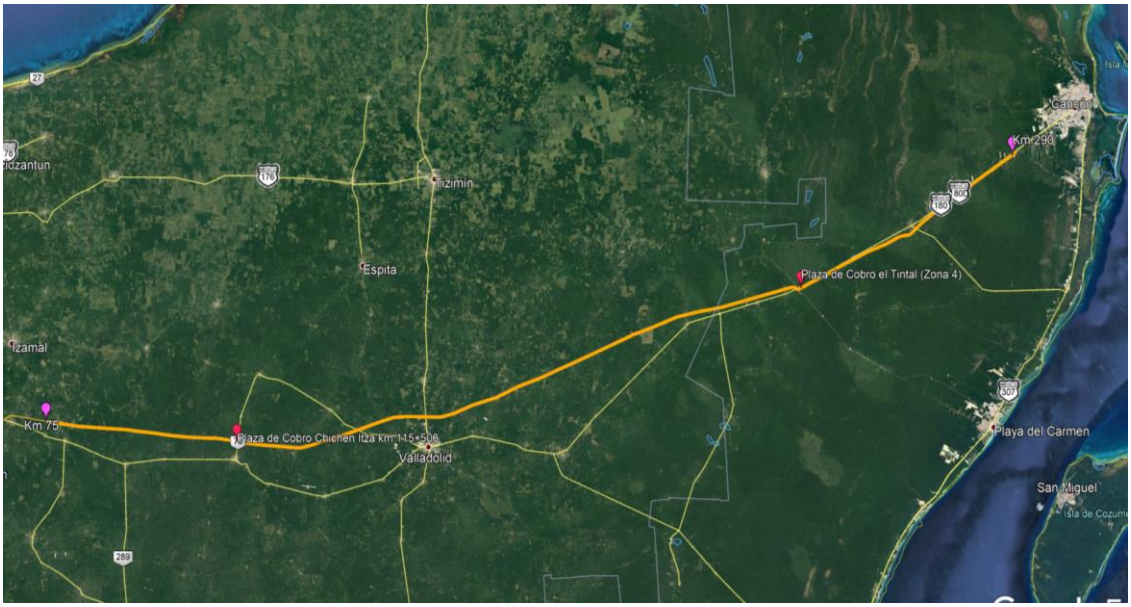


Figura 31. Fuente: Elaboración propia. Croquis de localización del tramo en estudio Carretera Kantunil - Cancún.

La evaluación de la estructura del pavimento está asociado a la capacidad que tiene para soportar las solicitaciones de cargas a las que estará sometido durante su vida útil. Durante dicho periodo, las cargas de los vehículos pesados producen una pérdida lenta y progresiva de la capacidad de soporte de la estructura del pavimento.

Al estar sometidos a cargas de tránsito constantes, los pavimentos sufren deformaciones elásticas que con el tiempo provocan la fatiga del material, lo cual está relacionado a la capacidad estructural del pavimento.

En ese sentido, es necesario realizar la evaluación estructural del pavimento, con la finalidad de identificar los tramos cuyo estado de deterioro ha decaído hasta un nivel en el cual el pavimento ha reducido su capacidad de resistir cargas. El principal objetivo de la evaluación estructural es determinar la capacidad efectiva del pavimento para soportar las cargas de

tránsito actuales o el periodo en tiempo que todavía podrá resistirlas, ya que de ello dependerá que el proyecto de rehabilitación sea correctamente diseñado.

La evaluación estructural consiste típicamente en la aplicación de una carga, de magnitud y contenido de frecuencia conocidos, sobre la superficie del pavimento, con el fin de registrar el cuenco de deflexiones, ver Figura 33.

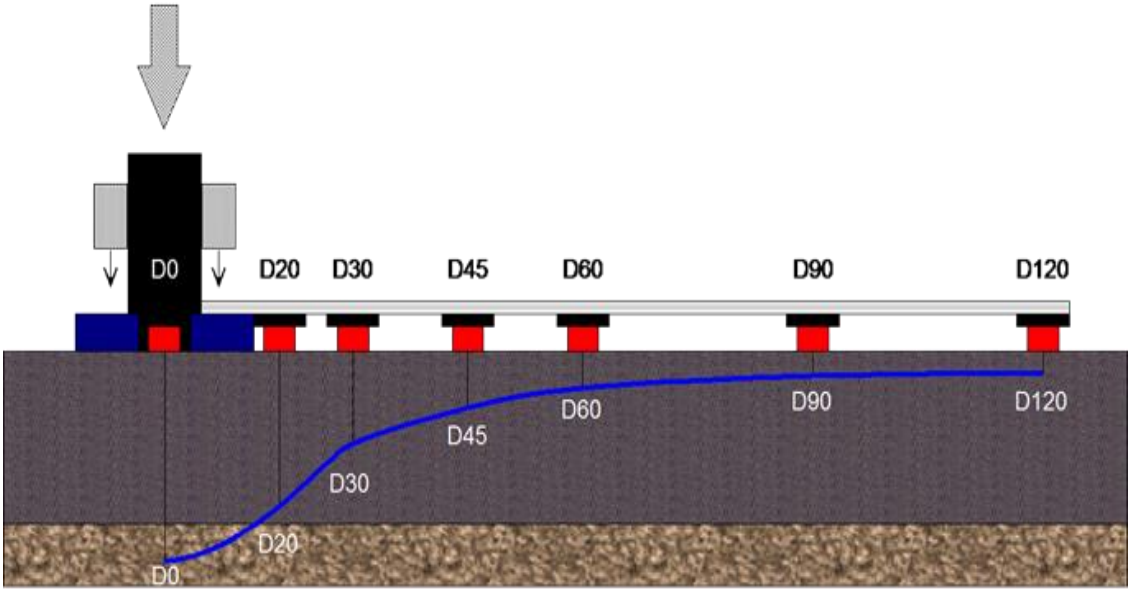


Figura 32. Fuente: Elaboración propia. Distribución del cuenco de deformación vertical al aplicar un pulso de fuerza sobre el pavimento.

Las pruebas de deflexión superficial en pavimentos son una manera fácil, rápida y no destructiva de evaluar la condición estructural de un pavimento en servicio.

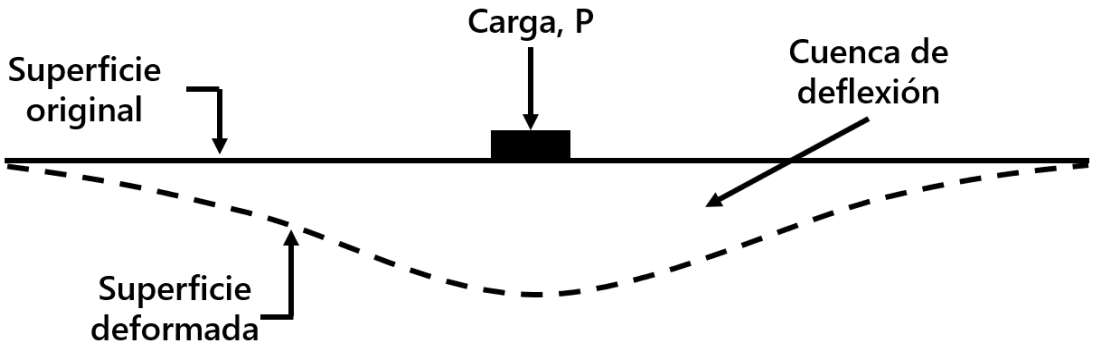


Figura 33. Fuente: Elaboración propia: Diagrama típico de una cuenca de deflexión en un pavimento.

Se entiende por deflexión, la medida de deformación elástica que experimenta un pavimento al paso de una carga. Está en función tanto del estado del pavimento, como del método y equipo de medición, así como de la temperatura y humedad presentes en el pavimento.

Las pruebas de deflexión superficial en pavimentos son una manera fácil y rápida de evaluar, de una forma no destructiva, la condición estructural de un pavimento en servicio, debido a que determinan la capacidad de respuesta estructural de los pavimentos a la acción de las cargas del tránsito.

Para objeto de estos estudios se realizaron deflexiones tanto el cuerpo A de la autopista y B de la misma, la cual para el primer cuerpo mencionado albergará la nueva estructura para el Tren Maya y posteriormente el B será reconstruido el cual se ampliará para pernoctar 4 carriles, 2 para ambos sentidos y sus respectivos acotamientos.

Para la evaluación estructural del pavimento del tramo carretero Kantunil - Cancún correspondiente a la Carretera Federal México 180 Mérida - Cancún, se llevó a cabo la medición de las deflexiones a cada 100 metros en los carriles de Sentido A y B respectivamente que comprenden los kilometrajes respecto a las paletas de la carretera del km 75+000 al km 291+000. Así mismo, para el Cuerpo B carril de Alta se ausculto entre los km 291+000 al 196+000 y del 156+000 al 153+200 utilizando un equipo de impacto, Heavy Weight Deflectometer (HWD).
Cabe mencionar, que se para el Cuerpo B se realizaron las deflexiones con un esfuerzo ejercido de alrededor de los 700 Kpa lo cual genera una carga de aproximadamente 50 KN. Sin embargo, para el Cuerpo A se modificó el Esfuerzo y Carga debido a las exigencias del proyecto por lo que para dicho cuerpo el Esfuerzo rondo los 1070 Kpa Generando una Carga de Aproximadamente 170 KN.

El equipo consiste en un sistema de remolque, ver Figura 35, marca Dynatest®, con control operado por computadora, la cual se ubica en el vehículo.



Figura 34. Fuete: Elaboración propia. Fotografía del equipo HWD marca Dynatest.

La computadora controla toda la operación del HWD, incluyendo la acción de bajar y subir el plato de carga y los sensores a la superficie del pavimento, también controla la secuencia de alturas de caída y el número de pruebas a realizar.

Además, el equipo integra dos cámaras fotográficas para ayudar a los operadores alinearse a los puntos de prueba y tomar evidencia de los trabajos.
Como se observa en la Figura 35, el FWD libera una masa conocida, desde una altura establecida, hacia el plato de carga, el cual está asentado sobre la superficie del pavimento, produciendo una carga que es similar en duración y magnitud a la de un neumático de un vehículo en movimiento.

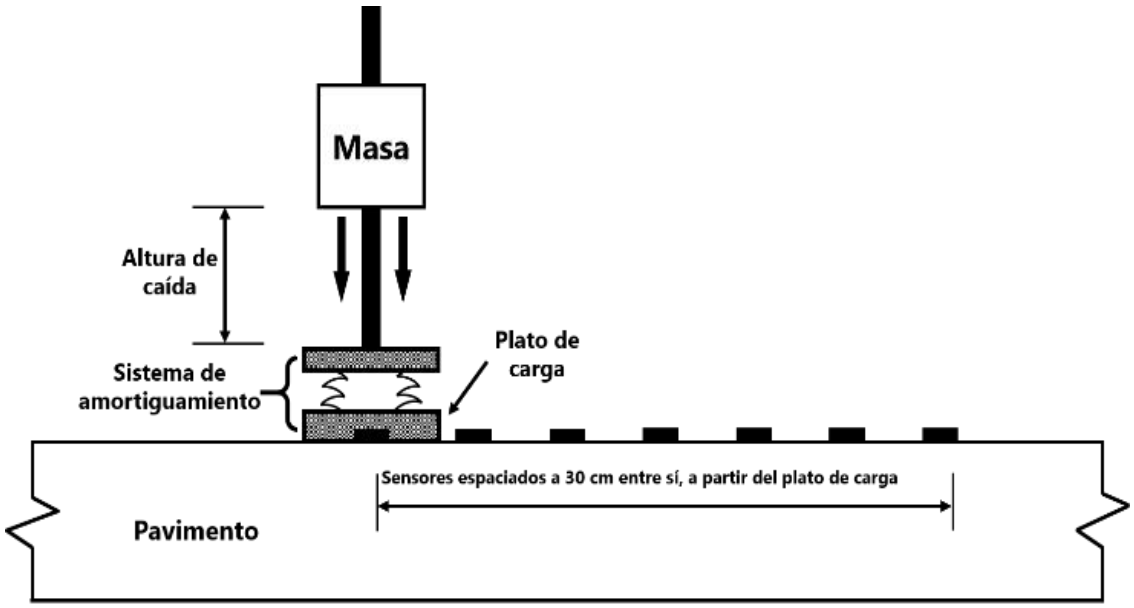


Figura 35. Fuente: elaboración propia. Diagrama esquemático de una prueba con el equipo HWD.

Normalización de las Deflexiones

Una vez obtenidas las Deflexiones del Cuerpo A y B se procede a realizar un ajuste de estas, el cual es conocido como normalización de deflexión por esfuerzo. Dicha normalización está referida a la metodología asentada en la norma M.MMP.4.07.020 *(Determinación de las Deflexiones con Equipos de Impacto en Pavimentos Flexibles)* del NIT-SCT. En este procedimiento se toman los valores de la deflexión máxima del segundo impacto para el punto de medición en mm, al igual que el esfuerzo del segundo impacto para el punto de medición en Kpa y, por último, pero no menos importante el esfuerzo de normalización de 700 Kpa, en el cual se aplica la siguiente ecuación para obtener el resultado deseado:
(13)

$$C = \frac{D * A}{B}$$

Donde:

C= Deflexión normalizada, mm

D= Deflexión máxima del segundo impacto para el punto de medición en mm

B= Esfuerzo del segundo impacto para el punto de medición en Kpa

A= Esfuerzo de normalización de 700 Kpa

Para el cuerpo A únicamente se realizó la Normalización de las Deflexiones por Esfuerzos tal como se hace mención en el párrafo anterior, debido a que el esfuerzo y carga ejercido sobre

el tramo auscultado esta fuera de los alcances de las normas del NIT-SCT, ya que los esfuerzos y cargas ejercidos no se consideran para las cargas que puede soportar la estructura de un pavimento convencional en carreteras. Por lo tanto, el Cuerpo A del Tramo Kantunil – Cancún será evaluado de forma diferente que el Cuerpo B; el cual se realizó el estudio y la evaluación en base a la Normatividad del NIT-SCT.

Los resultados de las deflexiones: Para el tramo carretero Mérida - Cancún del km 75+000 al km 291+000 (7020+000 al 7236+000 cadenamientos del Tren), se realizaron deflexiones a cada 100m en ambos sentidos. Obtenidos los valores normalizados por esfuerzo y aplicando el factor de corrección por temperatura del cuerpo B y cual el factor de corrección corresponde al apartado 3.3 del subtema "Fundamentos y C*orrección"*. Se pudo determinar la condición estructural del Tramo de estudio (Cuerpo B) en función del Rango de Valores Representativos de Deflexiones para la Clasificación de los Segmentos Carreteros a 700 Kilopascales y 20 grados Celsius, asentada en la norma N.CSV.CAR.1.03.010/17 *(Determinación de las Deflexiones de un Pavimento (DEF))* del NIT-SCT.

Condición Estructural	Autopista y Corredores Carreteros	Red Básica y Secundaria
Buena	0 a 0.4	0 a 0.50
Regular	--	>0.50 y ≤0.80
Mala	>0.4	>0.80

Tabla 9.Fuente: elaboración propia. Rangos de Valores Representativos de Deflexiones (mm).

Adicionalmente se mencionan los Parámetros que se evaluaron de la cuenca de deflexiones, siendo los índices de capa BLI, MLI, LLI y Radio de Curvatura, Ver Tablas 10, 11,12 y 13.

Base Layer Index BLI	Este indicador, también conocido como el índice de curvatura superficial, nos muestra la condición estructural actual de la capa de base, mm	
Formula	$BLI = D_0 - D_{300}$; $BLI =$ Índice de la base $D_0 = Deflexión\ bajo\ la\ carga$ $D_{300} = Deflexión\ a\ 300\ mm\ de\ distancia\ de\ la\ carga\ aplicada$	
Base Granular	<0.2	Bueno
	0.2 a 0.4	Aceptable
	>0.4	Malo
Base cementada	<0.1	Bueno
	0.1 a 0.3	Aceptable
	>0.3	Malo
Base asfáltica	<0.2	Bueno
	0.2 a 0.4	Aceptable
	>0.4	Malo

Tabla 10. Fuente: elaboración propia. Rangos de Aceptación del Índice de Capa BLI.

Middle Layer Index MLI	Este indicador, nos muestra la condición estructural actual de la capa de subbase, mm	
Formula	$MLI = D_{300} - D_{600}; MLI = \text{Índice de la subbase}$ $D_{300} = Deflexión\ a\ 300\ mm\ de\ distancia\ de\ la\ carga\ aplicada;$ $D_{600} = Deflexión\ a\ 600\ mm\ de\ distancia\ de\ la\ carga\ aplicada$	
Base Granular	<0.1	Bueno
	0.1 a 0.2	Aceptable
	>0.2	Malo
Base cementada	<0.05	Bueno
	0.05 a 0.1	Aceptable
	>0.1	Malo
Base asfáltica	<0.1	Bueno
	0.1 a 0.15	Aceptable
	>0.15	Malo

Tabla 11. Fuente: elaboración propia. Rangos de Aceptación del Índice de Capa MLI.

Low Layer Index LLI	Este indicador, nos muestra la condición estructural actual de la capa de Subrasante, mm	
Formula	$LLI = D_{600} - D_{900}; LLI = \text{Índice de la subbase}$ $D_{600} = Deflexión\ a\ 600\ mm\ de\ distancia\ de\ la\ carga\ aplicada$ $D_{900} = Deflexión\ a\ 900\ mm\ de\ distancia\ de\ la\ carga\ aplicada$	
Base Granular	<0.05	Bueno
	0.05 a 0.1	Aceptable
	>0.1	Malo
Base cementada	<0.04	Bueno
	0.04 a 0.08	Aceptable
	>0.08	Malo
Base asfáltica	<0.05	Bueno
	0.05 a 0.08	Aceptable
	>0.08	Malo

Tabla 12. Fuente: elaboración propia. Rangos de Aceptación del Índice de Capa LLI.

Radio de Curvatura RoC	Es un indicador de la condición estructural actual de la capa superficial y la capa de base, m	
Formula	$RoC = \frac{L^2}{2Do(1 - \frac{D200}{D0}}$ $Do = Deflexión\ bajo\ la\ carga;\ D_{200} = Deflexión\ a\ 200\ mm\ de\ distancia\ de\ la\ carga\ aplicada$ $L = 200\ mm$	
Base Granular	>100	Bueno
	50 < 100	Aceptable
	<50	Malo

Tabla 13. Fuente: elaboración propia. Rangos de Aceptación del Radio de Curvatura.

Para este cuerpo A se realizó la auscultación de las deflexiones en toda su longitud el cual comprende del km 75+000 al km 291+000 referente al kilometraje de la carretera (7020+000 al km 7236+000 cadenamiento del Tren). A diferencia del Cuerpo B, este cuerpo se caracteriza por la diferencia de Esfuerzo y Carga con el cual se ejecutaron los trabajos ya que dichos valores fueron de los 1070 Kpa y 170 KN respectivamente lo que conlleva a que dichos valores de las deflexiones obtenidos no están sujetas a las Normas del NIT-SCT debido a que estas

no contemplan el Esfuerzo y Carga mencionados. Por lo tanto, los valores de las deflexiones obtenidos únicamente se les aplico una Normalización por Esfuerzo.

Una vez realizado la Normalización por Esfuerzo, se genera el perfil mostrado a continuación para el carril de Baja del cuerpo A, donde se puede ver de manera gráfica los comportamientos de los valores de las deflexiones en la longitud total que abarca el segmento auscultado, Así mismo, se subdivido la gráfica en zonas a la cual se le conoce como Zonas Homogéneas y es la similitud del comportamiento de los valores de las deflexiones.

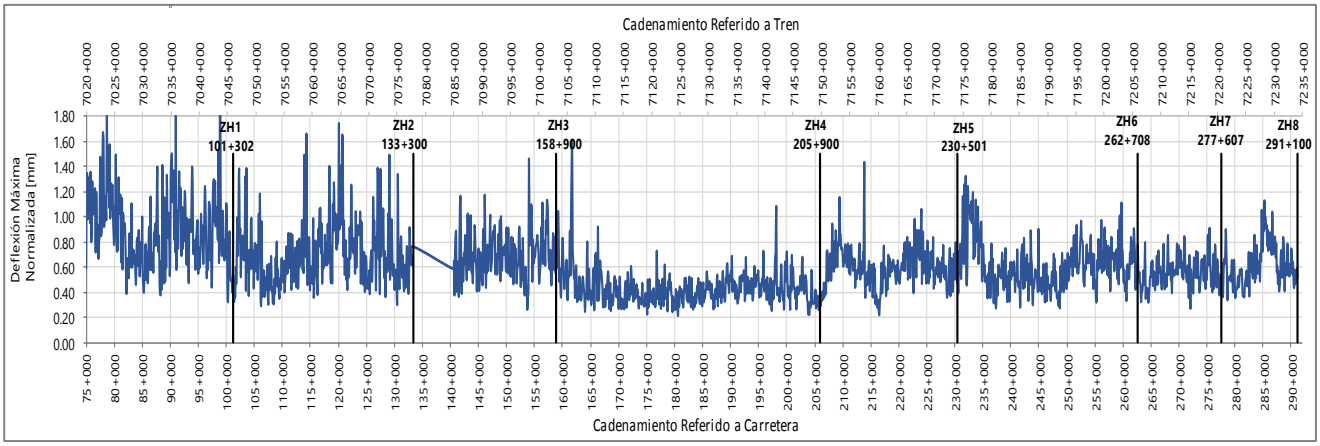


Figura 36. Fuente: elaboración propia. Perfil de la Deflexión del Carril de Baja, Cuerpo A.

Visualizando la Figura 37 se puede observar que los valores de las deflexiones obtenidas para carril de baja son elevadas al principio del tramo que comprende el cadenamiento del 75+000 al 133+300 referente al kilometraje de la carretera (7020+000 al km 7078+300 cadenamiento del Tren). Se puede apreciar que posteriormente los valores descienden de tal manera que su comportamiento es más estable al resto del tramo auscultado. Sin embargo, se hace énfasis en la parte central del segmento A carril de baja ya que los valores obtenidos son más bajos al resto, por lo que se puede considerar una buena estructura del pavimento o la presencia de roca en la zona inferior de esta.

Resultados de las Deflexiones Máxima Normalizada del Cuerpo Para el cuerpo B como se mencionó anteriormente se realizó la auscultación para el carril de Baja en toda su longitud el cual comprende del km 291+000 al 75+000, referente al kilometraje de la carretera (7236+000 al km 7020+000 cadenamiento del Tren) y una zona del carril de Alta el cual abarca del

kilometraje 291+000 al km 196+000 y del km 156+000 al 153+200 también referente al kilometraje de la carretera (7236+000 al km 7141+000 y del km 7101+000 al km 7098+200 cadenamiento del Tren) esto se debe a que se iba midiendo de forma consecutiva el carril de alta y posteriormente se indica que se realizaras mediciones en zonas específicas por lo que el tramo que aparece sin información en la Figura 38 quedó sin auscultar.

Con los resultados de las deflexiones normalizadas por esfuerzo y aplicando el factor de corrección por temperatura, se generaron los perfiles mostrados a continuación (Deflexión Máxima) tanto para el carril de alta como el de baja donde se puede observar de forma gráfica el comportamiento de las deflexiones a lo largo del tramo auscultado. Ambas gráficas corresponden al carril de Alta y Baja respectivamente, el cual se subdivido en zonas homogéneas para acotar los cambios de los valores de las deflexiones obtenidas y en cual es son de ayudar para conocer las zonas donde las deflexiones son más estables o con mayor variación.

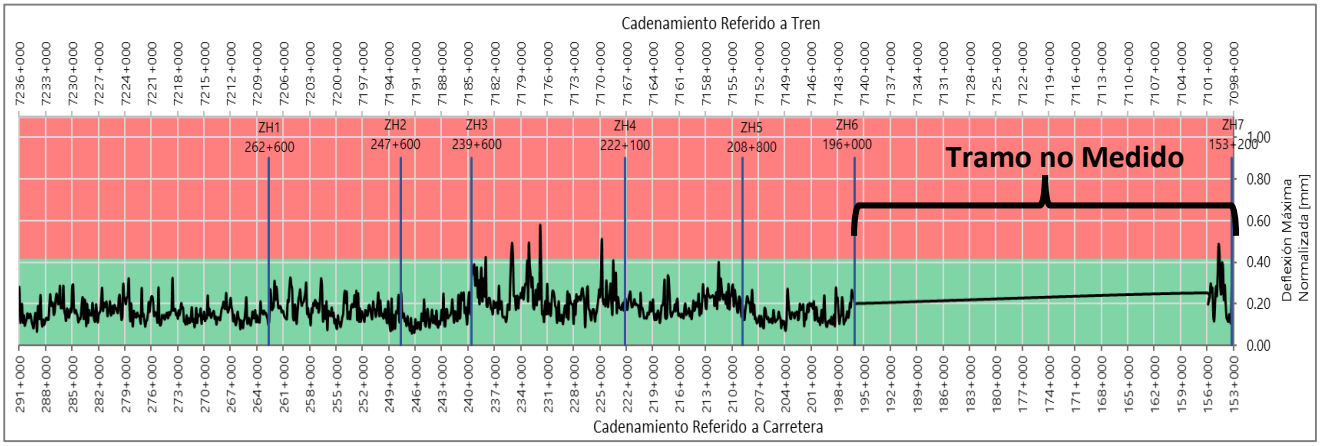


Figura 37. Fuente: elaboración propia. Perfil de la Deflexión del Carril de Alta, Cuerpo B.

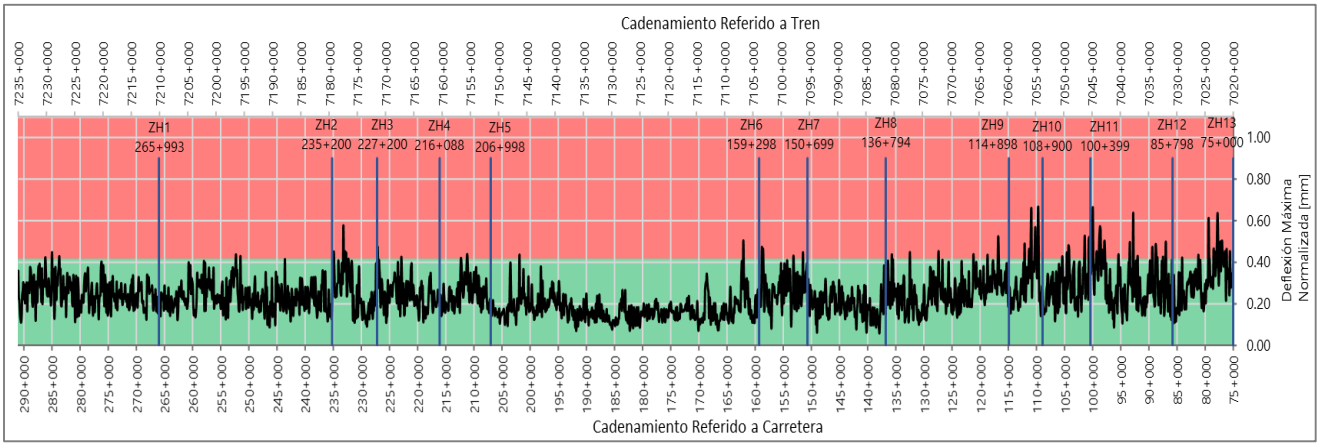


Figura 38. Fuente: elaboración propia. Perfil de la Deflexión del Carril de Baja, Cuerpo B.

Los valores de las deflexiones del carril de alta auscultado están dentro del rango aceptable de 0.40 mm., Sin embargo, en algunos puntos los valores sobrepasan dicho valor de aceptación. En general las deflexiones para este carril auscultado están dentro de lo aceptable debido a que el mayor porcentaje de los valores de las deflexiones obtenidas están dentro del rango de los 0.4 mm. Dicho comportamiento de las deflexiones para este carril da por entendido que la estructura del pavimento se encuentra en buenas condiciones debido a los valores aceptables visto en la Figura 38.

Ahora bien, en la Figura 39 se observa los valores de las deflexiones a lo largo de los 216 kilómetros que comprende el tramo de estudio y se puede apreciar que la mayor parte de los valores obtenidos están dentro del rango de aceptación de 0.4 mm tal como lo menciona la Norma N.CSV.CAR.1.03.010/17 *(Determinación de las de un Pavimento (DEF))* del NIT-SCT. No así algunos valores en algunas zonas donde dichos valores están por arriba del valor ya mencionado. Derivado de lo anterior se puede apreciar que los valores de las deflexiones en su mayoría son levemente elevados a comparación de la zona central del tramo auscultado, el cual los valores de las deflexiones obtenidas son menores que el resto de las demás lo que puede inferirse la buena construcción de la estructura del pavimento o la presencia de roca en la parte inferior de ella.

Por lo tanto, el cuerpo B que comprende la Autopista Mérida – Cancún se encuentra en general en buenas condiciones estructurales derivado del comportamiento de los valores de las deflexiones que se obtuvieron y plasmadas en las gráficas anteriores, el cual es una gran ayuda para poder conocer y catalogar dicho comportamiento de las deflexiones.

Visualizando las gráficas anteriores se puede entender el comportamiento de las deflexiones tanto en el Cuerpo A como en el Cuerpo B y dar una mayor apreciación al momento de poder evaluar el segmento en estudio. Posteriormente se prosigue a zonificar tanto el Cuerpo A como el B para conocer la Estructura del Pavimento con base en las Zonas Homogéneas obtenidas y así poder realizar el retrocálculo para conseguir los Módulos de Elasticidad. Para ello se tomó la información de la campaña geotécnica realizada para ambos cuerpos de la autopista.

3.3. Fundamentos y correlación

Procedimiento para Corrección por Temperatura

Los valores de deflexión normalizados por esfuerzos serán corregidos posteriormente por temperatura, inscrita en la norma M.MMP.4.07.020 *(Determinación de las Deflexiones con Equipos de Impacto en Pavimentos Flexibles)* del NIT-SCT. La corrección por temperatura es el cálculo que se realiza para determinar cuál es el valor de la deflexión a una temperatura de 20°C, cuando fue determinada a una temperatura diferente. Para la determinación del factor de corrección por temperatura se utilizan los gráficos que se presentan a continuación. El valor de deflexión reportado será el que resulta de la normalización de los valores de campo y su posterior multiplicación por el factor de corrección por temperatura.

Pavimentos flexibles con bases hidráulicas, estabilizadas o tratadas con productos asfálticos y/o cal, el factor de corrección se determina según el grafico mostrado en la Figura 39.

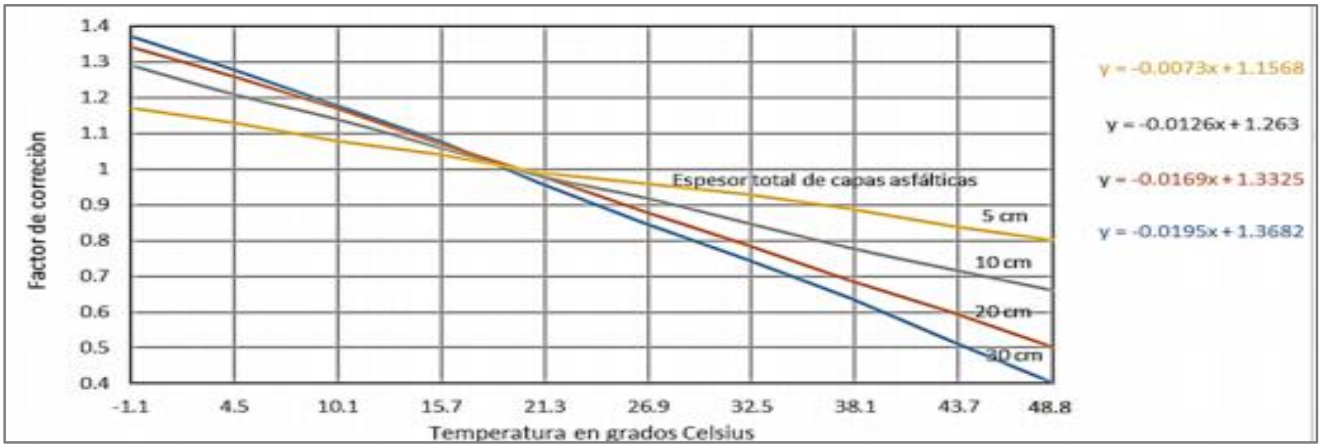


Figura 39. Fuente: elaboración propia. Gráfico para la determinación del factor de corrección de deflexiones por temperatura para pavimentos con bases hidráulicas o estabilizadas con asfalto y/o cal.

Pavimentos flexibles con bases modificadas, tratadas o estabilizadas con cemento, el factor de corrección se determina según el gráfico mostrado en la Figura 40.

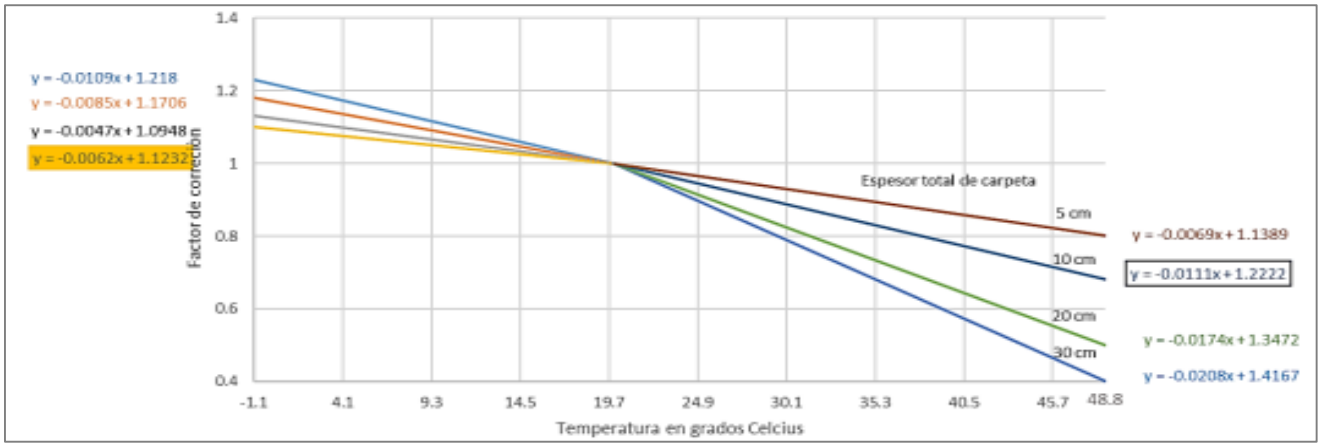


Figura 40. Fuente: elaboración propia. Gráfico para la determinación del factor de corrección de deflexiones por temperatura para pavimentos con bases estabilizadas con cemento.

El factor de ajuste utilizado fue determinado con base en que la estructura del pavimento que constituye la carretera de estudio está constituida por capas granulares sin modificar y/o tratadas.

3.4. Módulo de elasticidad mediante software ELMO (retro cálculo)

A partir de las deflexiones obtenidas en el tramo de estudio, se realiza el retro cálculo pertinente para conocer los módulos de elasticidad de las capas que conforman la estructura del pavimento.

Con la ayuda del software ELMOD 6.0 de la empresa Dynatest, se obtienen los módulos de elasticidad de las capas que integran la estructura del pavimento. A partir de este retro cálculo y obtenido los módulos de elasticidad se procede a obtener el módulo característico por zona homogénea.

Los Módulos de Elasticidad obtenidos permiten conocer si la estructura actual del cuerpo A y B que será de utilidad al momento de construir sobre el cuerpo A y ampliar el cuerpo B a 4 carriles, 2 por sentidos y con sus respectivos acotamientos.

3.4.1. Carpeta asfáltica, Base, Subbase y Terraplén

A la par del proceso de deflexiones se procedió a obtener la estratigrafía de la estructura del pavimento la cual conforma el Cuerpo B de la Autopista.

Se realizaron 124 PCA a lo largo del cuerpo B ubicados en el acotamiento de la autopista.

Con la información obtenida en la campaña geotécnica se llevó a cabo la estratificación del cuerpo B.

Para todos los PCA realizados se obtuvieron los promedios de los espesores para conocer por cada zona homogénea la estructura del pavimento predominante.

- El programa calcula el módulo de cada capa en sistemas de pavimento de dos, tres, cuatro o cinco capas utilizando el método de "Ajuste de cuenca de deflexión" normalmente utilizado con técnicas de integración numérica.
- El cálculo inverso proporciona los módulos aparentes para las deflexiones medidas en cada punto de prueba con el equipo FWD o HWD, y teniendo en cuenta la no linealidad de la subrasante. Para este proyecto se usó el Equipo HWD ejecutándolo en el cuerpo B de la autopista.
- Los Módulos de Elasticidad obtenidos será de gran ayuda para conocer si la estructura actual del cuerpo B será de utilidad al momento de ampliar el cuerpo a 4 carriles, 2 por sentidos y con sus respectivos acotamientos.
- Solo es posible calcular el módulo por retro cálculo de hasta cinco capas

Para obtener la máxima precisión con Elmod 6, la estructura a evaluar debe cumplir preferiblemente las siguientes condiciones:

- La estructura debe contener solo UNA capa rígida (E1 / Esubg> 5). Si la estructura contiene más de una capa rígida, deben combinarse en una capa con el propósito de la evaluación estructural, o el módulo de una de las capas debe fijarse.

- Los módulos deberían ir disminuyendo con la profundidad (Ei / Ei + 1> 2).
- El grosor de la capa superior (rígida) (H1) debe ser mayor que la mitad del radio de la placa de carga.
- Se supone que todos los materiales son homogéneos, isotrópicos y elásticos lineales, excepto la subrasante que se supone que presenta una respuesta no lineal
- Elmod 6 no evalúa los parámetros no lineales de los materiales de base o subbase granulares**.**



Figura 41. Fuente: elaboración propia. Autopista Mérida – Cancún Mex. 180 D cuerpo B, Croquis de localización.

Se procedió al análisis de las deflexiones realizadas en el cuerpo B en el carril de baja.
Seccionamiento por intervalos para obtener Zonas Homogéneas a partir de las deflexiones realizadas, lo cual arrojó 13 zonas homogéneas.
Los rangos de aceptación o rechazo están dados por la norma de conservación de carreteras SCT N-CSV-CAR-1-03-010/17.

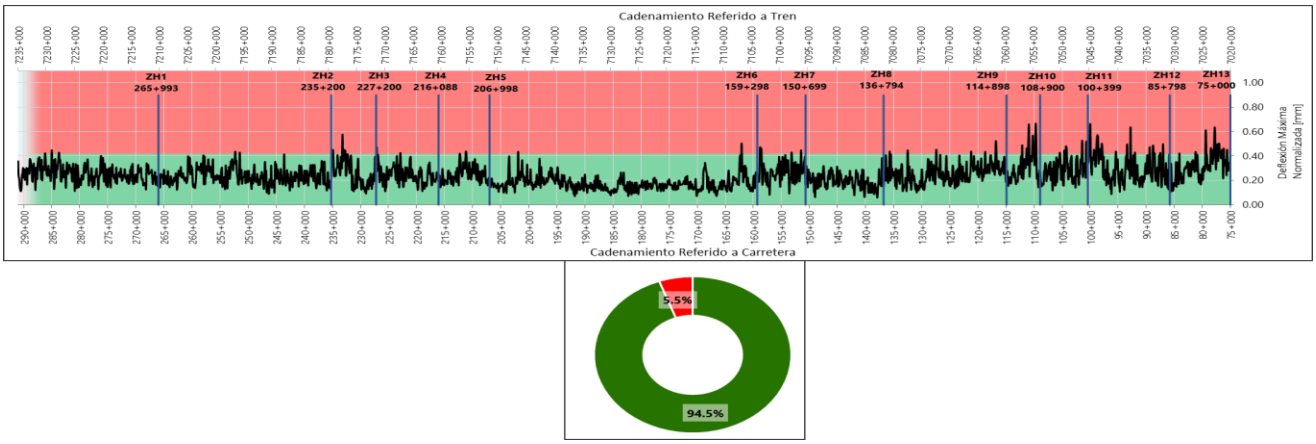


Figura 42. Fuente elaboración propia. Deflexión Normalizada bajo la Carga. Los rangos de Aceptación o Rechazo esta en base a la Norma de la SCT N-CSV-CAR-1-03-010/17.

A la par del proceso de deflexiones se procedió a obtener la estratigrafía de la estructura del pavimento la cual conforma el Cuerpo B de la Autopista.

Se realizaron 124 PCA a lo largo del cuerpo B ubicados en el acotamiento de la autopista.

Con la información obtenida en la campaña geotécnica se llevó a cabo la estratificación del cuerpo B.

Para todos los PCA realizados se obtuvieron los promedios de los espesores para conocer por cada zona homogénea la estructura del pavimento predominante.

Capítulo 4

Comparación de resultados (construcción de correlaciones) para establecer un modelo de comportamiento de estructura térrea.



4.1. Resultados de la comparación del modelo geotécnico (perfil estratigráfico y parámetros) con los resultados de retro cálculo.

A la par del proceso de las mediciones de deflexiones se procedió a obtener la estratigrafía de la estructura del pavimento; la cual conforma el Cuerpo B de la Autopista, para ello se tomó la información que comprende los Estudios Geotécnicos que se llevaron a cabo por medio de PCA (Pozo a Cielo Abierto). A partir de las 13 Zonas Homogéneas que se obtuvieron se realizó un promedio de todas ellas, el cual cubrió la longitud total de la Autopista y así conocer por cada Zona Homogénea la estructura del pavimento predominante.

A continuación se puede observar los espesores obtenidos para cada zona homogénea. Cabe mencionar que para los Estudios de PCA se ejecutaron un número de 124 donde se ubicaron sobre el acotamiento de la autopista. Así mismo, la distribución de los PCA varían a una distancia máxima de separación de 4 km.

CAPAS	Zonas Homogenéas												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
C.A.	3	3	3	3	3	4	4	5	5	3	4	4	4
Base H.	19	19	20	21	18	20	21	17	19	22	22	20	20
Sub-Base	25	29	31	19	22	28	33	33	32	36	25	26	35
Terraplén	37	36	35	59	72	53	45	38	45	28	63	39	47
Prof. (cm)	**84**	**87**	**89**	**102**	**115**	**105**	**103**	**93**	**101**	**89**	**114**	**89**	**106**

Tabla 14. Fuente: Elaboración propia. Estructura del Pavimento del Cuerpo B carril de Baja, con respecto a las zonas homogéneas.

Los resultados de las deflexiones máximas normalizadas para el cuerpo A se realizó la auscultación de las deflexiones en toda su longitud el cual comprende del km 75+000 al km 291+000 referente al kilometraje de la carretera (7020+000 al km 7236+000 cadenamiento del Tren). A diferencia del Cuerpo B, este cuerpo se caracteriza por la diferencia de Esfuerzo y Carga con el cual se ejecutaron los trabajos ya que dichos valores fueron de los 1070 Kpa y 170 KN respectivamente lo que conlleva a que dichos valores de las deflexiones obtenidos no están sujetas a las Normas del NIT-SCT debido a que estas no contemplan el Esfuerzo y Carga mencionados. Por lo tanto, los valores de las deflexiones obtenidos únicamente se les aplico una Normalización por Esfuerzo.

Una vez realizado la Normalización por Esfuerzo, se genera el perfil mostrado a continuación para el carril de Baja del cuerpo A, donde se puede ver de manera gráfica los comportamientos de los valores de las deflexiones en la longitud total que abarca el segmento auscultado, Así mismo, se subdivido la gráfica en Zonas Homogéneas y es la similitud del comportamiento de los valores de las deflexiones.

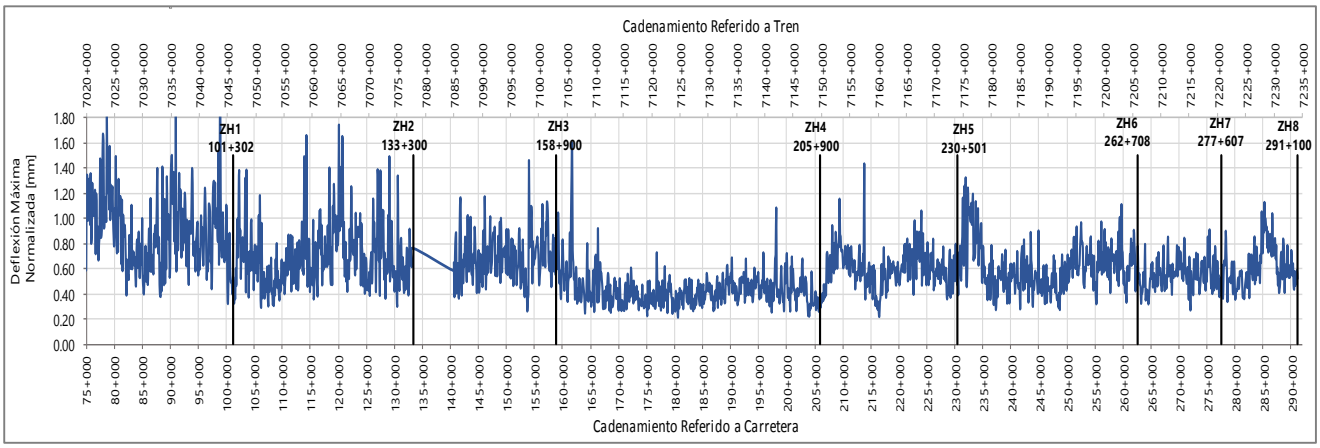


Figura 43. Fuente: Elaboración propia. Perfil de la Deflexión del Carril de Baja, Cuerpo A.

Visualizando la Figura 43 (Gráfica) se puede observar que los valores de las deflexiones obtenidas para carril de baja son Elevadas al principio del tramo que comprende el cadenamiento del 75+000 al 133+300 referente al kilometraje de la carretera (7020+000 al km 7078+300 cadenamiento del Tren). Los valores descienden de tal manera que su comportamiento es más estable al resto del tramo auscultado. Sin embargo, se hace énfasis en la parte central del segmento A carril de baja ya que los valores obtenidos son más bajos al resto, por lo que se puede considerar una buena estructura del pavimento o la presencia de roca en la zona inferior de esta.

Los resultados de las deflexiones máximas normalizadas para el cuerpo B se debe a que se iba midiendo de forma consecutiva el carril de alta y posteriormente se indica que se realizaras mediciones en zonas específicas por lo que el tramo que aparece sin información en la Figura 44 quedo sin auscultar; posteriormente se volvió a dar una nueva indicación en la cual se suspendidas las deflexiones del carril de alta del cuerpo B para auscultar el Cuerpo A ya que en ese momento no se tenía contemplado.

Con los resultados de las deflexiones normalizadas por esfuerzo y aplicando el factor de corrección por temperatura, se generaron los perfiles mostrados a continuación (Deflexión

Máxima) tanto para el carril de alta como el de baja donde se puede observar de forma gráfica el comportamiento de las deflexiones a lo largo del tramo auscultado. Ambas graficas corresponden al carril de Alta y Baja respectivamente, el cual se subdivido en zonas homogéneas para acotar los cambios de los valores de las deflexiones obtenidas y en cual es de gran ayudar para conocer las zonas donde las deflexiones son más estables o con mayor variación.

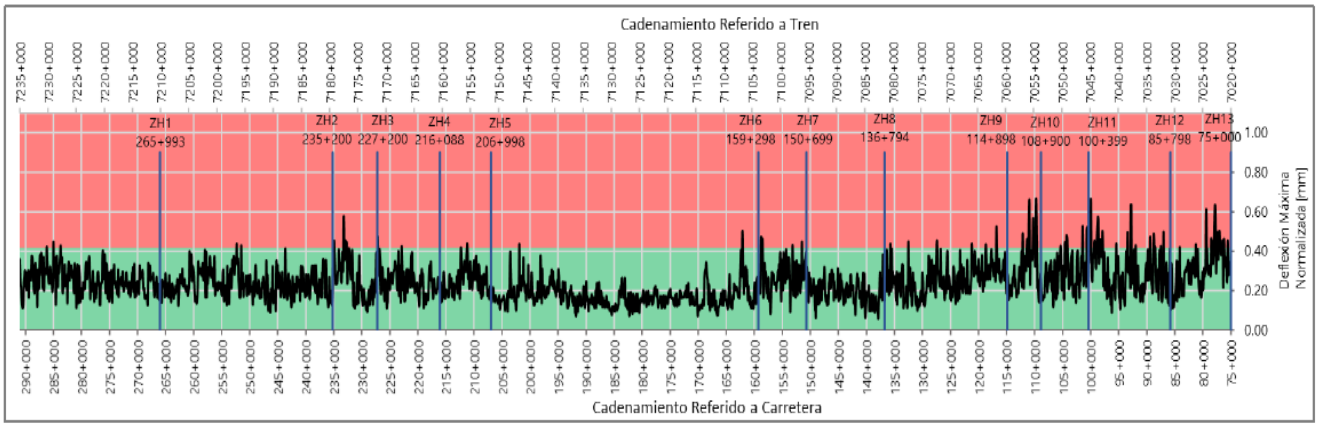


Figura 44. Fuente: Elaboración propia. Perfil de la Deflexión del Carril de Alta, Cuerpo B.

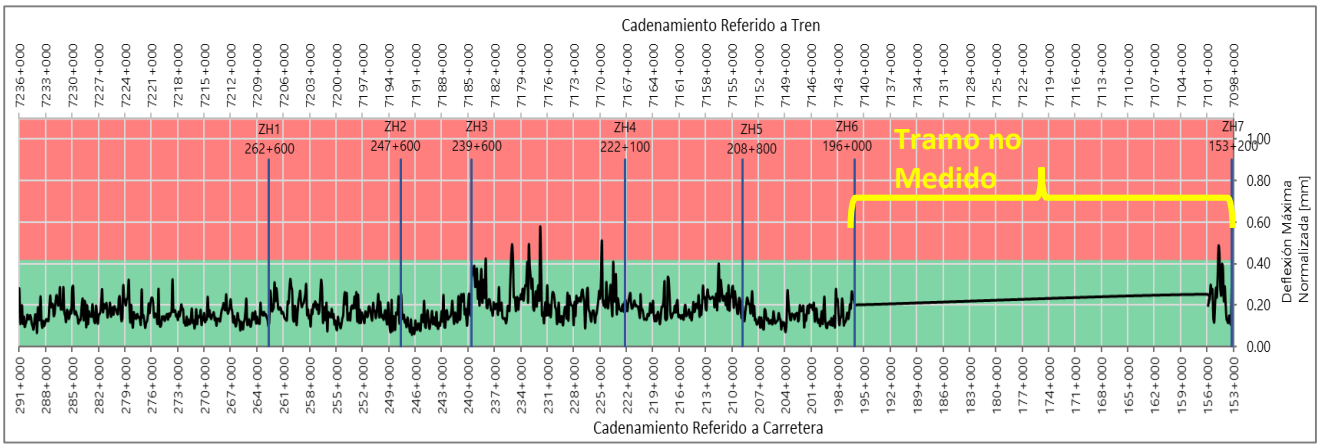


Figura 45. Fuente: Elaboración propia. Perfil de la Deflexión del Carril de Baja, Cuerpo B.

Observando la Figura 44 se observa que los valores de las deflexiones del carril de alta auscultado están dentro del rango aceptable, sin embargo, en algunos puntos los valores sobrepasan dicho valor de aceptación. En general las deflexiones para este carril auscultado están dentro de lo aceptable debido a que el mayor porcentaje de los valores de las deflexiones obtenidas están dentro del rango de las 0.4 mm. Dicho comportamiento de las deflexiones para este carril da por entendido que la estructura del pavimento se encuentra en buenas condiciones debido a los valores aceptables visto en la gráfica.

Ahora bien, para la Figura 45 se observa los valores de las deflexiones a lo largo de los 216 kilómetros que comprende el tramo de estudio y se puede apreciar que la mayor parte de los valores obtenidos están dentro del rango de aceptación de 0.4 mm tal como lo menciona la Norma N.CSV.CAR.1.03.010/17 (Determinación de las de un Pavimento (DEF)) del NIT-SCT. No así algunos valores en algunas zonas donde dichos valores están por arriba del valor ya mencionado. Derivado de lo anterior se puede apreciar que los valores de las deflexiones en su mayoría son levemente elevados a comparación de la zona central del tramo auscultado, el cual los valores de las deflexiones obtenidas son menores que el resto de las demás lo que puede inferirse la buena construcción de la estructura del pavimento o la presencia de roca en la parte inferior de ella.

Por lo tanto, el cuerpo B que comprende la Autopista Mérida – Cancún se encuentra en general en buenas condiciones estructurales derivado del comportamiento de los valores de las deflexiones que se obtuvieron y plasmadas en las gráficas anteriores, el cual es una gran ayuda para poder conocer y catalogar dicho comportamiento de las deflexiones.

Visualizando los gráficas anteriores se puede entender el comportamiento de las deflexiones tanto en el Cuerpo A como en el Cuerpo B y dar una mayor apreciación al momento de poder evaluar el segmento en estudio. Posteriormente se prosigue a Zonificar tanto el Cuerpo A como el B para conocer la Estructura del Pavimento en base a las Zonas Homogéneas obtenidas y así poder realizar el retrocálculo para conseguir los Módulos de Elasticidad. Para ello se tomó la información de la campaña geotécnica realizada para ambos cuerpos de la autopista.
Las Zonas Homogéneas: Con objeto de identificar subtramos con un comportamiento estructural similar, se realizó la identificación de zonas homogéneas, empleando la metodología de diferencias acumuladas, descrita en la Guía de Diseño de Pavimentos de AASTHO 1993.

A continuación, se muestran los resultados de zonificación por tramos homogéneos, con los valores promedios de deflexión máxima, y se califica el promedio conforme los umbrales de aceptación y rechazo de la norma N.CSV.CAR.1.03.010. A excepción del Cuerpo A donde únicamente se realiza la Normalización por Esfuerzo debido a los Esfuerzos y Cargas aplicados. En la Figura 46 la gráfica de zonas homogéneas del cuerpo A carril de baja, Figura

47gráfica de zonas homogéneas del cuerpo B carril de Alta de los kilometrajes del 291+000 al 196+000 y del km 156+000 al 153+200 (7236+000 al 7141+000 y del km 7101+000 al km 7098+200 cadenamiento del Tren) y Figura 48 Grafica de Zonas Homogéneas del Cuerpo B Carril de Baja. Posterior a las Figuras mencionadas se observa los resúmenes de los análisis realizados de las deflexiones.

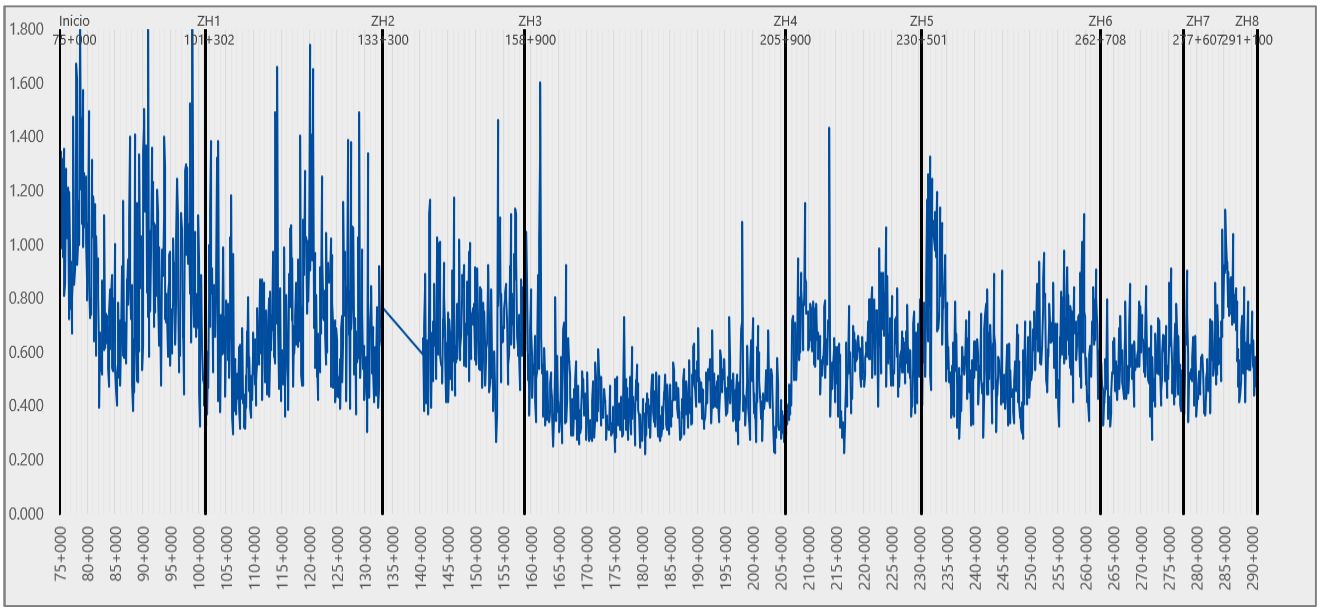


Figura 46 Fuente: Elaboración propia. Gráfica de Zonas Homogéneas del Cuerpo A, Carril de Baja.

Información	
Carretera	**Kantunil - Cancún**
Tramo Referido a Carretera	**Del km 75+000 al km 291+000**
Tramo Referido a Tren	**Del km 7020+000 al km 7236+000**
Cuerpo	**A**
Carril	**Baja**

Longitud evaluada	Promedio ponderado DN	Zonas homogéneas
208.9 km	0.82	8

Zona homogénea	Cadenamiento Referido a Carretera		Cadenamiento Referido a Tren		Longitud [km]	Deflexión Normalizada Característica (mm)	Radio curvatura (m)	BLI (mm)	MLI (mm)	LLI (mm)	
	Inicio (km)	Fin (km)	Inicio (km)	Fin (km)							
1	75+000	101+302	7020+000	7046+302	26.3	1.196	30	0.608	0.166	0.055	
2	101+302	133+300	7046+400	7078+300	32.0	0.969	40	0.473	0.127	0.046	
3	133+300	158+900	7085+501	7103+900	25.6	0.885	37	0.478	0.123	0.040	
4	158+900	205+900	7104+004	7150+900	47.0	0.582	55	0.313	0.072	0.022	
5	205+900	230+501	7151+001	7175+501	24.6	0.761	43	0.410	0.118	0.035	
6	230+501	262+708	7175+603	7207+708	32.2	0.807	43	0.413	0.127	0.042	
7	262+708	277+607	7207+803	7222+607	14.9	0.672	48	0.365	0.107	0.042	
8	277+607	291+100	7222+701	7236+100	13.5	0.786	45	0.405	0.122	0.051	

Tabla 15 Fuente: Elaboración propia. Resultado de Deflexiones Máxima por Zona Homogénea del Cuerpo A, Carril de Baja.

La deflexión normalizada en la Tabla 15, tiene el valor de la deflexión promedio de la zona homogénea más una vez la desviación estándar.

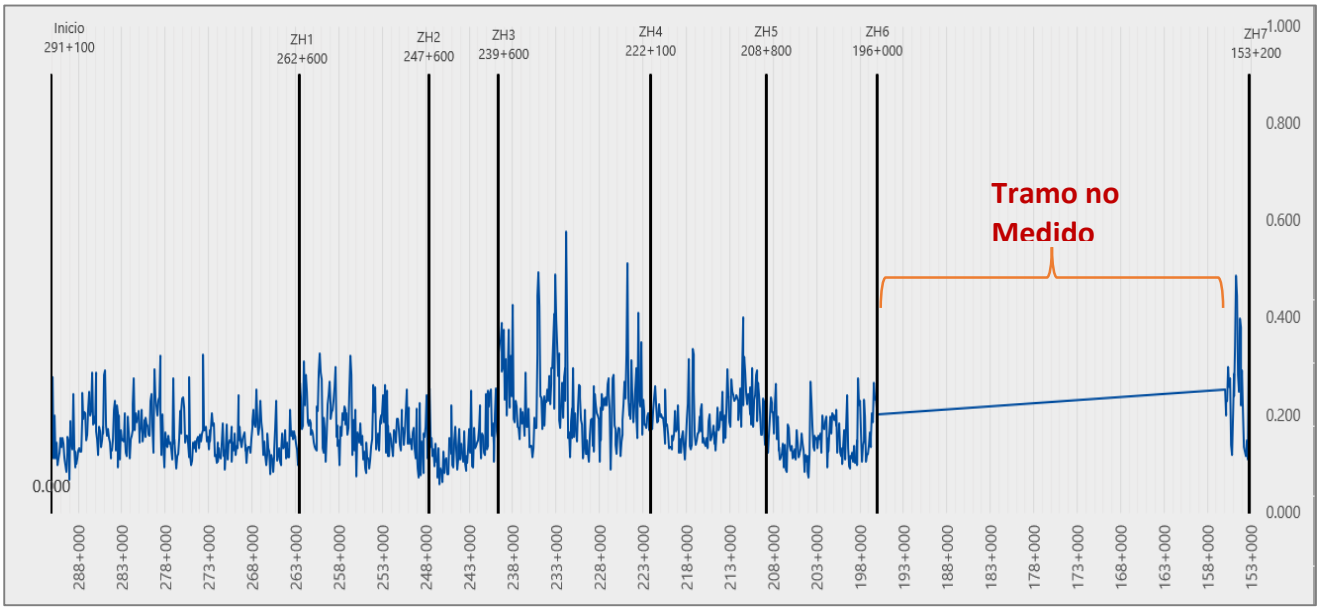
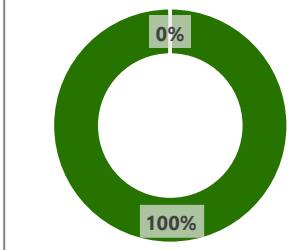


Figura 47. Fuente: Elaboración propia. Gráfica de Zonas Homogéneas del Cuerpo B, Carril de Alta.



Información	
Carretera	Kantunil - Cancún
Tramo Referido a Carretera	Del km 291+000 al km 196+000 y Del km 156+000 al km 153+200
Tramo Referido a Tren	Del km 7236+000 al km 7141+000 y Del km 7101+000 al km 7098+200
Cuerpo	B
Carril	Alta

Longitud evaluada	Promedio ponderado DN	Zonas homogéneas
97.9 km	0.24	7

Zona homogénea	Cadenamiento Referido a Carretera		Cadenamiento Referido a Tren		Longitud [km]	Deflexión Normalizada Característica (mm)	Radio curvatura (m)	BLI (mm)	MLI (mm)	LLI (mm)	Condición
	Inicio (km)	Fin (km)	Inicio (km)	Fin (km)							
1	291+100	262+600	7236+100	7207+600	28.5	0.205	305	0.104	0.032	0.010	Buena
2	262+600	247+600	7207+499	7192+600	15.0	0.231	289	0.116	0.038	0.010	Buena
3	247+600	239+600	7192+500	7184+600	8.0	0.193	372	0.090	0.028	0.009	Buena
4	239+600	222+100	7184+498	7167+100	17.5	0.313	218	0.153	0.049	0.011	Buena
5	222+100	208+800	7166+999	7153+800	13.3	0.250	224	0.138	0.037	0.008	Buena
6	208+800	196+000	7153+700	7141+000	12.8	0.198	307	0.101	0.030	0.008	Buena
7	156+000	153+200	7101+000	7098+200	2.8	0.343	226	0.154	0.055	0.013	Buena

Tabla 16. Fuente: Elaboración propia. Resultado de Deflexiones Máxima por Zona Homogénea del Cuerpo B, Carril de Alta.

La deflexión normalizada en la Tabla 16, tiene el valor de la deflexión promedio de la zona homogénea más una vez la desviación estándar.

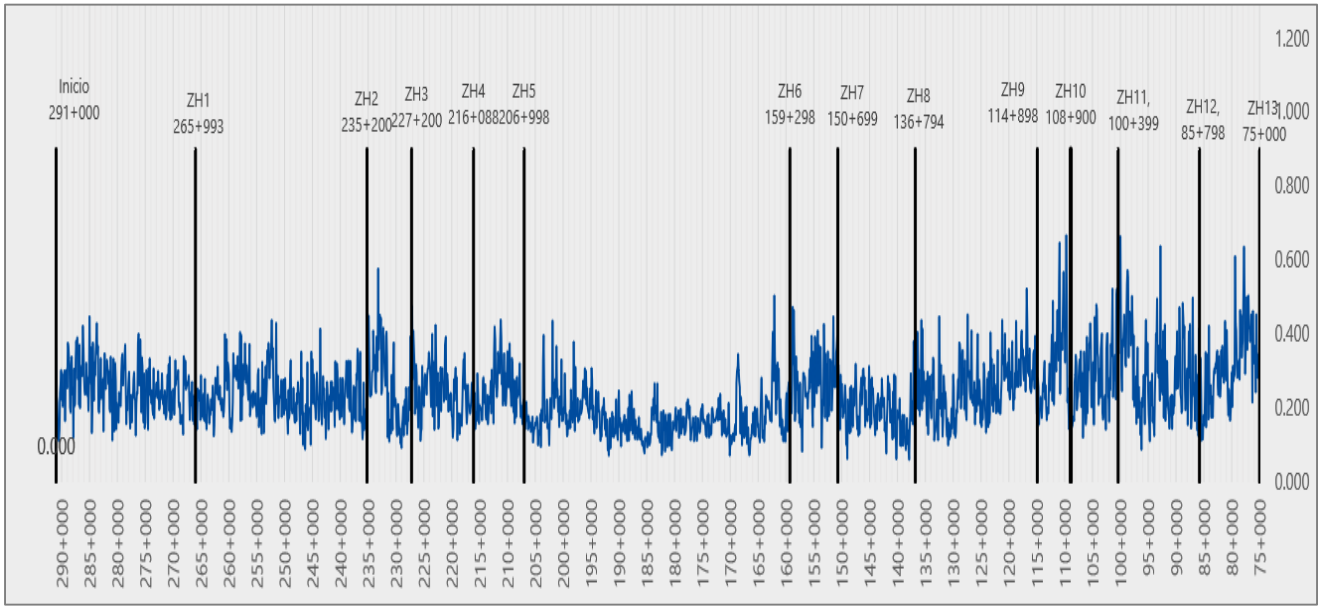
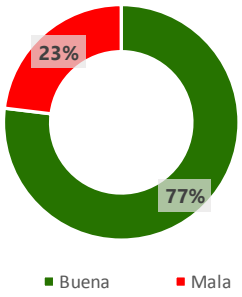


Figura 48. Fuente: Elaboración propia. Gráfica de Zonas Homogéneas del Cuerpo B, Carril de Baja.



Información

Carretera	Kantunil - Cancún
Tramo Referido a Carretera	Del km 291+000 al km 75+000
Tramo Referido a Tren	Del km 7236+000 al km 7020+000
Cuerpo	B
Carril	Baja

Longitud evaluada	Promedio ponderado DN	Zonas homogéneas
216 km	0.31	13

Zona homogénea	Cadenamiento Referido a Carretera		Cadenamiento Referido a Tren		Longitud [km]	Deflexión Normalizada Característica (mm)	Radio curvatura (m)	BLI (mm)	MLI (mm)	LLI (mm)	Condición
	Inicio (km)	Fin (km)	Inicio (km)	Fin (km)							
1	291+000	265+993	7236+000	7210+993	25.0	0.320	220	0.147	0.070	0.022	Buena
2	265+993	235+200	7210+899	7180+200	30.8	0.299	245	0.135	0.064	0.019	Buena
3	235+200	227+200	7180+100	7172+200	8.0	0.366	208	0.164	0.063	0.015	Buena
4	227+200	216+088	7172+100	7161+088	11.1	0.317	197	0.159	0.056	0.016	Buena
5	216+088	206+998	7160+999	7151+998	9.1	0.314	182	0.168	0.051	0.011	Buena
6	206+998	159+298	7151+898	7104+298	47.7	0.231	276	0.115	0.035	0.009	Buena
7	159+298	150+699	7104+200	7095+699	8.6	0.354	182	0.178	0.062	0.015	Buena
8	150+699	136+794	7095+596	7081+794	13.9	0.257	260	0.126	0.039	0.011	Buena
9	136+794	114+898	7081+697	7059+898	21.9	0.335	204	0.160	0.057	0.017	Buena
10	114+898	108+900	7059+798	7053+900	6.0	0.429	159	0.207	0.060	0.017	Mala
11	108+900	100+399	7053+801	7045+399	8.5	0.382	178	0.177	0.062	0.019	Buena
12	100+399	85+798	7045+298	7030+798	14.6	0.411	178	0.185	0.066	0.019	Mala
13	85+798	75+000	7030+700	7020+000	10.8	0.414	157	0.206	0.063	0.017	Mala

Tabla 17. Fuente: Elaboración propia. Resultado de Deflexiones Máxima por Zona Homogénea del Cuerpo B, Carril de Baja.

La deflexión normalizada en la Tabla 17, tiene el valor de la deflexión promedio de la zona homogénea más una vez la desviación estándar.

En términos generales, en las tablas anteriores se observa que los valores promedio asentados de deflexión normalizada máxima, se aclara se le adicionó una vez la desviación estándar para hacerlas representativas del tramo, varían a lo largo de los tramos auscultados, debido a la diferente configuración estructural del pavimento y espesores diferentes.

Una vez obtenido los sspesores promedios para cada Zona homogénea se prosigue a gráficas dichos valores para su mejor interpretación.

CAPAS	Zonas Homogéneas							
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
C.A.	4	5	5	4	4	4	3	3
Base H.	17	20	17	18	17	19	19	18
Sub-Base	28	33	23	31	22	30	23	42
Terraplén	35	49	29	62	54	42	65	60
T.N.	27	16	32	34	26	36	45	-
Prof. (cm)	**111**	**123**	**106**	**149**	**123**	**131**	**155**	**123**

Tabla 18. Fuente: Elaboración propia. Estructura del Pavimento del Cuerpo A carril de Baja, con respecto a las zonas homogéneas.

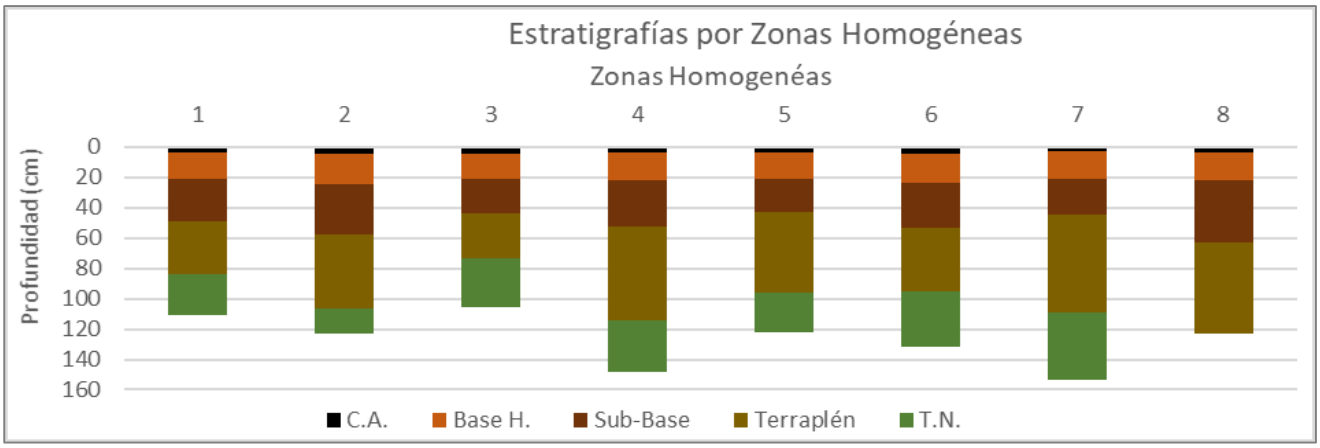


Figura 49. Fuente: elaboración propia. Estratigrafía del cuerpo A carril de Baja.

CAPAS	Zonas Homogéneas						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
C.A.	3	3	3	3	3	4	4
Base H.	19	19	20	21	18	20	21
Sub-Base	25	29	31	19	22	28	33
Terraplén	37	36	35	59	72	53	45
Prof. (cm)	**84**	**87**	**89**	**102**	**115**	**105**	**103**

Tabla 19. Fuente: Elaboración propia. Estructura del Pavimento del Cuerpo B carril de Alta, con respecto a las zonas homogéneas.

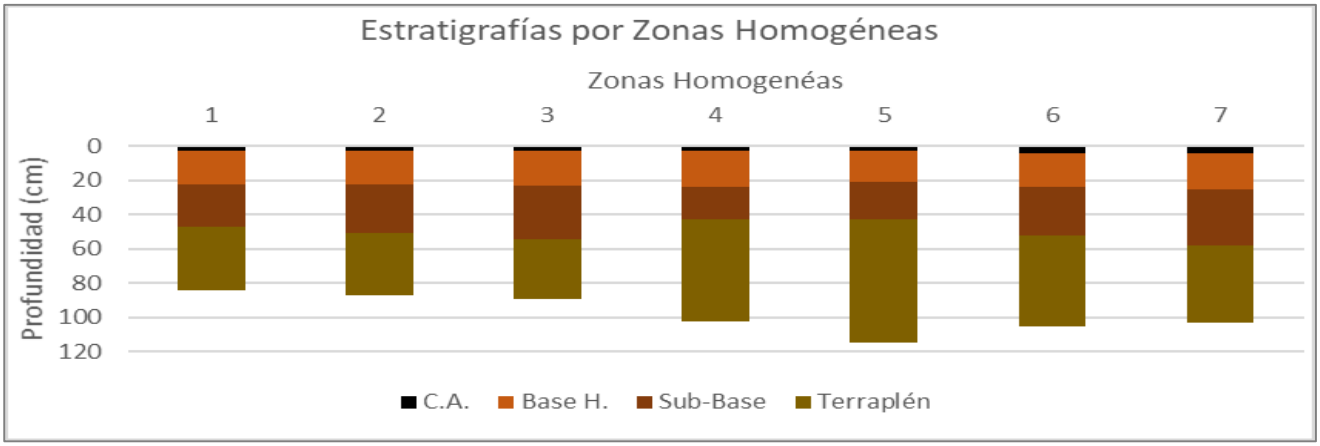


Figura 50. Fuente: elaboración propia. Estratigrafía del cuerpo B carril de Alta.

CAPAS	Zonas Homogéneas												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
C.A.	3	3	3	3	3	4	4	5	5	3	4	4	4
Base H.	19	19	20	21	18	20	21	17	19	22	22	20	20
Sub-Base	25	29	31	19	22	28	33	33	32	36	25	26	35
Terraplén	37	36	35	59	72	53	45	38	45	28	63	39	47
Prof. (cm)	**84**	**87**	**89**	**102**	**115**	**105**	**103**	**93**	**101**	**89**	**114**	**89**	**106**

Tabla 20. Fuente: Elaboración propia. Estructura del Pavimento del Cuerpo B carril de Baja, con respecto a las zonas homogéneas.

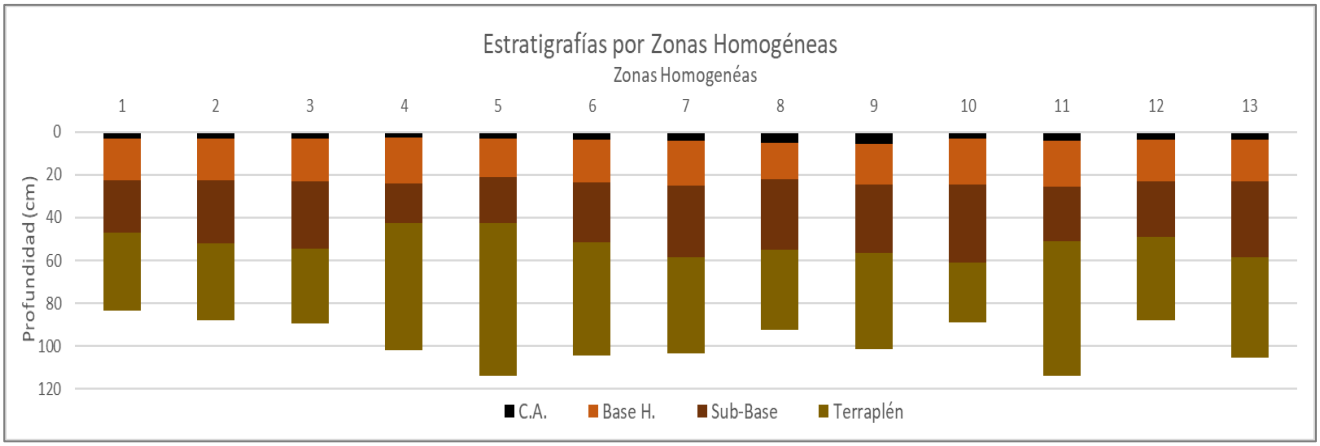


Figura 51. Fuente: Elaboración propia. Estratigrafía del cuerpo B carril de Baja.

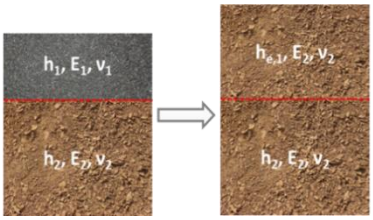
Analizando la información de los espesores de la estructura del pavimento se observa que para la carpeta asfáltica el espesor promedio es inferior a los 7.5 cm motivo por el cual no se puede hacer el retrocálculo con los valores promedios de la carpeta asfáltica. El Software ELMOD, exige como valor mínimo de 3 cm de espesor y para lo cual con la información ya obtenida se afirma que no cumple con las especificaciones requeridas del programa.

El Método de los Espesores Equivalentes es una ecuación, a cual hace una transformación del espesor que se desea transformar (Carpeta Asfáltica) a un espesor equivalente de la capa inferior (Base Hidráulica) y así conocer el espesor equivalente en términos de esa capa. Para generar dicha equivalencia se toman valores de los Módulos Típicos para ambas capas, así como los coeficientes de Poisson.

A continuación, se muestra la ecuación de Espesor Equivalente, así como una figura ilustrativa.

(14)

$$\frac{h_1^3 * E_1}{1 - v_1^2} = \frac{h_{e.1}^3 * E_2}{1 - v_2^2} \rightarrow h_{e1} = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} * \frac{1 - v_2^2}{1 - v_1^2}$$



Donde:
he1= Espesor Equivalente (cm)
h1= Espesor de la Capa 1 (cm)
h2= Espesor de la Capa 2 (cm)
E1= Módulo de Elasticidad Típico de la Capa 1 (MPa)
E2= Módulo de Elasticidad Típico de la Capa 2 (MPa)
µ1 = Coeficiente de Poisson de la Capa 1 y Capa 2
µ2 = Coeficiente de Poisson de la Capa 2

Tomando en cuenta la fórmula anterior se toman como valores de entrada los Valores Típicos de los Módulos de Elasticidad que están en la Norma ASTM D 5858 (Módulos Semillas); de igual manera, se les aplica los valores conocidos para el coeficiente de Poisson tanto para una Carpeta Asfáltica como para una Base Hidráulica.

Conociendo los valores de entrada para la ecuación se procedió al cálculo, misma que arrojó la información que se muestra en las figura 52, 53 y 54, donde se obtuvo el espesor equivalente de la carpeta asfáltica en valores de la Base Hidráulica y en la cual el valor a utilizar para el retrocálculo y la obtención del Módulo de Elasticidad de la nueva capa será la suma del espesor equivalente calculado más el espesor de la Base Hidráulica existente, mismo que se le asignó el nombre de “Carpeta Asfáltica + Base Hidráulica”. Los Espesores de las Capas Inferiores no se modifican.

Para efectos de cálculo se tomaron los valores típicos de módulos de elasticidad tanto para una Carpeta Asfáltica como de una Base Hidráulica de la norma ASTM D 5858, así mismo para los coeficientes de Poisson. Cabe mencionar que para dicho coeficiente el valor es el

mismo para ambas capas por lo que puede ocasionar incertidumbre, pero no se debe de perder la visión que el valor puede cambiar para otra capa.

Zona Homogénea	Carpeta Asfáltica			Base Hidráulica			Espesor Equivalente (he1)	Espesor Total de la Capa (cm)
	Espesor de Capa Superior h1 (cm)	Módulo Elástico Típico ASTM (Mpa) E1	Coeficiente de Poisson μ1	Espesor de Capa Inferior h2 (cm)	Módulo Elástico Típico ASTM (Mpa) E2	Coeficiente de Poisson μ2		
1	4	3500	0.35	17	250	0.35	10	**27**
2	5	3500	0.35	20	250	0.35	12	**32**
3	5	3500	0.35	17	250	0.35	12	**29**
4	4	3500	0.35	18	250	0.35	10	**28**
5	4	3500	0.35	17	250	0.35	10	**27**
6	4	3500	0.35	19	250	0.35	10	**29**
7	3	3500	0.35	19	250	0.35	7	**26**
8	3	3500	0.35	18	250	0.35	7	**25**

Tabla 21. Fuente: Elaboración propia. Cálculo del Espesor Equivalente Cuerpo A, C. Baja. Espesores dados en (cm).

Zonas Homogéneas	Carpeta Asfáltica + Base H.	Sub-Base	Terraplén	T.N.
1	27	28	35	27
2	32	33	49	16
3	29	23	29	32
4	28	31	62	34
5	27	22	54	26
6	29	30	42	36
7	26	23	65	45
8	25	42	60	-

Tabla 22. Fuente: Elaboración propia. Espesor Equivalente Cuerpo A, C. Baja. Espesores dados en (cm).

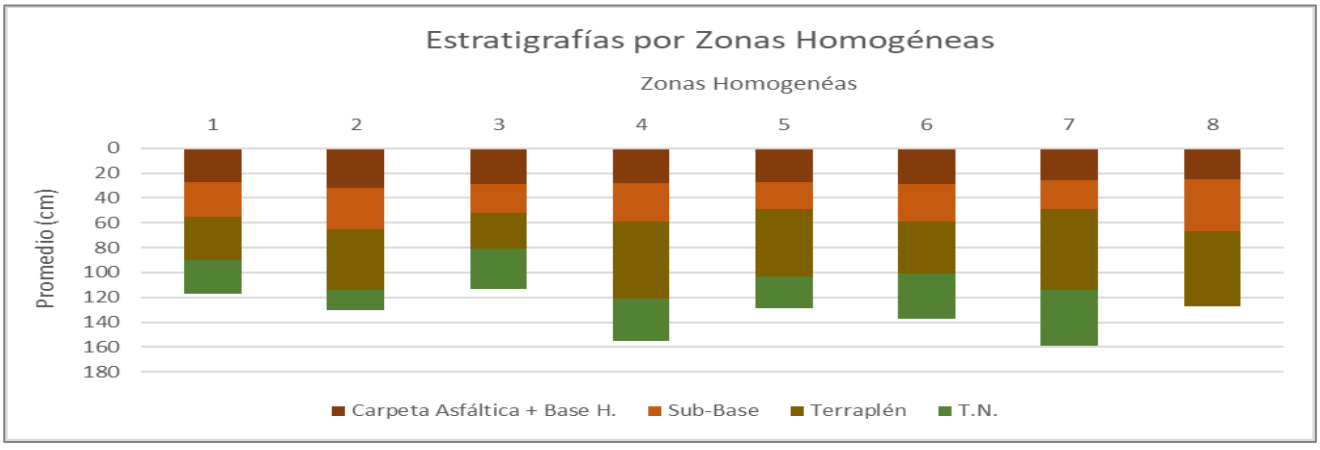


Figura 52. Fuente: Elaboración propia. Estratigrafía del cuerpo A carril de Baja, con la nueva capa y nuevo espesor.

Zona Homogénea	Carpeta Asfáltica			Base Hidráulica			Espesor Equivalente he1 (cm)	Espesor Total de la Capa [he1+h2] (cm)
	Espesor de Capa Superior h1 (cm)	Módulo Elástico Típico ASTM (Mpa) E1	Coeficiente de Poisson μ1	Espesor de Capa Inferior h2 (cm)	Módulo Elástico Típico ASTM (Mpa) E2	Coeficiente de Poisson μ2		
1	3	3500	0.35	19	300	0.35	7	**26**
2	3	3500	0.35	19	300	0.35	7	**26**
3	3	3500	0.35	20	300	0.35	7	**27**
4	3	3500	0.35	21	300	0.35	7	**28**
5	3	3500	0.35	18	300	0.35	7	**25**
6	4	3500	0.35	20	300	0.35	9	**29**
7	4	3500	0.35	21	300	0.35	9	**30**

Tabla 23. Fuente: Elaboración propia. Cálculo del Espesor Equivalente Cuerpo B, C. Alta. Espesores dados en (cm).

Zonas Homogéneas	C.A. + Base H.	Sub-Base	Terraplén
1	26	25	37
2	26	29	36
3	27	31	35
4	28	19	59
5	25	22	72
6	29	28	53
7	30	33	45

Tabla 24. Fuente: Elaboración propia. Espesor Equivalente Cuerpo B, Carril de Alta. Espesores dados en (cm).

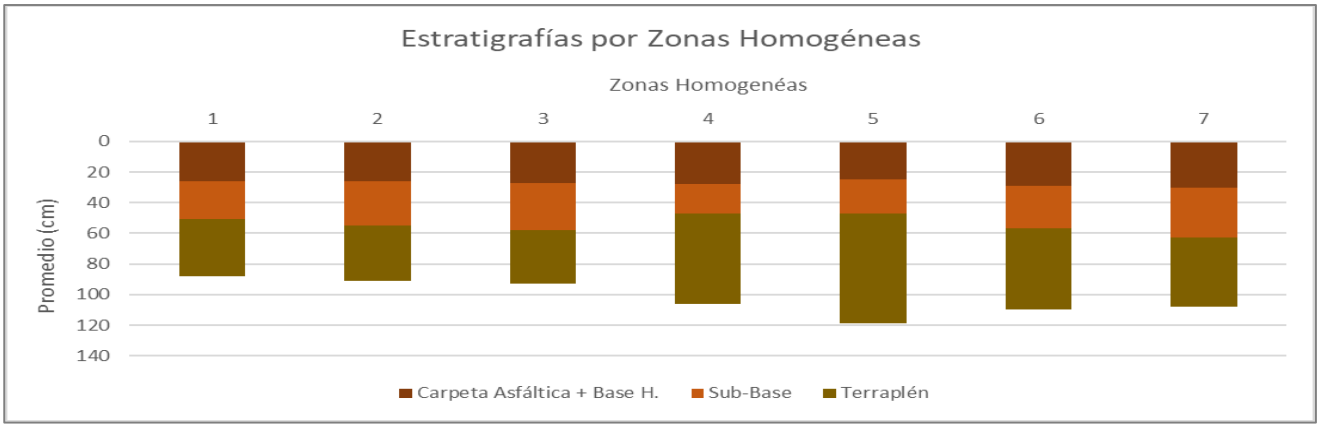


Figura 53. Fuente: Elaboración propia. Estratigrafía del cuerpo B carril de Alta, con la nueva capa y nuevo espesor.

Zona Homogénea	Carpeta Asfáltica			Base Hidráulica			Espesor Equivalente he1 (cm)	Espesor Total de la Capa [he1+h2] (cm)
	Espesor de Capa Superior h1 (cm)	Módulo Elástico Típico ASTM (Mpa) E1	Coeficiente de Poisson μ1	Espesor de Capa Inferior h2 (cm)	Módulo Elástico Típico ASTM (Mpa) E2	Coeficiente de Poisson μ2		
1	3	3500	0.35	19	300	0.35	7	**26**
2	3	3500	0.35	19	300	0.35	7	**26**
3	3	3500	0.35	20	300	0.35	7	**27**
4	3	3500	0.35	21	300	0.35	7	**28**
5	3	3500	0.35	18	300	0.35	7	**25**
6	4	3500	0.35	20	300	0.35	9	**29**
7	4	3500	0.35	21	300	0.35	9	**30**
8	5	3500	0.35	17	300	0.35	11	**28**
9	5	3500	0.35	19	300	0.35	11	**30**
10	3	3500	0.35	22	300	0.35	7	**29**
11	4	3500	0.35	22	300	0.35	9	**31**
12	4	3500	0.35	20	300	0.35	9	**29**
13	4	3500	0.35	20	300	0.35	9	**29**

Tabla 25. Fuente: Elaboración propia. Cálculo del Espesor Equivalente Cuerpo B, C. Baja. Espesores dados en (cm).

Zonas Homogéneas	C.A. + Base H.	Sub-Base	Terraplén
1	26	25	37
2	26	29	36
3	27	31	36
4	28	19	59
5	25	22	72
6	29	28	53
7	30	33	45
8	28	33	38
9	30	32	45
10	29	36	28
11	31	25	63
12	29	26	39
13	29	35	47

Tabla 26. Fuente: Elaboración propia. Espesor Equivalente Cuerpo B, Carril de Baja. Espesores dados en (cm).

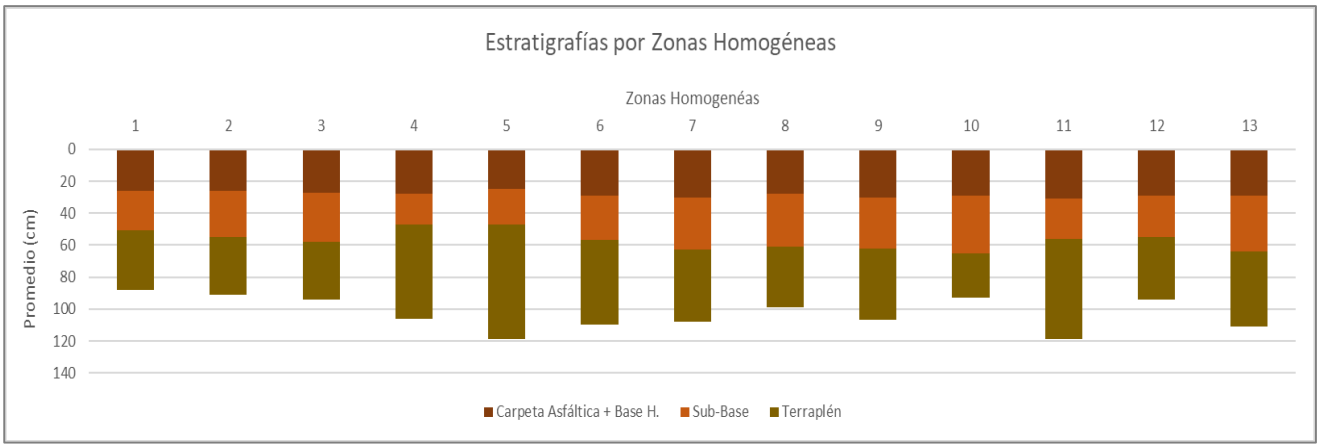


Figura 54. Fuente: Elaboración propia. Estratigrafía del cuerpo B carril de Baja, con la nueva capa y nuevo espesor.

Realizado el nuevo cálculo con base en el al Método de Odermark para obtener una nueva capa y un nuevo espesor se prosigue al retrocálculo para obtener los módulos de elasticidad correspondientes tanto para el cuerpo A como el B.

Como se mencionó anteriormente, la existencia de los espesores inferiores de 7.5 cm de carpeta asfáltica indica que el tramo únicamente recibió lo que corresponde un riego de sello debido a las adecuadas condiciones estructurales. La deflexión media bajo la carga constituye un indicador global de la integridad estructural del pavimento; así mismo el módulo de elasticidad de las capas del pavimento, que puede obtenerse a partir de las técnicas de cálculo inverso o retrocálculo, constituye un indicador de la resistencia a la fatiga del pavimento. En estos valores de módulo de Elasticidad, se aplicarán debidamente los valores de ajuste establecido en la Tabla 27 dentro de la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento AASHTO 1993, Capitulo 5 “Métodos de Rehabilitación con sobre Capas”

Los módulos de elasticidad permiten conocer la capacidad que tiene una de las capas que conforman al pavimento para soportar el tránsito que circula sobre la autopista. Dicho módulo permiten conocer la rigidez de cada capa del pavimento, lo cual se puede traducir en qué tanto se deformara el material que está sometido a los esfuerzos transmitidos por lo diversos tipos de vehículos que circulan por el tramo.

Las capas que se encuentren por debajo de esta estructura se consideran como parte de las terracerías y cumplen otro tipo de funciones. Es importante que la capa subrasante siempre se encuentra inmediatamente debajo de la estructura del pavimento. Esta capa tiene un papel fundamental en el diseño de cualquier pavimento, ya que dicha capa servirá como base de la

estructura del pavimento, y si su calidad es mala, será lógico que existan problemas en la operación en la estructura completa del pavimento.

Ahora bien, por cada deflexión medida se calcularon los módulos de elasticidad de los materiales constitutivos de las calas de pavimento, empleando el Software ELMOD 6.0, que es especializado para la aplicación del procedimiento de retrocálculo, el cual se alimentará con el valor de la deflexión y su cuenca normalizada (700 Kpa), espesores de las capas de pavimento y el tipo de material de las capas de la estructura del pavimento obtenidas con la exploración geotécnica.

ASTM D 5858, Módulos semilla			
Material	PSI	MPa	Kg/cm²
Concreto Asfaltico	500,000	3,500	35,700
Concreto Cemento Portland	5,000,000	35,000	357,000
Bases tratadas con cemento	600,000	4,100	41,820
Bases Granulares	30,000	200	2,040
Sub-Bases Granulares	15,000	100	1,020
Suelos Cohesivos	7,000	50	510

Tabla 27. Fuente: ASTM D 5858. Módulos Semilla.

Cabe aclarar que, a partir de la estructura de pavimento considerada, el software ELMOD cálculo los módulos de elasticidad de la nueva capa denominada “Carpeta Asfáltica + Base Hidráulica” al igual que la Subbase y Terraplén. En el caso de los módulos de la nueva capa “Carpeta Asfáltica + Base Hidráulica” se consideró un módulo de elasticidad típico de una base hidráulica. Sin embargo, el módulo utilizado fue un poco alto debido a la adición de otra capa. Esto para todos los casos tanto para el Cuerpo A y B, ver Figuras de la 55 a la 60. En función del comportamiento de las gráficas de área normalizada – deflexión máxima, se aprecia que la condición de la estructura del pavimento en la mayoría de los casos, presenta una estructura resistente.

De igual manera se puede observar en unas líneas paralelas que están a todo lo largo de las gráficas y se pueden definir como los valores típicos de las capas en estudio en este caso, el módulo de elasticidad típico de una base hidráulica, Subbase y terraplén.

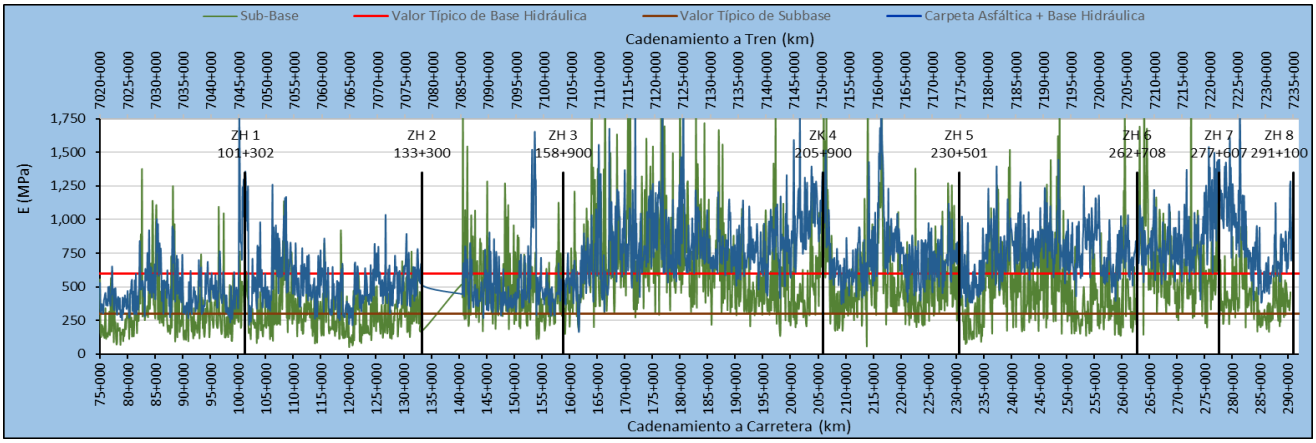


Figura 55. Fuente: Elaboración propia software ELMOD. Módulos de Elasticidad para la Carpeta Asfáltica + Base Hidráulica y Subbase del Cuerpo A, Carril de Baja. E (Mpa).

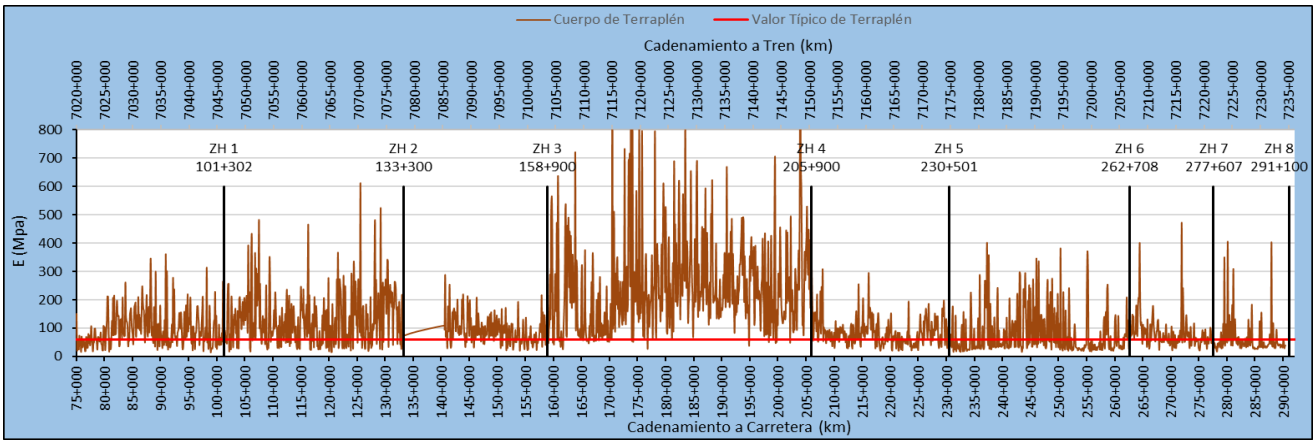


Figura 56. Fuente: Elaboración propia software ELMOD. Módulos de Elasticidad para la Capa Terraplén del Cuerpo A, Carril de Baja. E (Mpa).

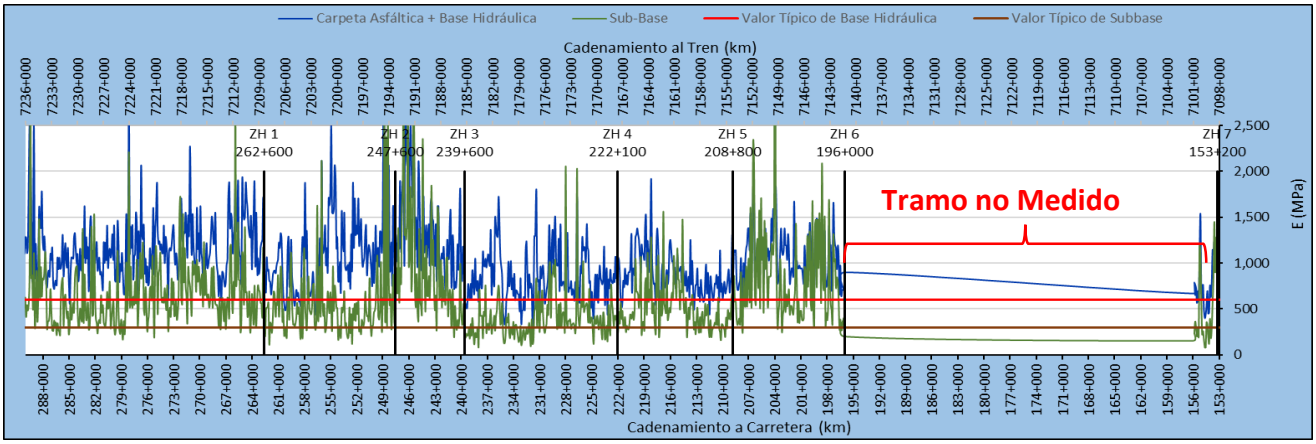


Figura 57. Fuente: Elaboración propia software ELMOD. Módulos de Elasticidad para la Carpeta Asfáltica + Base Hidráulica y Subbase del Cuerpo B, Carril de Alta. E (Mpa).

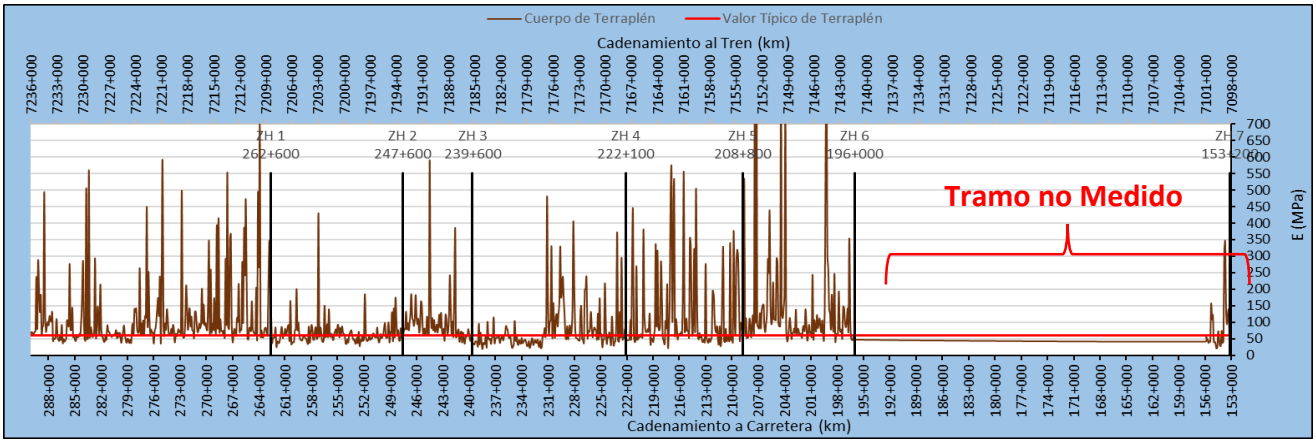


Figura 58. Fuente: Elaboración propia software ELMOD. Módulos de Elasticidad para la Capa Terraplén del Cuerpo B, Carril de Alta. E (Mpa).

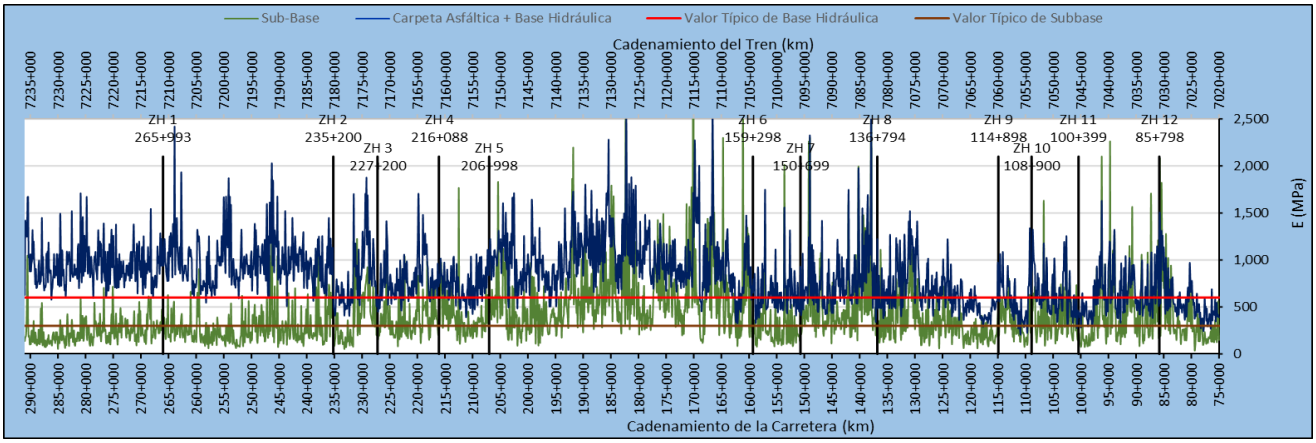


Figura 59. Fuente: Elaboración propia software ELMOD. Módulos de Elasticidad para la Carpeta Asfáltica + Base Hidráulica y Subbase del Cuerpo B, Carril de Baja. E (Mpa).

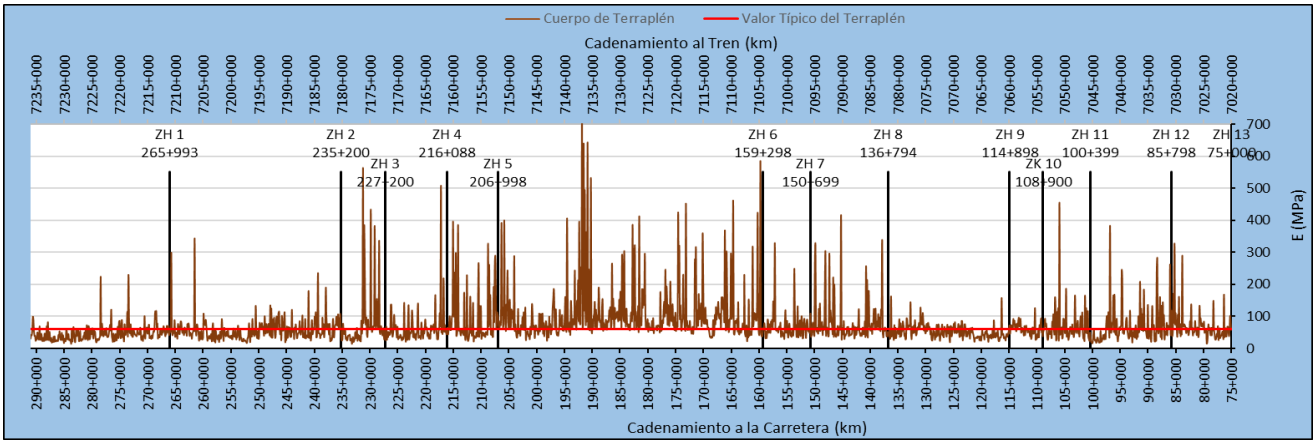


Figura 60. Fuente: Elaboración propia software ELMOD. Módulos de Elasticidad para la Capa Terraplén del Cuerpo B, Carril de Baja. E (Mpa).

En las Figuras (gráficas) anteriores se presentan los módulos obtenidos para ambos cuerpos A y B tanto para el carril de Baja y Alta y Baja, respectivamente. Se observa que los módulos de elasticidad para todas las capas son valores altos del valor típico, principalmente en la zona homogénea 4 del cuerpo A, 2 y 3 del cuerpo B carril de alta y finalmente la zona homogénea 6 del cuerpo B carril de baja.

Este retrocálculo fue con base al Método de los Espesores Equivalentes de Odermark, como ya se mencionó anteriormente los espesores de carpeta asfáltica son espesores inferiores a lo requerido por el software de tal manera que se optó por dicho método mencionado y en el cual los módulos obtenidos se consideran congruentes en base a los valores de las deflexiones obtenidas en campo.

Para concluir, se puede observar que las gráficas (Figuras) de los módulos obtenidos están por arriba de valor típico lo cual concluye que las capas que conforman el pavimento en ambos cuerpos son de buena calidad.

A continuación se enlista los 3 criterios que se utilizaron para obtener los Módulos de Elasticidad los cuales fueron:

1.- Los promedios de los PCA conocidos hasta el momento para las Zonas Homogéneas.
2.- Método de Espesores Equivalentes (Espesores de Odermark).
3.- Aplicando un Espesor de 7.5 cm mínimo a la Carpeta Asfáltica.

Cabe destacar, que a partir de la obtención de los Módulos de Elasticidad arrojados por el programa ELMOD a dichos módulos se les aplicó un Factor de Ajuste para obtener un Módulo de Elasticidad similar a los obtenidos en pruebas de laboratorio.

Tipo de pavimento	Factor de ajuste "C" promedio	Coeficiente de variación, %
Base / subbase granular bajo losas de concreto	1.32	74
Base / subbase granular bajo una capa asfáltica de rodadura o de base	0.62	44
Base / subbase granular entre dos capas estabilizadas con cemento o con productos bituminosos	1.43	80

Tabla 28.Fuente: Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT), Vol. III, 2017. Factor de Ajuste para Capas de Base o Subbase Granular.

Tipo de pavimento	Factor de ajuste "C" promedio	Coeficiente de variación, %
Suelos de subrasante bajo una subrasante estabilizada.	0.75	13
Suelos de subrasante bajo un pavimento sin una capa de base y/o subbase granular no ligada, y sin subrasante estabilizada.	0.52	37
Suelo de subrasante bajo un pavimento con una capa de base y/o subbase granular no ligada, pero sin subrasante estabilizada.	0.35	49

Tabla 29. Fuente: Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT), Vol. III, 2017. Factor de Ajuste para Suelos de Subrasante.

Sistema de clasificación		Mr Laboratorio	Mrr Retrocálculo	Factor de ajuste – C
SUCS	AASHTO	MPa	MPa	
ML, CL	A-2, A-4, A-6	48	172	0.28
CL	A-2, A-6	33	156	0.21
CL, SC	A-4	21	189	0.11
SM, ML	A-4, A-2-5	41	93	0.44
CH	A-7-6	41	135	0.31
SM	A-2-4	28	97	0.29
CL, SC	A-4	31	98	0.31

Tabla 30. Fuente: Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT), Vol. III, 2017. Factor de Ajuste para suelos de Subrasante Fino – Granulares.

Posteriormente se continúa con la comparativa de los tres criterios con base a la obtención de los Módulos de Elasticidad Característico, el cual consiste en obtener el promedio por zonas homogéneas, así mismo su desviación estándar y la resta de dicho promedio con la desviación da como resultado el Módulo Característico. Una vez obtenido los valores deseados se prosigue a graficarlo para su mejor interpretación y así poder conocer de manera más general el comportamiento de los Módulos Elásticos para capa con el criterio utilizado.

A continuación se muestra en las tablas 31, 32 y 33 los criterios en donde se realiza el procedimiento descrito anteriormente.

Zona Homogénea	Cadenamiento Referido a Carretera		Cadenamiento Referido a Tren		**Criterio 1** (Promedio por Zonas Homogéneas)_C.A.,B.H.,SubB,SubR											
					Carperta Asfáltica			Base Hidráulica			Sub-Base			Subrasante		
	Km Inicio	Km Final	Km Inicio	Km Final	Promedio	Desviacion Estandar	Módulo Característico (Mpa)	Promedio	Desviacion Estandar	Módulo Característico (Mpa)	Promedio	Desviacion Estandar	Módulo Característico (Mpa)	Promedio	Desviacion Estandar	Módulo Característico (Mpa)
1	291+000	265+993	7236+000	7210+993	5361.7	2804.8	2556.9	865.7	170.6	695.1	290.8	135.3	155.5	62.2	58.5	3.7
2	265+899	235+200	7210+899	7180+200	7001.2	3072.9	3928.3	868.3	167.2	701.1	287.3	170.3	117.0	124.3	101.7	22.7
3	235+100	227+200	7180+100	7172+200	5319.2	3032.2	2287.0	843.8	203.3	640.5	256.0	245.6	10.4	-		-
4	227+100	216+088	7172+100	7161+088	6121.4	3585.7	2535.6	682.0	174.8	507.2	431.7	200.5	231.2	107.0	89.3	17.7
5	215+999	206+998	7160+999	7151+998	8433.8	4338.2	4095.6	616.1	143.6	472.4	384.7	158.4	226.3	184.8	115.2	69.6
6	206+898	159+298	7151+898	7104+298	14061.9	6415.6	7646.2	780.0	196.4	583.6	723.9	307.8	416.1	273.9	149.3	124.7
7	159+200	150+699	7104+200	7095+699	10301.2	6950.4	3350.8	491.4	163.2	328.3	381.1	165.4	215.7	170.0	133.7	36.3
8	150+596	136+794	7095+596	7081+794	9796.6	4740.0	5056.6	698.3	216.4	481.9	463.2	243.6	219.6	218.6	106.9	111.8
9	136+697	114+898	7081+697	7060+000	5591.3	3274.4	2316.9	399.9	123.3	276.6	349.6	221.4	128.2	183.7	109.9	73.8
10	114+798	108+900	7059+898	7054+005	4301.8	1404.2	2897.6	596.6	179.5	417.2	290.3	114.2	176.1	-		-
11	108+801	100+399	7053+900	7045+499	4561.8	2685.5	1876.3	585.4	174.6	410.8	397.4	247.7	149.7	156.9	99.6	57.3
12	100+298	85+798	7045+399	7030+899	10119.7	5709.9	4409.8	553.3	172.0	381.3	396.4	281.9	114.6	165.7	109.5	56.2
13	85+700	75+000	7030+798	7020+100	6412.5	4562.4	1850.2	492.7	156.5	336.2	354.7	230.2	124.5	171.2	123.9	47.3

Tabla 31. Fuente: Elaboración propia. Módulos Característicos para el Criterio 1

Zona Homogénea	Cadenamiento Referido a Carretera		Cadenamiento Referido a Tren		**Criterio 2** (Espesor Equivalente de Odermark sobre la C.A.) Carpeta Asfálticas + Base Hidráulica, SubB.,SubR.								
					Carperta Asfáltica + Base Hidráulica			Sub-Base			Subrasante		
	Km Inicio	Km Final	Km Inicio	Km Final	Promedio	Desviacion Estandar	Módulo Característico (Mpa)	Promedio	Desviacion Estandar	Módulo Característico (Mpa)	Promedio	Desviacion Estandar	Módulo Característico (Mpa)
1	291+000	265+993	7236+000	7210+993	928.9	185.6	743.3	225.4	120.2	105.2	42.9	21.7	21.2
2	265+899	235+200	7210+899	7180+200	992.3	199.3	793.0	302.8	147.6	155.2	45.8	28.7	17.0
3	235+100	227+200	7180+100	7172+200	893.0	254.0	639.1	122.6	122.1	187.4	-		-
4	227+100	216+088	7172+100	7161+088	832.1	212.4	619.8	405.3	164.5	240.7	50.1	30.9	19.2
5	215+999	206+998	7160+999	7151+998	731.5	168.3	563.2	372.4	129.5	242.8	98.7	69.7	28.9
6	206+898	159+298	7151+898	7104+298	1037.4	229.0	808.4	537.6	168.3	369.4	168.5	64.0	104.4
7	159+200	150+699	7104+200	7095+699	671.2	180.5	490.7	339.2	134.1	205.1	49.5	27.2	22.3
8	150+596	136+794	7095+596	7081+794	797.4	242.2	555.2	468.1	158.7	309.5	75.6	35.7	39.9
9	136+697	114+898	7081+697	7060+000	658.4	234.2	424.2	305.7	151.5	154.2	47.2	19.3	27.8
10	114+798	108+900	7059+898	7054+005	672.7	222.5	450.2	145.6	76.6	69.0	-		-
11	108+801	100+399	7053+900	7045+499	672.0	233.4	438.6	351.4	149.8	201.6	101.0	57.3	43.7
12	100+298	85+798	7045+399	7030+899	669.1	221.1	448.1	367.6	169.7	198.0	90.8	72.1	18.7
13	85+700	75+000	7030+798	7020+100	574.8	213.8	360.9	407.6	157.5	250.1	47.6	34.1	13.5

Tabla 32. Fuente: Elaboración propia. Módulos Característicos para el Criterio 2

Zona Homogénea	Cadenamiento Referido a Carretera		Cadenamiento Referido a Tren		**Criterio 1** (Promedio por Zonas Homogéneas)_C.A.,B.H.,SubB,SubR											
					Carperta Asfáltica			Base Hidráulica			Sub-Base			Subrasante		
	Km Inicio	Km Final	Km Inicio	Km Final	Promedio	Desviacion Estandar	Módulo Característico (Mpa)	Promedio	Desviacion Estandar	Módulo Característico (Mpa)	Promedio	Desviacion Estandar	Módulo Característico (Mpa)	Promedio	Desviacion Estandar	Módulo Característico (Mpa)
1	291+000	265+993	7236+000	7210+993	5361.7	2804.8	2556.9	865.7	170.6	695.1	290.8	135.3	155.5	62.2	58.5	3.7
2	265+899	235+200	7210+899	7180+200	7001.2	3072.9	3928.3	868.3	167.2	701.1	287.3	170.3	117.0	124.3	101.7	22.7
3	235+100	227+200	7180+100	7172+200	5319.2	3032.2	2287.0	843.8	203.3	640.5	256.0	245.6	10.4	-		-
4	227+100	216+088	7172+100	7161+088	6121.4	3585.7	2535.6	682.0	174.8	507.2	431.7	200.5	231.2	107.0	89.3	17.7
5	215+999	206+998	7160+999	7151+998	8433.8	4338.2	4095.6	616.1	143.6	472.4	384.7	158.4	226.3	184.8	115.2	69.6
6	206+898	159+298	7151+898	7104+298	14061.9	6415.6	7646.2	780.0	196.4	583.6	723.9	307.8	416.1	273.9	149.3	124.7
7	159+200	150+699	7104+200	7095+699	10301.2	6950.4	3350.8	491.4	163.2	328.3	381.1	165.4	215.7	170.0	133.7	36.3
8	150+596	136+794	7095+596	7081+794	9796.6	4740.0	5056.6	698.3	216.4	481.9	463.2	243.6	219.6	218.6	106.9	111.8
9	136+697	114+898	7081+697	7060+000	5591.3	3274.4	2316.9	399.9	123.3	276.6	349.6	221.4	128.2	183.7	109.9	73.8
10	114+798	108+900	7059+898	7054+005	4301.8	1404.2	2897.6	596.6	179.5	417.2	290.3	114.2	176.1	-		-
11	108+801	100+399	7053+900	7045+499	4561.8	2685.5	1876.3	585.4	174.6	410.8	397.4	247.7	149.7	156.9	99.6	57.3
12	100+298	85+798	7045+399	7030+899	10119.7	5709.9	4409.8	553.3	172.0	381.3	396.4	281.9	114.6	165.7	109.5	56.2
13	85+700	75+000	7030+798	7020+100	6412.5	4562.4	1850.2	492.7	156.5	336.2	354.7	230.2	124.5	171.2	123.9	47.3

Tabla 33. Fuente: Elaboración propia. Módulos Característicos para el Criterio 3

Obteniendo la información anterior se continúa con un ordenamiento de la información, el cual consiste en ordenar por cada capa el valor del Módulo de Elasticidad característico obtenido por zona homogénea y por criterio.

A continuación se presentan la tabla 34 la información ordenada.

Zona Homogénea	**Carpeta Asfáltica**		
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
	Módulo Característico (Mpa)	Módulo Característico (Mpa)	Módulo Característico (Mpa)
1	2556.9	-	743.3
2	3928.3	-	793.0
3	2287.0	-	639.1
4	2535.6	-	619.8
5	4095.6	-	563.2
6	7646.2	-	808.4
7	3350.8	-	490.7
8	5056.6	-	555.2
9	2316.9	-	424.2
10	2897.6	-	450.2
11	1876.3	-	438.6
12	4409.8	-	448.1
13	1850.2	-	360.9

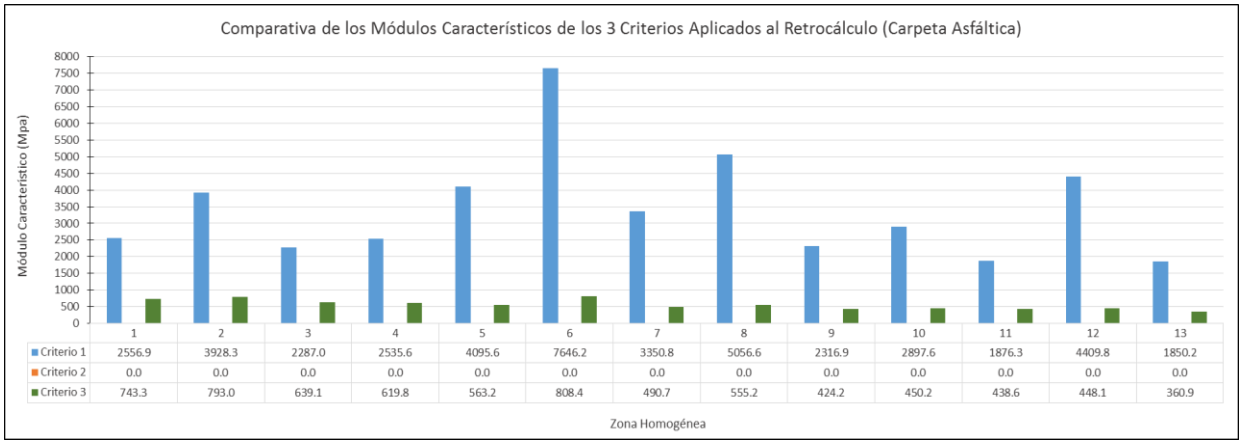
Zona Homogénea	**Base Hidráulica**		
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
	Módulo Característico (Mpa)	Módulo Característico (Mpa)	Módulo Característico (Mpa)
1	695.1	743.3	277.5
2	701.1	793.0	303.6
3	640.5	639.1	343.3
4	507.2	619.8	414.4
5	472.4	563.2	714.1
6	583.6	808.4	1178.5
7	328.3	490.7	573.6
8	481.9	555.2	779.6
9	276.6	424.2	334.2
10	417.2	450.2	229.5
11	410.8	438.6	237.2
12	381.3	448.1	423.9
13	336.2	360.9	398.6

Zona Homogénea	**Sub-Base**		
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
	Módulo Característico (Mpa)	Módulo Característico (Mpa)	Módulo Característico (Mpa)
1	155.5	105.2	145.2
2	117.0	155.2	207.5
3	10.4	187.4	62.1
4	231.2	240.7	113.2
5	226.3	242.8	186.4
6	416.1	369.4	336.7
7	215.7	205.1	155.7
8	219.6	309.5	302.6
9	128.2	154.2	110.9
10	176.1	69.0	124.0
11	149.7	201.6	216.5
12	114.6	198.0	202.8
13	124.5	250.1	202.3

Zona Homogénea	**Sub-Rasante**		
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
	Módulo Característico (Mpa)	Módulo Característico (Mpa)	Módulo Característico (Mpa)
1	3.7	21.2	37.9
2	22.7	17.0	63.9
3	-	-	-
4	17.7	19.2	26.9
5	69.6	28.9	24.3
6	124.7	104.4	105.6
7	36.3	22.3	54.0
8	111.8	39.9	122.3
9	73.8	27.8	52.4
10	-	-	-
11	57.3	43.7	89.9
12	56.2	18.7	92.6
13	47.3	13.5	65.5

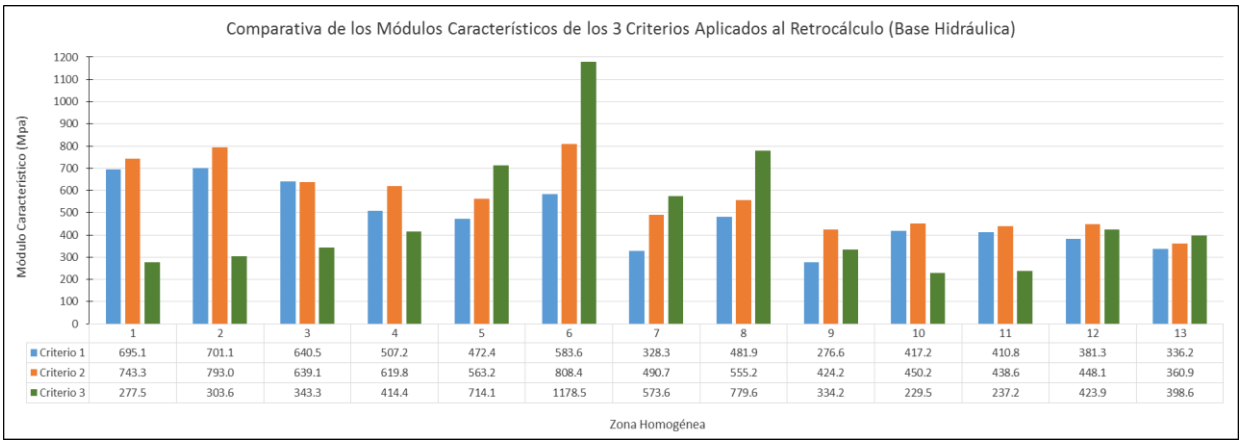
Tabla 34. Fuente: Elaboración propia. Comparativa de los módulos característicos.

Como último paso para realizar la comparativa se procede a obtener una serie de gráficas (Figura 61, 62, 63 y 64), las cuales representan los Módulos de Elasticidad Característico por cada criterio utilizado y por cada Capa la cual conforma la Estructura del Pavimento.



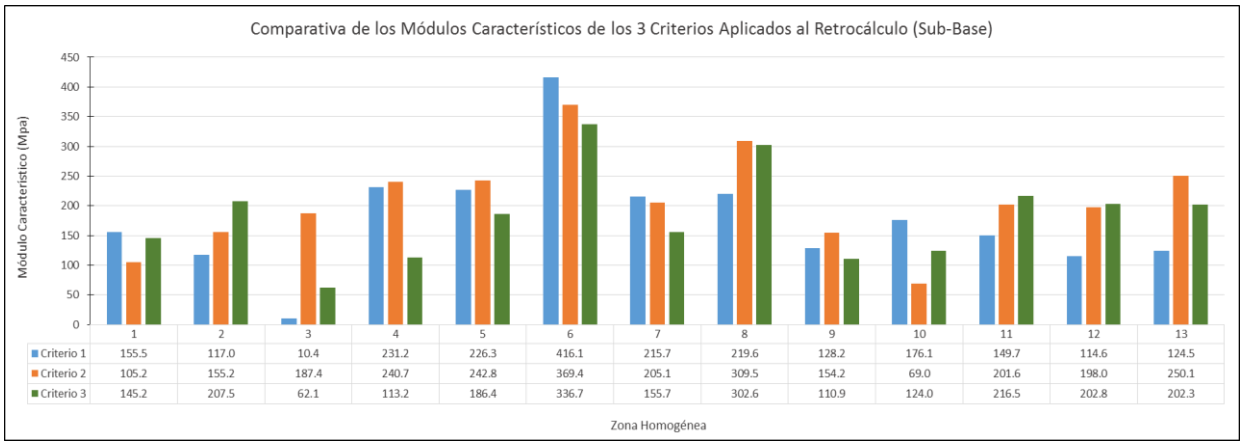
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Criterio 1	2556.9	3928.3	2287.0	2535.6	4095.6	7646.2	3350.8	5056.6	2316.9	2897.6	1876.3	4409.8	1850.2
Criterio 2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Criterio 3	743.3	793.0	639.1	619.8	563.2	808.4	490.7	555.2	424.2	450.2	438.6	448.1	360.9

Figura 61. Fuente: Elaboración propia. Comparativa de los Módulos Característicos de los 3 criterios aplicados al retrocálculo (Carpeta Asfáltica).



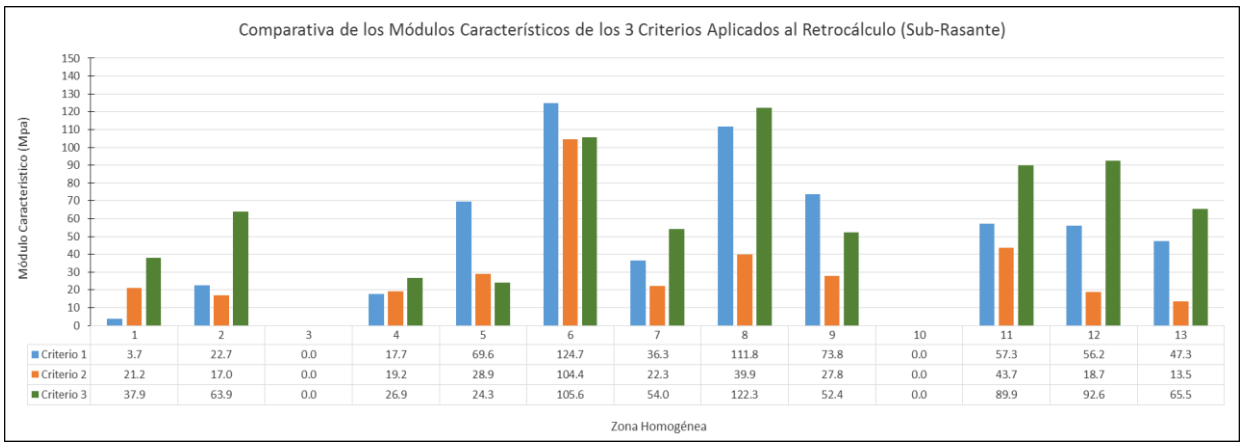
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Criterio 1	695.1	701.1	640.5	507.2	472.4	583.6	328.3	481.9	276.6	417.2	410.8	381.3	336.2
Criterio 2	743.3	793.0	639.1	619.8	563.2	808.4	490.7	555.2	424.2	450.2	438.6	448.1	360.9
Criterio 3	277.5	303.6	343.3	414.4	714.1	1178.5	573.6	779.6	334.2	229.5	237.2	423.9	398.6

Figura 62. Fuente: Elaboración propia. Comparativa de los Módulos Característicos de los 3 criterios aplicados al retrocálculo (Base Hidráulica).



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Criterio 1	155.5	117.0	10.4	231.2	226.3	416.1	215.7	219.6	128.2	176.1	149.7	114.6	124.5
Criterio 2	105.2	155.2	187.4	240.7	242.8	369.4	205.1	309.5	154.2	69.0	201.6	198.0	250.1
Criterio 3	145.2	207.5	62.1	113.2	186.4	336.7	155.7	302.6	110.9	124.0	216.5	202.8	202.3

Figura 63. Fuente: Elaboración propia. Comparativa de los Módulos Característicos de los 3 criterios aplicados al retrocálculo (Sub-Base).



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Criterio 1	3.7	22.7	0.0	17.7	69.6	124.7	36.3	111.8	73.8	0.0	57.3	56.2	47.3
Criterio 2	21.2	17.0	0.0	19.2	28.9	104.4	22.3	39.9	27.8	0.0	43.7	18.7	13.5
Criterio 3	37.9	63.9	0.0	26.9	24.3	105.6	54.0	122.3	52.4	0.0	89.9	92.6	65.5

Figura 64. Fuente: Elaboración propia. Comparativa de los Módulos Característicos de los 3 criterios aplicados al retrocálculo (Sub-Rasante).

Observando las gráficas anteriores se puede visualizar que para el criterio 1 los valores calculados para la Carpeta Asfáltica en comparación del criterio 3 son muy elevados los cuales son valores atípicos para una Carpeta Asfáltica. Así mismo, se sabe bien que para dicho cálculo los espesores manejados para el criterio 1 rondan los 4 cm, espesor inferior al aceptable por el programa ELMOD (7.5 cm).

Sin embargo, para las gráficas con los valores del Módulo de Elasticidad característico para la Base Hidráulica y Sub-Base los valores obtenidos rondan dentro del rango aceptable para las capas mencionadas anteriormente, no así para la última capa que es de la Subrasante, donde el valor en algunas zonas se encuentra por debajo del valor típico de una subrasante. Haciendo referencia a lo descrito anteriormente se puede concluir que para el criterio 1 queda descartada su fiabilidad, debido a que se manejaron espesores inferiores al requerido por el programa ELMOD, motivo por el cual la confiabilidad del retrocálculo se pone en duda.

Haciendo el análisis del criterio 3 se puede observar que para los valores obtenidos tanto para la carpeta asfáltica, base hidráulica, sub-base y sub-rasante los Módulos de elasticidad son muy favorables ya que se su mayoría se ubican dentro de un rango aceptable con los valores típicos de las bases mencionadas.

Sin embargo, no se pueden tomar como correctos debido a que el retrocálculo se ejecutó partiendo de un supuesto, donde se le otorgo el espesor mínimo a la Carpeta Asfáltica con el cual el programa ELMOD puede realizar el retrocálculo de manera confiable, dicho valor corresponde a 7.5 cm.

Por último se analiza el criterio 2, donde se aplica el método de Espesores Equivalentes el cual consiste en transformar la Carpeta Asfáltica a un espesor equivalente en términos de una Base Hidráulica, donde se pudo observar que los valores obtenidos tanto para Base Hidráulica, Sub-Base y Subrasante los Módulos de Elasticidad se comportan de tal manera que están dentro del rango adecuado haciendo la comparativa con los módulos típicos de cada capa ya mencionada.

Cabe destacar que la capa combinada de Carpeta Asfáltica + Base Hidráulica los Módulos son un poco elevados pero se consideran aceptables debido a que es una capa combinada.

Por lo que se concluye que el criterio 2 aporta una mayor confiabilidad a la hora de realizar el retrocálculo para poder obtener los Módulos de Elasticidad de las capas que conforman la estructura del pavimento.

4.2. Propuesta de un modelo de comportamiento

Con base al análisis estadísticos como el cómo el coeficiente de determinar R^2, Coeficiente de correlación, de los parámetros analizados se presenta a continuación la ecuación que nos permite estimar el valor del CBR de muestras alteradas en condiciones de contenido de agua óptimo y compactados en laboratorio al 100% de la densidad máxima, en inmersión.

CBR compacto en laboratorio es:

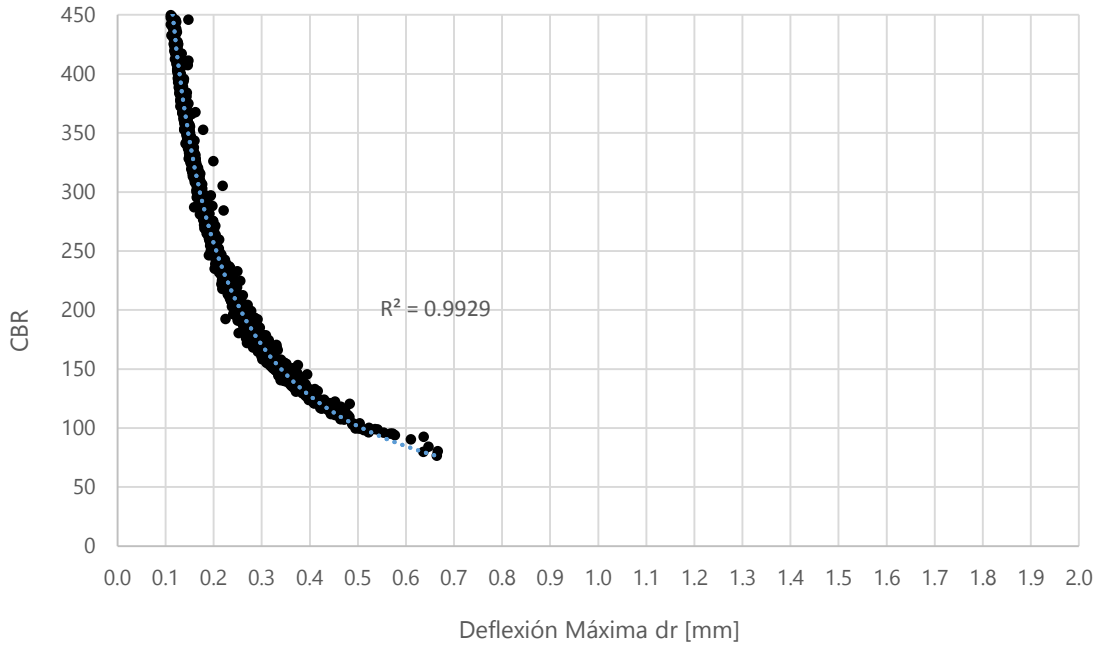


Figura 65. Fuente: Elaboración propia. Gráfica de comportamiento de CBR vs Deflexión Máxima dr.

Modelo Potencial

(15)

$$CBR_{Lab} = 50.469 * (dr * r)^{-1.011}$$

Donde:

dr: Deflexión máxima a la distancia r (mm)

r: Distancia del sensor r (mm)

Conclusión

Las muestras compactadas en el laboratorio en inmersión, presentan la mejor correlación entre CBR vs dr (Deflexión máxima a la distancia r (mm)) * r (Distancia del sensor r (mm)), con un R^2 de 0.9929

En general, se puede considerar que el cuerpo A y B auscultados pertenecientes a la carretera Mérida – Cancún, presentan una condición favorable, ya que a partir del análisis de deflexiones se establecieron tramos homogéneos para cada cuerpo, el cual hablando del cuerpo B las condiciones estructurales son favorables, con valores de deflexión menores al 0.4 mm, dentro de la condición estructural “buena”.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el cuerpo A se dividió en 8 Zonas Homogéneas y se realizó el análisis detallado a fin de poder conocer los módulos de elasticidad para todo el cuerpo. En conclusión, considerando las condiciones estructurales del cuerpo ya mencionado y la obtención de los módulos de elasticidad se puede concluir que los materiales que conforman la estructura del pavimento son de buena calidad debido a los módulos de elasticidad obtenidos.

Pero si bien se sabe el cuerpo A de dicha autopista será modificado para albergar una nueva estructura que corresponde al Tren.

Ahora bien la correlación entre el CBR de la subrasante y deflexiones máximas con Heavy Weight Deflectometer (FWD), se contó con una base de datos donde se tiene información simultánea de reflectometría y Valor de Soporte de California (CBR) de muestra alteradas de suelos compactos en laboratorio

Para tal fin, se determinaron los módulos de la subrasante mediante metodologías AASHTO 1993 con CBR de muestras alteradas con contenido de agua óptimo compactados al 100% de la densidad máxima, en inmersión.

En cuanto el cuerpo B del carril de alta, se dividió en 7 zonas homogéneas y de igual manera que el otro cuerpo se realizó el análisis detallado para determinar los módulos de elasticidad de dicho carril, En conclusión, tomando en cuenta las condiciones estructurales del cuerpo y la obtención de los módulos de elasticidad se puede concluir que los materiales que conforman la estructura del pavimento son de buena calidad debido a los módulos de elasticidad obtenidos.

Así mismo el carril de baja de dicho cuerpo se dividó en 13 zonas homogéneas y determinado los módulos de elasticidad para dicho carril, que los materiales que conforman la estructura del pavimento son de buena calidad debido a los módulos de elasticidad obtenidos a excepción de las zonas homogéneas 10, 12 y 13 en la cual la condición estructural fue denominada como “mala”.

Cabe detallar que el cuerpo B de la autopista sufrirá una modificación de ampliación para albergar un par de carriles adicionales con sus respectivos acotamientos. Como ya se mencionó el tramo tendrá una ampliación por lo que de igual manera las nuevas capas del pavimento serán diferentes a la actual por lo que también el diseñador debe considerar dichos cambios estructurales.

Los resultados obtenidos de las correlaciones recomendadas pueden llegar ser muy útiles para el diseño de pavimentos nuevos como en estudios de rehabilitación de pavimentos existentes debido a la fuerte relación entre el CBR y los resultados de las evaluaciones deflectométricas (módulos, deflexiones).

Finalmente los valores obtenidos fortalecen la medición directa de los módulos resilientes de la subrasante, por reflectometría en pavimentos ya existentes y mediante ensayos de laboratorio.

Bibliografía

AASHTO. (1993). *"Desing Pamphelt for the determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavemente Structures".* Estados Unidos de America: Federal Highway Administration.

Adriana Patricia Agudelo Castañeda, I. D. (2013, diciembre 10). *Metodología de evaluación in-situ de capas granulares en pavimentos flexibles, usando el LWD.* From Metodología de evaluación in-situ de capas granulares en pavimentos flexibles, usando el LWD: http://www.usandoellwd.com

ASTM. (2011). *ASTME D 2487 - 11- SISTEMA DE CLASIFICACIÓN UNIFICADA DE SUELOS (SCUS).* ESTADOS UNIDOS DE AMERICA: ASTM INTERNATIONAL.

ASTM. (2016). *ASTM D 1883 16 STANDARD TEST METHOD FOR CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) OF LABORATORY) COMPACTED SOIL).* ESTADOS UNIDOS DE AMERICA: ASTM.

ema. (2013). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN - GEOTECNIA - MATERIALES PARA TERRACERÍAS - MÉTODO DE MUESTREO (EXCEPTO 8.2 Y 9.3.1). *NMX-C-467-ONNCCE-2013*. México: ema (entidad mexicana de acreditación).

ema. (2013). *NMX-C-475-ONNCCE-2013 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCCIÓN - GEOTECNIA - MATERIALES PARA TERRACERÍAS - DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA MEDIANTE HORNO - MÉTODO DE ENSAYO.* MÉXICO: ema.

ema. (2013). *NMX-C-476-ONNCCE-2013 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCCIÓN - GEOTECNIA - MATERIALES PARA TERRACERÍAS - COMPACTACIÓN DINÁMICA, ESTÁNDAR O MODIFICADA- MÉTODO DE ENSAYO.* MÉXICO: ema.

ema. (2014). *NMX-C-493-ONNCCE-2014 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCCIÓN - GEOTECNIA - MATERIALES PARA TERRACERÍAS - LÍMITES DE CONSISTENCIA - MÉTODO DE ENSAYO.* MÉXICO: ema.

ema. (2014). *NMX-C-496-ONNCCE-2014 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCCIÓN - GEOTECNIA - MATERIALES PARA TERRACERÍAS - DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULAR.* MÉXICO: ema.

ema. (2016). *NMX-C-522-ONNCCE-2016 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCCIÓN - GEOTECNIA - MATERIALES PARA TERRACERÍAS - DETERMINACIÓN DEL VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA DE SUELOS Y EXPANCIÓN EN LABORATORIO - MÉTODO DE ENSAYO.* MÉXICO: ema.

ema. (2018). *NMX-C-468-ONNCCE-2018 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCCIÓN - GEOTECNIA - MATERIALES PARA TERRACERÍAS - METODO DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS (MUESTRAS ALTERADAS, CUARTEO MANUAL).* MÉXICO: ema.

ema. (n.d.). *NMX-C-468-ONNCCE-2018 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCCIÓN - GEOTECNIA - MATERIALES PARA TERRACERÍAS - METODO DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS (MUESTRAS ALTERADAS, CUARTEO MANUAL), 2018.*

FONATUR, S. D. (n.d.). *TRAZO DEL TREN MAYA*. From TRAZO DEL TREN MAYA: https://trenmaya.gob.mx

IMT, I. M. (2017). *N-CSV-CAR-1-03-010/17.* From N-CSV-CAR-1-03-010/17: N-CSV-CAR-1-03-010/17

IMT, I. M. (2017). *N-M-MMP-4-07-020/17.* From N-M-MMP-4-07-020/17: N-M-MMP-4-07-020/17

INTERNATIONAL, A. (2017). *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing Analysis, and Interpretation.* From Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing Analysis, and Interpretation: Publication No FHWA-HRT-16-011

Natalia Pérez García, P. G. (2016). Modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación. *Modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación*. Queretaro., Sanfandila, México: SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.

(n.d.). *NMX-C-468-ONNCCE-2018 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCCIÓN - GEOTECNIA - MATERIALES PARA TERRACERÍAS - DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA MEDIANTE HORNO- MÉTODO DE ENSAYO.*

Revista Ciencia, I. y. (2017). Factores para el Ajuste de los Módulos de Retrocálculo de Pavimentos Flexibles. *Factores para el Ajuste de los Módulos de Retrocálculo de Pavimentos Flexibles*.

Rivera-Mena, E. A.-V. (2019, enero-junio). *Revista Ciencia e Ingeneiería Neogranadina.* From Correlación del CBR con la resistencia a la compresión inconfinada: https://doi.org.org/10.18359/rcin.3478

Tarazona, F. O. (2011). *CBR VS DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD) PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE RESILIENCIA EN LA SUBRASANTE EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO.* Bolivia: Universidad Pontificia Bolivariana. From CBR VS DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD) PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE RESILIENCIA EN LA SUBRASANTE EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO: http://www. DETERMINAR EL MÓDULO DE RESILIENCIA.com

Torres, I. A. (2020, Julio 08). *Correlaciones entre el CBR de la Subrasante y Deflexiones Medidas con FWD.* From Correlaciones entre el CBR de la Subrasante y Deflexiones Medidas con FWD: www. correlacion entre cbr y fwd

Zárate Aquino M, L. A. (2021). ASPECTOS IMPORTANTES DERIVADOS DE LA UTILIZACIÓN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO HWD, APLICADOS PARA LA REHABILITACIÓN O RECONSTRUCCIÓN DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES. In A. P. ASPECTOS IMPORTANTES DERIVADOS DE LA UTILIZACIÓN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO HWD, *CONTROL DE CALIDAD EN VIAS TERRESTRES.* CIUDAD DE MÉXICO: REVISTA CONSULTORÍA.