

**ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES
PLASTICAS EN PAVIMENTOS**

LAURA RAQUEL MORENO VILLAMIZAR

PAULA KATHERINE PINTO MARÍN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2007**

**ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES
PLASTICAS EN PAVIMENTOS**

**LAURA RAQUEL MORENO VILLAMIZAR
PAULA KATHERINE PINTO MARÍN**

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director:

Ing. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2007**

A DIOS por guiar todas mis decisiones y permitir la materialización de mis proyectos.

A mi mamá ELSA VILLAMIZAR JAIMES le debo todo lo que soy como persona, todos mis aciertos y la oportunidad de contar siempre con su amor y su apoyo incondicional.

A mi papá REINALDO MORENO DUARTE, aunque no me acompaña de cuerpo presente, sé que su amor y su bendición siempre van a envolver todos los actos de mi vida.

A mi TIA CHEPA y MI TIO ORLANDO, segundos padres siempre al pendiente de mis necesidades; y atentos a disfrutar de mis éxitos.

A mi FAMILIA y aquellos AMIGOS, que me han acompañado en las diferentes etapas de mi vida.

A PAULA, compañera incondicional de proyecto.

A JORGE, una paciencia admirable y un sentimiento verdadero, es el complemento perfecto.

Laura Raquel

*A Dios, por permitirme concluir con satisfacción
esta etapa de mi vida*

*A la memoria de mi papá, quien me enseñó que la
herencia más importante de una persona es la
educación*

*A mi mamá, por su infinito amor, sacrificio y
apoyo en todo momento*

*A mi hermano, por su compañía y creer en mí
siempre*

*A Mantí, por su cariño y amistad incondicional
y a todos aquellos que compartieron conmigo esta
época tan especial.*

PAULA

AGRADECIMIENTOS

Damos nuestros más sinceros agradecimientos a la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, Alma Mater que nos permitió durante nuestra permanencia acceder además, de a un sin número de conocimientos, a la posibilidad de ubicarnos en un panorama real, y ser, de está manera, parte activa y positiva de la sociedad.

A nuestro mentor EDUARDO A. CASTAÑEDA P, Ingeniero Civil y Director de proyecto, por el apoyo brindado durante la elaboración de este proyecto de grado, pues sin su asesoría no habría sido posible la exitosa culminación del mismo.

A nuestros familiares y amigos, quienes con su apoyo permanente y su oportuna colaboración nos dieron herramientas que permitieron hacer este proceso agradable y gratificante.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
CAPITULO I	
GENERALIDADES	4
1.1 ANTECEDENTES	4
1.2 DEFORMACIONES PERMANENTES.....	6
1.2.1 Deformación en materiales granulares.....	7
1.2.2 Deformación en mezclas asfálticas	10
1.3 COMPORTAMIENTO DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN LOS PAVIMENTOS.....	11
1.3.1 Estado de esfuerzos.....	13
1.3.2 Deformaciones permanentes en las capas del pavimento	15
1.4 CLASIFICACIÓN DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES.....	18
1.4.1 Según el comportamiento estructural	18
1.4.2 Según la localización de la falla.....	19
1.4.3 Según la profundidad de la huella	20
CAPITULO II	
FACTORES QUE AFECTAN LAS DEFORMACIONES PERMANENTES	21
2.1 AGREGADOS	21
2.1.1 Gradación.....	21
2.1.2 Textura de la superficie	21
2.1.3 Forma	22
2.1.4 Tamaño	23
2.2 MEZCLA.....	24
2.2.1 Ligante asfáltico (Binder).....	24
2.2.1.1 Tipo de ligante asfáltico.....	24
2.2.1.2 Contenido de ligante asfáltico.....	24
2.2.2 Polvo Mineral (Filler).....	25

2.2.3	Cantidad de vacíos (aire)	25
2.2.4	VMA: Vacíos en el agregado mineral	26
2.2.5	Compactación.....	27
2.3	MODIFICADORES ASFÁLTICOS	28
2.3.1	Empleo de polímeros.....	29
2.3.2	Empleo de fibras.....	30
2.4	CONDICIONES EN CAMPO	31
2.4.1	Temperatura	31
2.4.2	Estado de esfuerzos	32
2.4.3	Tráfico	32
2.4.3.1	Repeticiones de carga.....	33
2.4.3.2	Ejes Equivalentes y presión de contacto	34
2.4.3.3	Velocidad.....	35
2.4.4	Agua	36

CAPITULO III ENSAYOS EN LABORATORIO..... 38

3.1	ENSAYOS UNIAXIALES.....	38
3.1.1	Ensayo uniaxial estático (creep)	38
3.1.2	Ensayo uniaxial con carga repetida	40
3.2	ENSAYOS TRIAXIALES	43
3.2.1	Ensayo triaxial estático (creep).....	43
3.2.2	Ensayo triaxial con carga repetida	45
3.3	ENSAYOS DE CORTE	47
3.3.1	Ensayo de cortante simple.....	47
3.3.2	Ensayo SST de frecuencia de barrido-módulo dinámico cortante	49
3.3.3	Ensayo SST de carga repetida con altura constante	51
3.3.4	Ensayo triaxial de esfuerzo cortante	51
3.4	ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	53
3.5	ENSAYOS EMPÍRICOS.....	54
3.5.1	Ensayo Marshall	54
3.5.2	Ensayo Hveem.....	56
3.5.3	Máquina de ensayo giratoria (GTM)	57
3.5.4	NAT: Nottingham Asphalt Tester	59
3.6	ENSAYOS DE SIMULACIÓN	61
3.6.1	Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA).....	62
3.6.2	Ensayo de roderas Francés	63
3.6.3	Dispositivo de ensayo de pista del Laboratorio de la Universidad Purdue.....	66
3.6.4	Modelo móvil de simulación de carga	67
3.6.5	Wessex Dry Wheel Tracker	69

CAPITULO IV	
MODELOS, METODOLOGÍAS Y PROGRAMAS PARA LA PREDICCIÓN DEL RUTTING EN PAVIMENTOS	71
4.1	MÉTODOS DE DISEÑO.....71
4.2	MODELOS MATEMÁTICOS73
4.2.1	Procedimiento capa-deflexión (layer-strain)73
4.2.2	Metodología visco elástica81
4.2.2.1	Modelo viscoelástico no lineal82
4.2.2.2	Modelo elastoplástico82
4.3	GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO 200283
4.4	METODOLOGÍA SHELL88
4.5	SHRP: STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM.....90
4.6	HDM4: HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT SYSTEM.....94
4.7	MODELO Y SOFTWARE VESYS100
CONCLUSIONES	102
RECOMENDACIONES.....	105
BIBLIOGRAFIA.....	108

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 Deformaciones plásticas en la vía
- FIGURA 2 Deformación permanente en pavimentos
- FIGURA 3 Acumulación de la deformación con el número de ciclos en
- FIGURA 4 Acumulación de deformación plástica bajo carga repetida
- FIGURA 5 Acumulación de deformación permanente de un material granular
- FIGURA 6 Deformación permanente (Rodera)
- FIGURA 7 Rodera en un pavimento en servicio
- FIGURA 8 Efecto del número de rodadas en el perfil transversal
- FIGURA 9 Estado de esfuerzos en una sección longitudinal de un pavimento
- FIGURA 10 Estado de esfuerzos en un pavimento debido al movimiento
- FIGURA 11 Resultados de la deformación plástica en el suelo de cimentación,
- FIGURA 12 Deformaciones permanentes medidas en un período de cuatro años
- FIGURA 13 Roderas por fallas en la subrasante
- FIGURA 14 Roderas por fallas en las capas asfálticas
- FIGURA 15 Efecto de la angularidad del agregado y el contenido de vacíos en la rigidez a compresión de una mezcla
- FIGURA 16 Efecto de la angularidad del agregado y rigidez del bitumen
- FIGURA 17 Tendencia a la deformación permanente según el contenido de asfalto
- FIGURA 18 Curvas de gradación
- FIGURA 19 Efecto de los vacíos en el mineral sobre la resistencia a la deformación
- FIGURA 20 Comparación de la respuesta de tres mezclas
- FIGURA 21 Respuesta de tres mezclas sometidas
- FIGURA 22 Cambio en el comportamiento de la mezcla asfáltica en función
- FIGURA 23 Deformación axial permanente versus el número de repeticiones de carga

- FIGURA 24 Efecto de la presión de contacto promedio sobre el rango de
- FIGURA 25 Comparación en la variación de las deformaciones permanentes en muestras
- FIGURA 26 Influencia del agua, drenaje y tipo de material granular en la
- FIGURA 27 Dispositivo para ensayos de carga estática y repetida
- FIGURA 28 Esquema de un ensayo de carga repetida
- FIGURA 29 Esquema del ensayo de módulo dinámico
- FIGURA 30 Sistema para el ensayo triaxial estático
- FIGURA 31 Curva para el ensayo estático (creep)
- FIGURA 32 Esquema del principio del ensayo triaxial de carga repetida
- FIGURA 33 Ensayo triaxial con carga repetida
- FIGURA 34 Sistema utilizado en el ensayo de cortante simple
- FIGURA 35 Muestra preparada (izq.) y muestras después del ensayo (der.)
- FIGURA 36 Dispositivo SST (izq.) y cámara de carga (der.)
- FIGURA 37 Ensayo triaxial de esfuerzo cortante
- FIGURA 38 Realización del ensayo de tracción indirecta en la prensa M.T.S.
- FIGURA 39 Dispositivo para ensayo Marshall
- FIGURA 40 Esquema que muestra las principales características del Estabilómetro Hveem
- FIGURA 41 Máquina de ensayo giratoria (GTM)
- FIGURA 42 Equipo NAT
- FIGURA 43 Analizador de Pavimentos Asfálticos (A.P.A.)
- FIGURA 44 Evaluación de la deformación permanente en el A.P.A.
- FIGURA 45 Máquina de ensayo LCPC
- FIGURA 46 Acercamiento de la llanta y la placa en el ensayo de rodera francés
- FIGURA 47 Máquina de ensayo, Laboratorio de la Universidad Purdue
- FIGURA 48 Modelo móvil de simulación de carga
- FIGURA 49 Datos de salida típicos de las lecturas del perfilómetro
- FIGURA 50 Dispositivo Wessex para ensayo de pista
- FIGURA 51 Diagrama del sistema de pavimento usado para estimar el rutting
- FIGURA 52 Concepto general de la metodología viscoelástica
- FIGURA 53 Esquema unidimensional de un elemento Maxwell

- FIGURA 54 Modelo propuesto por SHELL
- FIGURA 55 Criterios de minimización de la profundidad de la rodera
- FIGURA 56 Variación del esfuerzo medio normal (p) dentro de la sección
- FIGURA 57 Variación del esfuerzo cortante (q) dentro de la sección
- FIGURA 58 Variación de la deflexión cortante (e) dentro de una sección
- FIGURA 60 Interacción entre los modelos de deterioro del HDM4
- FIGURA 61 Equipo utilizado en el ensayo triaxial de carga repetida
- FIGURA 62 Equipo de simulación para el ensayo de Georgia
- FIGURA 63 Máquina de pista NLT para realizar el ensayo de simulación

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Propiedades de mezclas asfálticas significativas para cada capa
Tabla 2.1	Efecto de los cambios en el agregado sobre las deformaciones permanentes
Tabla 2.2	Efecto en la resistencia a la deformación permanente por el cambio en las propiedades del ligante asfáltico
Tabla 2.3	Factores en la mezcla que afectan la resistencia a las deformaciones permanentes
Tabla 2.4	Efecto de la variación en las condiciones de campo en la resistencia al rutting de los pavimentos
Tabla 4.1	Clasificación de los métodos de diseño para pavimentos flexibles
Tabla 4.2	Resumen de los modelos y ecuaciones utilizados para la determinación de deformaciones permanentes
Tabla 4.3	Valores de f_4 y f_5
Tabla 5	Correlación de parámetros

LISTA DE ECUACIONES

CAPITULO II

Ecuación N° 2.1 Resultado de ensayo de pista

CAPITULO III

Ecuación N° 3.1 Parámetros de la ley de flujo

Ecuación N° 3.2 Cálculo de la huella

Ecuación N° 3.3 Módulo complejo de corte dinámico

Ecuación N° 3.4 Módulo dinámico cortante

CAPITULO IV

Ecuación N° 4.1 Profundidad total de la huella (LAYER-STRAIN)

Ecuación N° 4.2 Deformación permanente del pavimento AASHTO 2002

Ecuación N° 4.3 Relación constitutiva para la predicción del rutting AASHTO 2002

Ecuación N° 4.4 Modelo final de la relación constitutiva para la predicción del rutting AASHTO 2002

Ecuación N° 4.5 Parámetro de profundidad K1 AASHTO 2002

Ecuación N° 4.6 Variante C1 para determinar el parámetro de profundidad

Ecuación N° 4.7 Variante C2 para determinar el parámetro de profundidad

Ecuación N° 4.8 Deformación permanente en capas de materiales no confinados AASHTO 2002

Ecuación N° 4.9 Modelos modificados de calibración AASHTO 2002

Ecuación N° 4.10 Modelo modificado para la calibración del cálculo de deformaciones permanentes

Ecuación N° 4.11 Modelo modificado para la calibración del cálculo de deformaciones permanentes

Ecuación N° 4.12 Modelo modificado para la calibración del cálculo de deformaciones permanentes

Ecuación N° 4.13	Contenido del Agua (%) AASHTO 2002
Ecuación N° 4.14	Modelo final de calibración para la base granular no confinada ASHTO 2002
Ecuación N° 4.15	Modelo de calibración final para todos los suelos de subrasante AASHTO 2002
Ecuación N° 4.16	Rutting total del pavimento AASHTO 2002
Ecuación N° 4.17	Determinación del rutting predicho para un nivel de confiabilidad deseado
Ecuación N° 4.18	Error estándar para capa asfáltica AASHTO 2002
Ecuación N° 4.19	Error estándar para base granular AASHTO 2002
Ecuación N° 4.20	Error estándar para subbase granular AASHTO 2002
Ecuación N° 4.21	Estimación del ahuellamiento SHELL
Ecuación N° 4.22	Relación entre la rigidez de la mezclas asfáltica y el ligante SHELL
Ecuación N° 4.23	Número de repeticiones permisibles SHELL
Ecuación N° 4.24	Esfuerzo medio normal SHRP
Ecuación N° 4.25	Esfuerzo octaédrico cortante SHRP
Ecuación N° 4.26	Esfuerzo cortante SHRP
Ecuación N° 4.27	Deflexión volumétrica SHRP
Ecuación N° 4.28	Deflexión cortante SHRP
Ecuación N° 4.29	Profundidad de roderas debidas a la densificación inicial
Ecuación N° 4.30	Deformación estructural sin agrietamiento
Ecuación N° 4.31	Deformación estructural después del agrietamiento
Ecuación N° 4.32	Incremento en la deformación plástica durante el año de análisis
Ecuación N° 4.33	Profundidad total de roderas para tiempo de servicio menor o igual a un año
Ecuación N° 4.34	Profundidad total de roderas para tiempo de servicio mayor a un año
Ecuación N° 4.35	Profundidad media de roderas en ambas huellas para cualquier año
Ecuación N° 4.36	Desviación estándar de la profundidad de roderas
Ecuación N° 4.37	Contribución de la profundidad de roderas al incremento del IRI

- Ecuación N° 4.38 Desarrollo de la desviación estándar de la profundidad de roderas
- Ecuación N° 4.39 Modelo de rutting por capa
- Ecuación N° 4.40 Profundidad de la huella VESYS

RESUMEN

TÍTULO: ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN PAVIMENTOS*

**AUTORAS: LAURA RAQUEL MORENO VILLAMIZAR
PAULA KATHERINE PINTO MARÍN****

PALABRAS CLAVES: Estado del arte, Deformaciones Plásticas, Pavimentos, Ensayos, Modelos.

DESCRIPCIÓN: La finalidad de un pavimento de proveer una superficie suave y de calidad para los vehículos en circulación, se ve afectada por la aparición de las fallas dentro del mismo. Uno de los tipos de deterioro más alarmante son las deformaciones plásticas que ocurren cuando la superficie es sometida a repeticiones de carga por la acción del tráfico, y se forman roderas en la trayectoria del mismo, relacionadas con la compactación y la aparición de los desplazamientos cortantes dentro de las capas que conforman el pavimento. Para establecer un punto de partida para el desarrollo de un programa de investigación en deformaciones plásticas de los pavimentos se recolectó la información existente sobre este tipo de falla, encontrando que el material en laboratorio puede ser sometido a esfuerzos axiales, esfuerzos cortantes o pruebas Wheel track; a través de diferentes tipos de ensayo, entre los que se destacan, Uniaxiales, Triaxiales, Cortantes y ensayos de Simulación. Con la ayuda de ellos se han podido determinar los parámetros más influyentes en el comportamiento del pavimento ante la aparición de las deformaciones plásticas. Además con la implementación de las pruebas en laboratorio se han podido desarrollar diferentes modelos de predicción del ahuellamiento en pavimentos, que han venido mejorándose con el desarrollo de los programas computacionales de Elementos Finitos.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Eduardo Alberto Castañeda P.

ABSTRACT

TITLE: STATE OF THE ART ON THE PLASTIC DEFORMATION'S STUDY IN PAVEMENTS*

**AUTHORS: LAURA RAQUEL MORENO VILLAMIZAR
PAULA KATHERINE PINTO MARÍN****

KEY WORDS: State of the art, Plastic Deformation, Pavements, Tests, Models.

DESCRIPTION: The purpose of a pavement to provide a smooth and quality surface for the vehicles circulation is affected by the appearance of faults within itself. One of the most alarming deterioration types are the plastic deformations that occur when the surface is put under weight repetitions by the action of traffic, forming ruts paths, related to the compaction and appearance of shear displacements within the layers that conform the pavement. To establish a starting point for the development of a research program in plastic deformations of pavements, current data about this type of fault was collected, finding that the material in laboratory can be put under axial and shear efforts or Wheel Track tests; through different types of tests such as Uniaxials, Triaxials, Shear and Simulation tests. With the help of them it has been able to determine the most influential parameters in the behavior of the pavement during the appearance of plastic deformations. Also, with the implementation of laboratory tests it has been able to develop different prediction models for the imprint on pavements, which have been improving with the development of computer programs of finite elements.

* Graduation Project

** Physical-Mecanical Engineering's Faculty, School of Civil Engineering, Director: Eduardo Alberto Castañeda P.

INTRODUCCIÓN

La vida útil de un pavimento, que está proyectada para brindar calidad a la circulación de los usuarios, se ha visto comprometida desde hace muchos años por uno de los tipos de deterioro más frecuentes en las vías terrestres, las deformaciones plásticas, afectando las características de manejo de los vehículos y creando graves riesgos para los usuarios de carreteras.

La deformación permanente o rutting tiene un gran impacto en el comportamiento de los pavimentos pues representan la acumulación de deformaciones plásticas producidas por aplicaciones de carga provenientes de la misma circulación los vehículos sobre la superficie de rodadura; convirtiéndose en uno criterios de falla que más preocupa dentro del estudio del comportamiento y el diseño de pavimentos.

Los ingenieros de pavimentos han tenido algunas trabas en sus esfuerzos para proveer materiales resistentes a las deformaciones permanentes, ya que los métodos existentes para ensayo y evaluación de mezclas asfálticas son empíricos y no proveen información totalmente confiable sobre el comportamiento en servicio del pavimento. Utilizando los criterios adecuados en los diseños de mezclas asfálticas y durante la construcción de los pavimentos, se pueden prevenir o minimizar en gran medida la probabilidad de aparición de las roderas, proporcionando a los conductores un alto nivel de seguridad y comodidad al circular por las vías.

Los incrementos de tráfico de carga pesada por las carreteras y en las ciudades, la falta de revisión de los límites permisibles de cargas por eje y el aumento de la presión de contacto de los neumáticos con el pavimento, provocan que en cortos periodos de tiempo y en épocas de elevada temperatura repeticiones de cargas axiales produzcan los desplazamientos laterales de mezcla asfáltica y la densificación de material generando las roderas. Cabe aclarar que, en está investigación, cuando se haga referencia a las mezclas asfálticas, se está hablando específicamente de mezclas asfálticas en caliente, que constituyen el tipo más generalizado de mezcla asfáltica.

Es difícil generalizar acerca de esta materia, desde que deformaciones permanentes se pueden desarrollar donde quiera que haya una debilidad en la estructura. Debe reconocerse que el problema del diseño de los pavimentos flexibles no está hoy teóricamente resuelto de manera satisfactoria. Sin ignorar

algunos meritorios esfuerzos del pasado y algunos esperanzadores trabajos que se encuentran en plena realización en el presente.

En las tecnologías de la Ingeniería Civil, la falta de desarrollos teóricos confiables ha de suplirse en dos ámbitos distintos: la experimentación en el laboratorio y la instrumentación de prototipos para obtener directamente normas de comportamiento. Ambos procedimientos de adquisición de información válida son ampliamente utilizados en la actualidad. Ambos han rendido frutos satisfactorios, pero están sujetos a la compleja problemática del comportamiento de los pavimentos, dependiente de un número de factores particulares de cada caso, todos muy influyentes, de carácter climático, de naturaleza de materiales, de topografía, de geología, de carácter del tránsito, etc., y están sujetos también al hecho básico de la carencia de un esquema teórico que permita considerar ordenadamente todos esos factores.

El propósito de este reporte es evaluar la información disponible concerniente a las características de deformación permanente en las mezclas asfálticas con dos consideraciones especiales; la primera enfocada en las técnicas de ensayo en laboratorio para medir la resistencia de dichas mezclas al rutting, y la segunda en las metodologías que permiten la predicción de la cantidad de deformación permanente en las capas asfálticas superficiales de la estructura del pavimento.

Teniendo en cuenta todos los aspectos que de una u otra manera intervienen en la aparición de las deformaciones permanentes, y las limitantes que se presentan durante y después del diseño, esta investigación pretende proporcionar a quienes están interesados, una guía base que muestre una opción de correlación entre el ensayo triaxial de carga repetida y los ensayos de simulación, o de pista, con el fin de facilitar y optimizar la predicción de las deformaciones permanentes, al identificar los factores mas influyentes en su aparición, y por su puesto el comportamiento de los mismos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Establecer las bases para la elaboración de un programa de estudio de las deformaciones permanentes en los pavimentos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✦ Investigar y conocer las metodologías existentes, más comunes, que involucran el estudio de las deformaciones plásticas en los pavimentos.
- ✦ Adquirir información del estado actual de las investigaciones sobre deformaciones permanentes en pavimentos.
- ✦ Facilitar el acceso a la información encontrada de los estudios que se han realizado alrededor del mundo.
- ✦ Contribuir al proceso investigativo en Colombia sobre el comportamiento de los pavimentos sometidos a cargas repetidas.
- ✦ Dar a conocer las pruebas de laboratorio más utilizadas para el estudio de deformaciones plásticas en mezclas asfálticas.
- ✦ Mostrar la influencia de los diferentes parámetros en la susceptibilidad del pavimento a presentar ahuellamiento.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Cuando se habla de deformación permanente, dos facetas deben ser consideradas, la primera es la asociada con el diseño de la mezcla asfáltica y la segunda, es la referente a la predicción del **rutting**, o roderas, en la estructura del pavimento. Hasta hace algunos años, estos aspectos, generalmente, eran considerados por separado, de este modo eran excluidos del proceso de diseño de la mezcla las consideraciones acerca del tráfico esperado y la exposición medioambiental.

Alrededor de 1920, se desarrolló el método de diseño de mezclas asfálticas conocido como *The Hubbard-Field*, éste fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral, usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Este método tuvo un adecuado funcionamiento para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no fue muy satisfactorio en el estudio de mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.

A partir de 1930 se implementaron dos nuevos métodos de diseño, uno es basado en el ensayo Marshall y el otro en el estabilómetro Hveem. El Método Marshall se desarrolló durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Este método utiliza como pruebas, fundamentalmente, una estabilidad y porcentaje de vacíos. Excepto por cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's. Mientras que el Método Hveem evalúa una estabilidad pseudotriaxial.

Posteriormente, los métodos de diseño de pavimentos como el procedimiento California Bearing Ratio (CBR) y la metodología del valor R, utilizaban medidas empíricas de la resistencia al cortante de los componentes del pavimento, para asegurar un espesor adecuado sobre un material con un valor específico de CBR o R, la deformación permanente en la estructura del pavimento probablemente era limitada a una cantidad tolerable para la duración del período de diseño. Este espesor mínimo también dependía de las magnitudes y números de repeticiones de la carga de tráfico.

En la Primera Conferencia Internacional en Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos (*First International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*) en 1962, la Shell Oil Company presentó el primer acercamiento al diseño de pavimentos, donde la fatiga y las deformaciones permanentes fueron consideradas como mecanismos de falla. Como una parte de este método de diseño, el **rutting** fue controlado por una limitación en la deformación elástica vertical por compresión en la parte superior de la subrasante.

Mientras que en la tercera conferencia, realizada en 1972, Barksdale y Romani, mostraron un acercamiento, conocido como la metodología **Layer-Strain**.

En la Cuarta Conferencia Internacional (1977), se describieron métodos adicionales de diseño donde se consideraban las deformaciones permanentes, los procedimientos comprendían metodologías que limitaban la superficie de deformación a determinado nivel y predecían el **rutting** en las capas de ligante asfáltico o en toda la estructura del pavimento. Estos procedimientos eran de los siguientes tipos:

- ⊕ Técnicas estadísticas basadas en la observación del comportamiento de las deformaciones permanentes.
- ⊕ Procedimientos que limitaban la deflexión en la subrasante.
- ⊕ Análisis elástico, junto con datos de ensayo de rotura.
- ⊕ Análisis linear visco elástico.

A finales de la década de los 70's, diversos investigadores enfocaron sus estudios en analizar el comportamiento de las deformaciones permanentes en los pavimentos: Finn (1977), usó técnicas de regresión por etapas para relacionar las deformaciones permanentes en los pavimentos convencionales y los pavimentos más gruesos, con los esfuerzos, la deflexión de la superficie y el número de repeticiones de carga. En esta metodología el diseño final es revisado para las deformaciones permanentes en las capas bituminosas usando los enfoques de ensayos de rotura desarrollados por Hills y Van de Loo (1974). Kenis (1977) relacionó las deformaciones plásticas con los esfuerzos, temperatura, tiempo de carga y contenido de humedad y usó la teoría viscoelástica para calcular la profundidad de la rodera.

Para la Quinta Conferencia Internacional (1982), las investigaciones estuvieron dirigidas a la caracterización de los materiales y el desarrollo de modelos de predicción de las deformaciones permanentes en los pavimentos.

En la Sexta Conferencia (1987), Eckmann combinó los ensayos dinámicos de rotura con el análisis **layer-strain** para predecir las deformaciones permanentes en pavimentos a escala completa, su modelo de predicción mostró buena concordancia con las medidas reales en campo. Mientras Eisemann y Hilmer estudiaron las influencias de las cargas de rueda y presión de neumático en la magnitud de la deformación plástica en los pavimentos. Los efectos en la variación de las condiciones de ensayo fueron analizados usando análisis regresivo.

En este mismo año, se desarrolló el método del Sistema de Análisis de Agregados de Mezclas Asfálticas, o AAMAS por sus siglas en inglés, incluyó un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.

El método AAMAS sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que hizo aparición en 1993, éste contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio. En el método se registró una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica y su correcto funcionamiento. SUPERPAVE realiza un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

Desde estos esfuerzos tempranos, se han realizado considerables trabajos adicionales, incluyendo verificaciones para la predicción de deformaciones permanentes por medio de comparaciones sobre observaciones en ensayos de vías en servicio. Estos acercamientos al diseño, utilizan propiedades fundamentales de los materiales en la sección del pavimento y consideran en diferentes formas los efectos en la cantidad de **rutting** debidos a la variación en las condiciones de carga y campo, por ejemplo la humedad y temperatura.

1.2 DEFORMACIONES PERMANENTES

Las deformaciones plásticas son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos (figura 1 y figura 2), exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento, y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas. La formación de roderas de profundidad importante se asocia con deformaciones plásticas acumuladas del 1 al 2%.



FIGURA 1 Deformaciones plásticas en la vía



FIGURA 2 Deformación permanente en pavimentos

El análisis de la deformación permanente en un sistema de pavimento es un elemento importante de muchos de los esquemas de diseño que requieren consideración detallada de la acumulación progresiva de las deformaciones plásticas en cada capa del pavimento.

1.2.1 Deformación en materiales granulares

Cuando el material granular es sometido a cargas, se generan esfuerzos, que hasta cierto punto afectarán a las partículas que lo conforman, reflejándose en desgaste superficial, fractura y falla, que alteran las características físicas y mecánicas del material. Inicialmente, estas alteraciones, sólo ocurrirán por la acomodación de las partículas, pero luego se presentará el fracturamiento de las mismas debido a la acumulación de esfuerzos en los contactos.

Para los materiales granulares, en los primeros ciclos de carga, la deformación permanente es considerable, como lo indica la deformación plástica (ϵ_p) en la

Figura 3. Al incrementar el número de repeticiones, la deformación plástica debida a cada aplicación de carga decrece, después de algunos miles de repeticiones de carga, la deformación es casi totalmente recuperable (ϵ_r), es decir, el material experimenta casi en su totalidad una deformación de tipo elástico o resiliente, condición en la cual el material es considerado en estado resiliente, permitiendo determinar un importante parámetro del material denominado “Módulo de Resiliencia”. En este punto se ha llegado a una condición de equilibrio, siempre que el esfuerzo desviador sea lo suficientemente pequeño para no llevar la muestra a la falla.

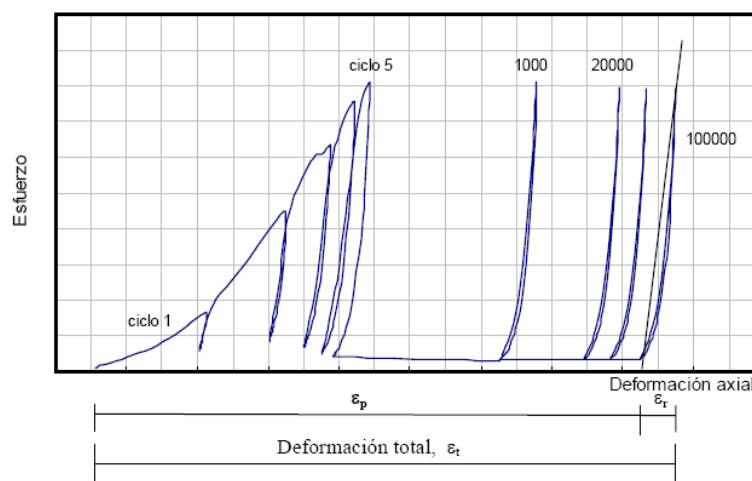


FIGURA 3 Acumulación de la deformación con el número de ciclos en materiales granulares

El máximo esfuerzo desviador asociado a esta condición es denominado “Esfuerzo Umbral” y es un concepto importante para el diseño. La Figura 4 ilustra este concepto (Brown, 1994).

En la figura 4, se aprecia cómo para un esfuerzo desviador muy alto, la velocidad de acumulación de la deformación plástica puede incrementarse conduciendo al espécimen de prueba a la falla. Se ha sugerido que el esfuerzo umbral para materiales granulares puede expresarse como la relación entre el esfuerzo pico y el de falla; diferentes autores proponen aplicar un esfuerzo desviador equivalente al 70% del de falla, como la relación máxima de esfuerzos para minimizar el desarrollo de deformación plástica.

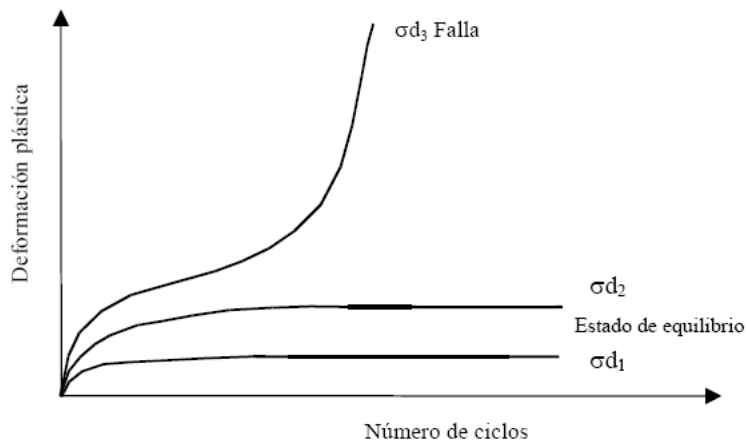


FIGURA 4 Acumulación de deformación plástica bajo carga repetida

La Figura 5 muestra el proceso de acumulación de la deformación permanente de un material granular sujeto a carga cíclica, al aumentar el número de ciclos, para un esfuerzo de magnitud constante.

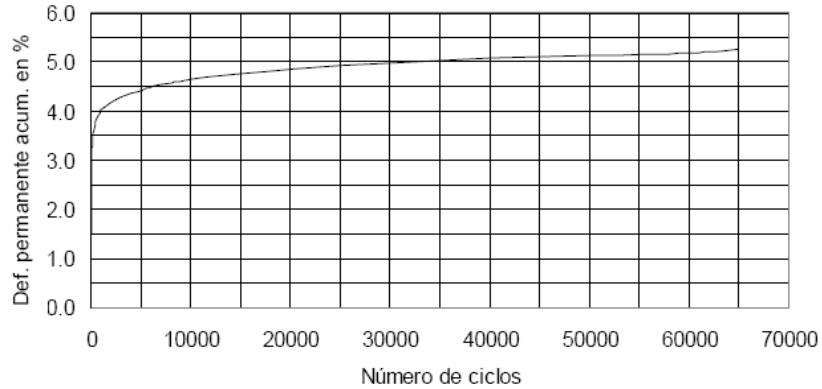


FIGURA 5 Acumulación de deformación permanente de un material granular sujeto a carga cíclica

En la figura anterior se aprecia que la acumulación de la deformación permanente presenta tres fases: la primera es casi instantánea, se presenta en las primeras decenas de ciclos de carga, y en ella se produce aproximadamente el 70% de la deformación total. Posteriormente se presenta una fase transitoria en la que la deformación se acumula gradualmente durante los primeros miles de ciclos de

aplicación de la carga, finalmente, se alcanza una fase estable en la que la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeña y la deformación permanente tiende a su máximo valor. A partir de este momento, la aplicación de un número mayor de ciclos de carga ya no tiene prácticamente ningún efecto adicional.

1.2.2 Deformación en mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas están compuestas por partículas de agregados de naturaleza elástica, aproximadamente un 90% de agregado pétreo grueso y fino, que son los que deben soportar las cargas del tráfico, un 5% de ligante asfáltico (naturaleza viscoelástica), que actúa como pegamento, manteniendo unido el esqueleto mineral, y un 5% de polvo mineral (**filler**).

La función de estas mezclas es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, además debe transmitir, suficientemente, las cargas debidas al tráfico a la subrasante para que sean soportadas por ésta.

Cuando se le aplica una carga a una mezcla asfáltica, las partículas de los agregados se cierran, unidas de tal manera que fungen como una sola, larga y elástica piedra, y como el asfalto actuará como una banda de goma, volverá a su forma original cuando desaparezca la carga, de esta forma no se acumularán deformaciones permanentes.

1.2.2.1 Polvo mineral (**filler**)

El **filler** forma parte del esqueleto mineral y por lo tanto soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre las partículas, además cumple con las siguientes funciones:

- ✦ Rellena los vacíos del esqueleto de agregados gruesos y finos, por lo tanto impermeabiliza y densifica el esqueleto. Sustituye parte del asfalto o betún que de otra manera sería necesario para conseguir unos huecos en mezcla suficientemente bajos.
- ✦ Proporciona puntos de contacto entre agregados de mayor tamaño y los encaja limitando sus movimientos, aumentando así la estabilidad del conjunto.
- ✦ Facilita la compactación, actuando a modo de rodamiento entre los áridos más gruesos.
- ✦ Hace la mezcla más trabajable al envolver los áridos gruesos y evitar su segregación.

1.2.2.2 Ligante asfáltico

El ligante asfáltico no puede resistir las cargas del tráfico, pues debido a su naturaleza viscoelástica puede fluir en función de la carga y su tiempo de aplicación; sin embargo, el ligante debe tener la suficiente cohesión para prevenir el desprendimiento de partículas y para resistir los esfuerzos de corte que se generan en los puntos de contacto entre agregados y que superan la fricción entre los mismos. Si el ligante no es capaz de sujetar las partículas en su sitio, estas pueden moverse compactando el esqueleto a una configuración más densa.

1.3 COMPORTAMIENTO DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN LOS PAVIMENTOS

La deformación permanente en los materiales de los pavimentos, se desarrolla gradualmente con el incremento del número de aplicaciones de carga, usualmente aparecen como depresiones longitudinales en la trayectoria de la rueda, acompañadas por una pequeña elevación a los lados de la huella, como se aprecia en las figuras 6 y 7. Esto es causado por una combinación de la densificación (disminución en el volumen y, por consiguiente, incremento en la densidad) y deformación cortante, y puede ocurrir en una o más capas del pavimento como también en la subrasante. La densificación de material es un fenómeno secundario dentro de la formación de roderas, potencialmente contribuye en menos de 5 mm., en la profundidad de la rodera. Mientras que la deformación cortante es uno de los mecanismos primarios de la aparición del **rutting**. De allí, la importancia de colocar materiales de alta densidad con el propósito de minimizar las deformaciones por cortante.

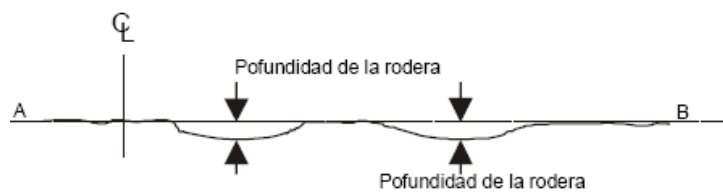


FIGURA 6 Deformación permanente (Rodera)



FIGURA 7 Rodera en un pavimento en servicio

La figura 8, extraída del trabajo realizado por Eisenmann y Hilmer (1987), muestra el efecto en el perfil de la superficie del pavimento para un número de pasadas de la rueda en un ensayo de pista. Estos datos permiten la medición del promedio de profundidad de rodera como también el cálculo de los volúmenes de material desplazado bajo la llanta y en las zonas de elevación adyacentes.

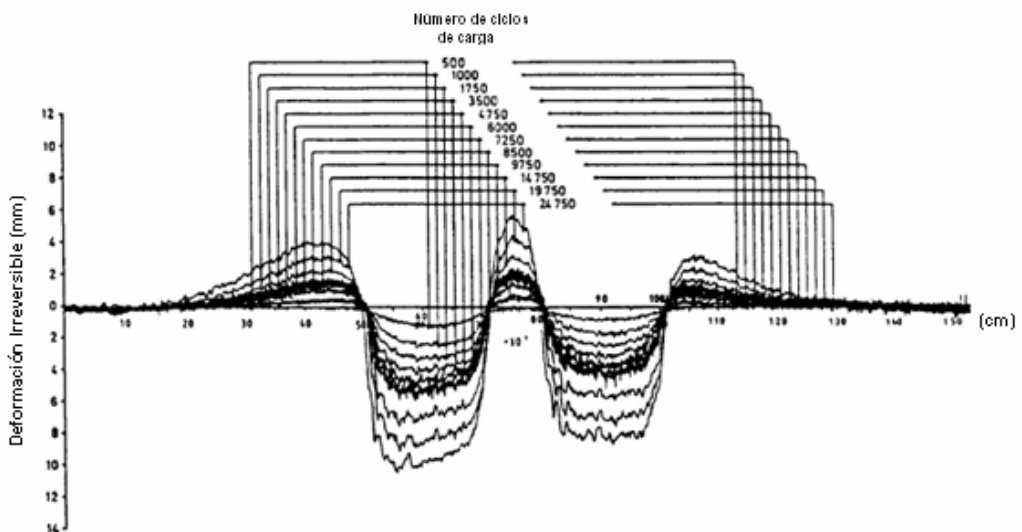


FIGURA 8 Efecto del número de rodadas en el perfil transversal de la superficie del pavimento

De la figura 8 se puede decir que:

1) En el estado inicial de tráfico, el incremento de la deformación permanente bajo la rueda es más grande que el incremento en las zonas de elevación. Por consiguiente, en esta fase inicial, la compactación por el tráfico tiene una importante influencia en el **rutting**.

2) Luego del estado inicial, el decremento en el volumen debajo de la rueda es aproximadamente igual al incremento de volumen en las zonas de elevación adyacentes. Esta es una indicación de que la compactación bajo tráfico ha sido completada para la mayor parte, y que el nuevo **rutting** será causado esencialmente por el desplazamiento con un volumen que se mantiene constante. Esta fase se considera como representativa del comportamiento de la deformación para gran parte del tiempo de vida del pavimento.

La deformación permanente a través de la capa asfáltica es mayor cerca de la superficie de carga y disminuye gradualmente en los niveles más bajos, debido a que el **rutting** es causado por un flujo plástico. Tal distribución de las roderas con profundidad es razonable: se encuentra mayor resistencia al flujo plástico a grandes profundidades y los esfuerzos cortantes allí son más pequeños. Debido a esto, usualmente se creía que una medida para mejorar la resistencia a las deformaciones permanentes era aumentar el grosor de la capa asfáltica, pero se reportó que la deformación dentro de una capa asfáltica (reducción de espesor bajo la acción de los neumáticos) no sigue aumentando con el incremento del grosor de la capa después de determinado umbral. Medidas realizadas por la AASHO Road Test indicaron que la profundidad de rodera alcanza un valor límite para grosores de aproximadamente 10 pulgadas.

El promedio de vida de los pavimentos asfálticos ante las deformaciones plásticas, que se ha obtenido a través de la experiencia en agencias de investigación de carreteras de los E.U.A., es de 11 años, donde se reporta que menos del 1% de los pavimentos falla durante el 1er. año de servicio, el 14% de los pavimentos, fallan antes de los 5 años y el 42% de los pavimentos falla entre los 6 y 10 años.

1.3.1 Estado de esfuerzos

Los neumáticos de los vehículos se apoyan sobre el pavimento produciendo una huella de forma distinta para cada tipo de neumático, presión de inflado, carga por rueda, velocidad y estado de la superficie. Cuando está en movimiento, además de variar la forma de la huella, aparecen solicitaciones distintas a las verticales, que son las que existen cuando el vehículo está detenido o con movimiento uniforme; aparecen esfuerzos horizontales debido al rozamiento y a los cambios de trayectoria, succiones de agua contenida en la sección estructural y esfuerzos verticales de impacto por efectos del movimiento del vehículo y las irregularidades de la carretera.

Los esfuerzos horizontales de aceleración y frenado, o en curvas de pequeño radio, que se pueden producir en zonas localizadas, influyen también en el estado de esfuerzos y deformaciones del pavimento. Cuando en la superficie de un pavimento se originan esfuerzos tangenciales, éstos deben ser resistidos por los 8 o 10 cm. superiores, pero en general no afectan a las capas inferiores, por ello, la forma práctica con la que se resuelven estos problemas, es proyectando capas de rodadura cuya resistencia al esfuerzo cortante sea suficientemente alta para garantizar que no se produzcan rupturas o deformaciones.

En la siguiente figura se muestra una sección longitudinal de las capas de un pavimento, sobre la cual una carga se mueve a velocidad constante.

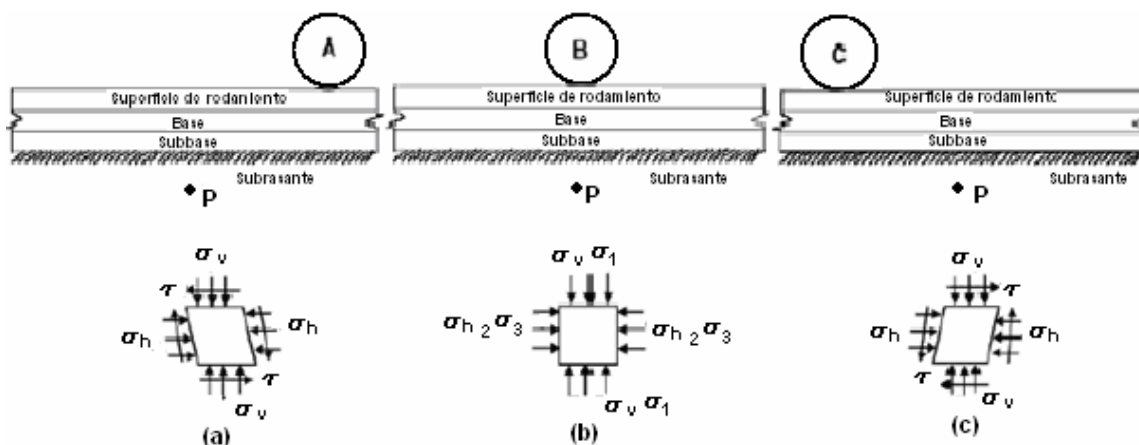


FIGURA 9 Estado de esfuerzos en una sección longitudinal de un pavimento

Debido a una carga en el punto A, el estado de esfuerzos experimentado en el punto P, es la actuación tanto de los esfuerzos cortantes como los esfuerzos normales (ver (a)); cuando la carga se mueve al punto B, los esfuerzos cortantes son nulos y únicamente actúan los esfuerzos normales (ver (b)), en este punto se tiene un estado triaxial de esfuerzos, debido a que sólo se presentan esfuerzos normales. Por último, la dirección de los esfuerzos cortantes originados en el punto C, es contraria a la dirección de los esfuerzos originados en el punto A (ver (c)).

Se ha supuesto en algunos casos que los esfuerzos aplicados por una llanta en movimiento se aproximan a una forma sinusoidal, cuya duración depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad del punto al que se está haciendo referencia. En la figura 10, se puede distinguir que cuando la rueda cargada avanza, se producen pulsaciones de los esfuerzos verticales y horizontales, que

son acompañados de una doble pulsación del esfuerzo cortante con una señal contraria en el plano horizontal y vertical. Además se muestra la relación entre esfuerzo y tiempo.

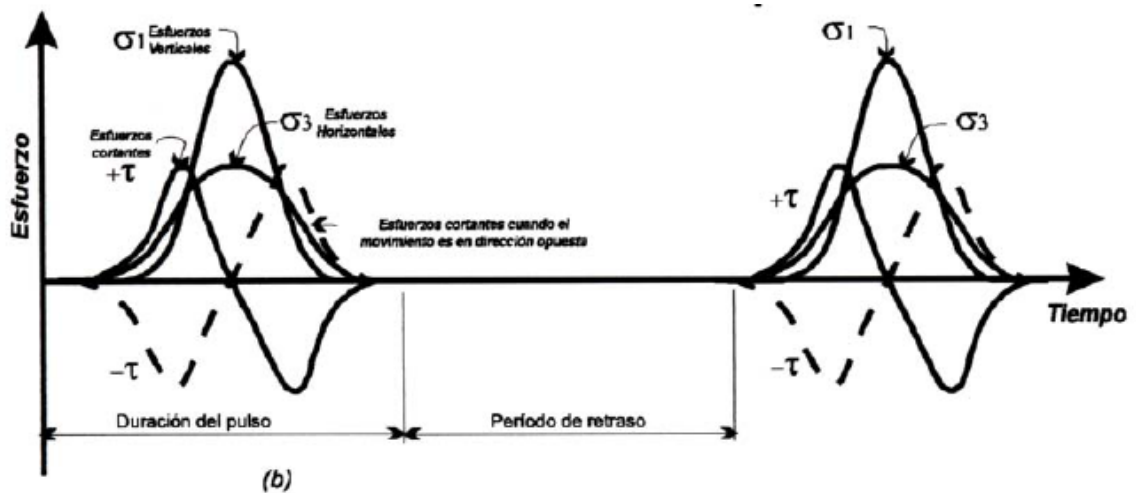
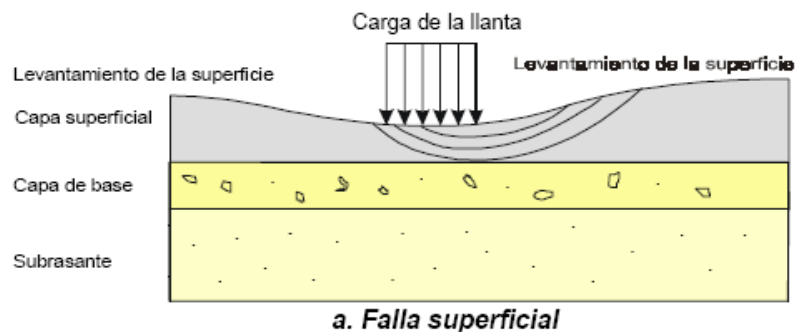


FIGURA 10 Estado de esfuerzos en un pavimento debido al movimiento de una rueda cargada

1.3.2 Deformaciones permanentes en las capas del pavimento

Todas las capas que conforman la sección estructural del pavimento, incluyendo la cimentación, son susceptibles a deformarse; sin embargo, el perímetro a lo largo del cual ocurre el hundimiento tiene menor longitud si la causa tiene lugar en la capa superficial y se hace más grande cuando la causa se encuentra a una profundidad mayor. La Figura 11 ilustra las formas usuales en las que se producen las deformaciones en un pavimento.



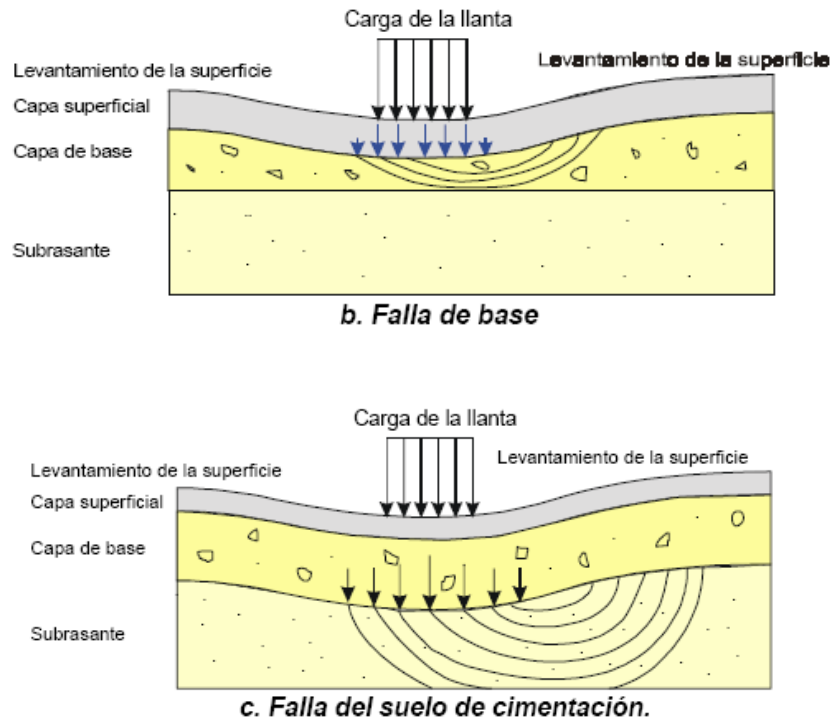


FIGURA 11 Resultados de la deformación plástica en el suelo de cimentación, base y capa superficial

A continuación, en la figura 12, se muestran las mediciones de la deformación permanente desarrollada a lo largo de 4 años, en las diferentes capas de un pavimento asfáltico (Brown, 1996). Puede apreciarse en la figura, la deformación total medida en la superficie y la contribución de cada una de las capas a la deformación total de la estructura.

Brown, señala que en pavimentos con capas asfálticas gruesas, generalmente las roderas se generan por las deformaciones que ocurren en estas capas; pero en pavimentos con carpetas delgadas, las capas granulares y la subrasante son las que provocan la mayor parte de la deformación permanente, principalmente si las condiciones de drenaje son inadecuadas.

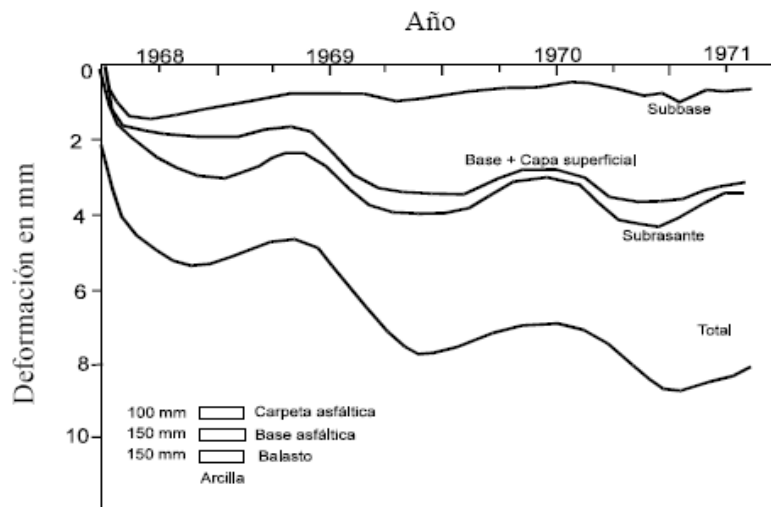


FIGURA 12 Deformaciones permanentes medidas en un período de cuatro años en tramo experimental

Entre algunas de las propiedades significativas para cada capa del pavimento están las mostradas en la tabla 1.1:

Tabla 1.1 Propiedades de mezclas asfálticas significativas para cada capa

Propiedades Técnicas	Significativas para			
	Rodadura	Intermedia	Base	Subbase
A. Resistencia al deslizamiento				
A.1 Macrotextura	X	/	/	/
A.2 Microtextura	X	/	/	/
B. Propiedades mecánicas (relacionadas con el tráfico)				
B.1 Resistencia a fatiga/iniciación de grietas	X	X	X	/
B.2 Resistencia a la propagación de grietas	X	X	X	/
B.3 Resistencia a la deformación plástica permanente	X	X	X	/
B.4 Módulo de rigidez	X	X	X	X
B.5 Resistencia a la pérdida de partículas/general	1)	/	/	/
B.6 Resistencia a la pérdida de partículas/neumáticos con clavos	2)	/	/	/
C. Propiedades de durabilidad (relacionadas con el clima)				
C.1 Resistencia al lavado por el agua	X	X	X	X
C.2 Resistencia al envejecimiento	X	/	/	/
C.3 Resistencia a la figuración térmica	X	/	/	/
D. Propiedades relativas a la trabajabilidad				
D.1 Compactabilidad	X	X	X	X

Propiedades Técnicas	Significativas para			
	Rodadura	Intermedia	Base	Subbase
D.2 Sensibilidad a la segregación/agregado grueso/fino	X	X	X	X
D.3 Sensibilidad a la segregación/escurrimiento de ligante	X	/	/	/
E. Otras propiedades				
E.1 Conductividad hidráulica	1)	/	/	/
E.2 Absorción de ruido	1)	/	/	/

1) Solo en mezclas drenantes

2) Sólo en zonas en las que se permitan neumáticos con clavos

1.4 CLASIFICACIÓN DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES

1.4.1 Según el comportamiento estructural

La deformación del pavimento puede originarse por deformación elástica, por consolidación del terreno de cimentación y la infraestructura, por una combinación de deformación elástica y plástica, o una deformación mecánica. A continuación se definen cada una de ellas:

1.4.1.1 Deformación elástica: ocurre cuando una carga deforma temporalmente los materiales de la cimentación y comprime el aire que llena los vacíos en la base, subbase y subrasante. Si la deformación es verdaderamente elástica, la superficie regresa a su posición original después de que la carga pasa; de modo que no se produce una falta de uniformidad permanente, aún bajo aplicaciones de carga.

1.4.1.2 Deformación por consolidación: depresiones cerca del centro de la carga aplicada sin el acompañamiento de las elevaciones laterales, que ocurren cuando la carga produce una presión suficientemente elevada en los poros del suelo para expulsar parte del aire y del agua y así se consolida el material. Aunque la consolidación que resulta de una aplicación de una carga móvil es pequeña, la deformación es permanente, progresa con las repeticiones adicionales de carga hasta que las capas afectadas se consolidan.

1.4.1.3 Deformación plástica : ocurre cuando la presión del agua y del aire dentro de los poros del material de cimentación u otros, se combinan con fuerzas producidas por la carga para desplazar el material del camino. La deformación resultante es progresiva bajo la repetición de las cargas y constituye una de las causas principales del deterioro y deformación permanente de las superficies del camino, manifestándose mediante una depresión cerca del centro de la carga aplicada, con elevaciones a cada lado de la depresión.

1.4.1.4 Deformación mecánica: es el resultado de un asentamiento de las capas inferiores que puede acompañarse de grietas en las capas de pavimento. Esta ocurre cuando la estructura del pavimento no está bien proyectada o construida.

1.4.2 Según la localización de la falla

1.4.2.1 Roderas por fallas en la subrasante:

Son causadas por un excesivo esfuerzo repetido en las capas interiores (base o subbase) bajo la capa de asfalto. Aunque los materiales duros pueden reducir este tipo de roderas, es considerado un problema estructural, más que de los materiales entre sí. Esencialmente, no hay suficiente fuerza, o dureza, en el pavimento para reducir la fuerza aplicada en un nivel tolerable, también puede ser causado por un inesperado debilitamiento de una de las capas generadas por la intrusión de humedad. La deformación ocurre en las capas inferiores.

Las cargas de tráfico provocan hundimientos y debilitamiento, por debajo, en la estructura del pavimento. Si la capa de pavimento es suficientemente flexible, se deformará por tener espesores delgados.



FIGURA 13 Roderas por fallas en la subrasante

Los hundimientos por roderas tienden a ser de anchos que van desde los 750 mm. hasta los 1000 mm., con poca profundidad y formas curvadas cruzando la sección del pavimento sin fisurarse. Si se hiciera una zanja o corte, la deformación de pavimento indicaría, que el espesor del pavimento permanece constante y cualquiera de las capas granulares (base o subbase) tiene deformaciones. Algunas roderas tienden a presentar pendientes pronunciadas con bordes quebrados en ambos lados de la trayectoria de la rueda.

1.4.2.2 Roderas por fallas en la capa del pavimento

Es el tipo de roderas que más preocupa a los diseñadores de mezclas asfálticas, se produce debido a la escasez de la capacidad portante o a la insuficiencia de soportar cargas pesadas.

Una mezcla asfáltica débil, va acumulando una pequeña pero permanente deformación plástica, en cada pulso de carga pesada, y eventualmente forma una ruta caracterizada con una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla, las roderas pueden ocurrir en la capa superficial del pavimento o debido al debilitamiento en las capas inferiores del mismo.

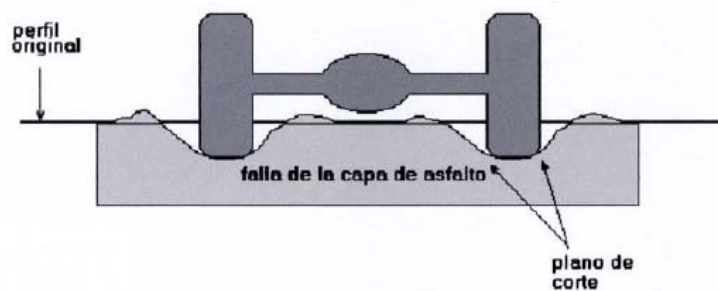


FIGURA 14 Roderas por fallas en las capas asfálticas

1.4.3 Según la profundidad de la huella

La Federal Highway Administration (FHWA) clasificó a las deformaciones permanentes en cuatro niveles de gravedad:

- ⊕ Hidroplaneo: 0.2 a 0.25 pulgadas
- ⊕ Bajo: 0.25 a 0.5 pulgadas
- ⊕ Medio: 0.5 a 1.0 pulgadas
- ⊕ Alto: mayor a 1.0 pulgada

Sin embargo, para pavimentos en caminos con pendientes del orden del 2%, una profundidad de huella acumulada cercana a las 0.5 pulgadas es suficiente para causar hidroplaneo en automóviles que viajen a velocidades de 50 millas por hora o más.

CAPITULO II

FACTORES QUE AFECTAN LAS DEFORMACIONES PERMANENTES

Existen una serie de factores que afectan o intervienen en la formación de las roderas o deformaciones permanentes de los pavimentos. Cabe mencionar que se deben tener muy en cuenta estos factores al momento de realizar el diseño y la construcción de un pavimento.

2.1 AGREGADOS

2.1.1 Gradación

Muchas investigaciones indican que las gradaciones densas de agregados son las más deseables para mitigar los efectos de las deformaciones permanentes. Cuando se compacta apropiadamente, las mezclas con gradación densa o continua de agregados tienen menos vacíos y más puntos de contacto entre las partículas que las mezclas de granulometría abierta. Brown y Pell (1974), llegaron a la conclusión que las mezclas poco gradadas exhiben más deformación que una mezcla bien gradada. Ellos argumentaron que esto se debe a una menor interacción en las mezclas de gradación pobre. También adicionaron que, a causa de la interacción entre los agregados se vuelve más importante que las mezclas de gradación pobre pueden ser más susceptibles a las deformaciones permanentes a altas temperaturas, un descubrimiento aparentemente confirmado por los resultados de ensayos de pista.

Por su parte, Elliot (1991) revisó en su estudio el efecto de la variación de la granulometría en la generación de roderas de un pavimento asfáltico. Los resultados mostraron que las granulometrías finas y granulares experimentaron profundidades de roderas de 7% a 10% mayores a las obtenidas para la mezcla de trabajo, mientras que las variaciones de granulometrías fina-granular y granular-fina, experimentaron profundidades de roderas de 13% a 19% mayores.

2.1.2 Textura de la superficie

Para una buena resistencia al **rutting**, la textura de la superficie de los agregados juega un papel muy importante. Particularmente en las capas asfálticas más densas y climas calientes, se requiere que los agregados tengan una textura rugosa en su superficie.

2.1.3 Forma

La forma de las partículas también es importante, Uge y Van de Loo encontraron que las mezclas hechas de agregados angulares (obtenidos por triturado) se deformaban en menor grado y eran más estables que las mezclas que tenían la misma composición y gradación, pero hechas de agregados redondeados (grava de río).

La figura 15 muestra que para un contenido de vacíos dado, los agregados triturados producen mezclas más duras. En este estudio, los efectos del triturado en la textura de la superficie no fueron definidos, por consiguiente es difícil separar los efectos de la textura de la superficie de los de forma.

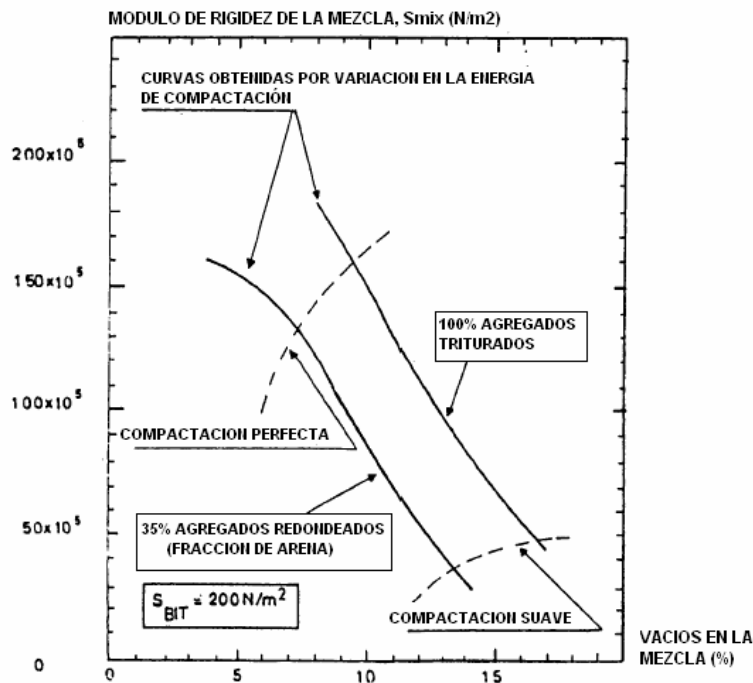


FIGURA 15 Efecto de la angularidad del agregado y el contenido de vacíos en la rigidez a compresión de una mezcla

En la figura 16 se puede observar algo mucho más interesante, una composición intermedia de agregado, en la cual sólo una fracción de arena fue triturada, se comportó mejor que la situación en la que sólo el agregado grueso fue triturado, aunque la primera mezcla tuviera una proporción más grande de componentes redondeados (70% contra 25%). Esto indicó que el contacto entre las partículas puede ser un factor más significante que el aumento del triturado.

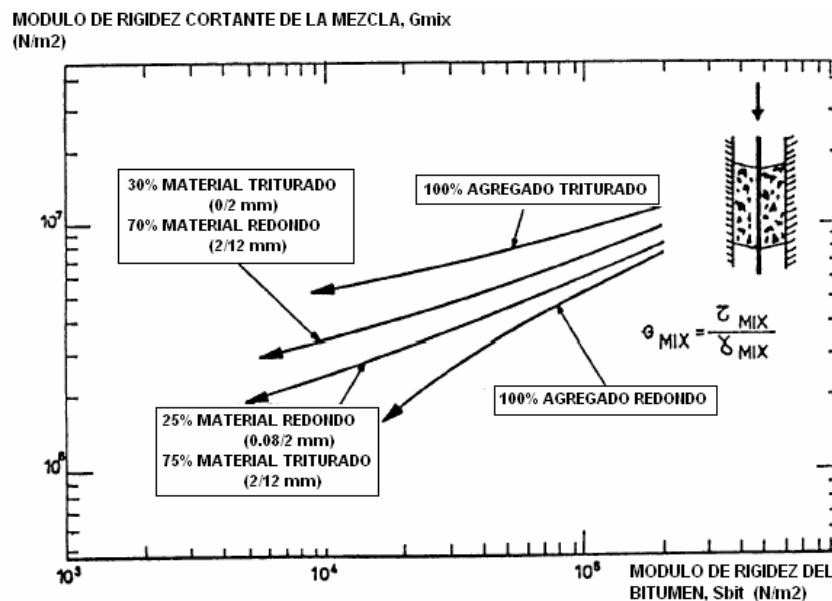


FIGURA 16 Efecto de la angularidad del agregado y rigidez del bitumen en la rigidez a cortante de la mezcla

2.1.4 Tamaño

Con el aumento en las presiones de rueda, ejes de carga y repeticiones de carga, resurgió el interés por el uso de mezclas con agregados grandes. Davis (1988) reportó que algunos pavimentos construidos con asfaltos suaves, altos volúmenes de concentración de agregados, bajo contenido de vacíos y un tamaño máximo del agregado grande (1 ½ pulgadas o más), mostraron una buena resistencia a las deformaciones permanentes. Basado en dicha observación, pudo concluir que el uso de tamaños máximos de agregados grandes, cerca de dos tercios del grosor de la capa, puede ser benéfico en la reducción de la tendencia a las deformaciones permanentes de mezclas sujetas a altas presiones de rueda.

En resumen, la tabla 2.1 muestra cómo los cambios en el agregado afectan las deformaciones permanentes en los pavimentos.

Tabla 2.1 Efecto de los cambios en el agregado sobre las deformaciones permanentes

	Factor	Cambio en el factor	Efecto del cambio en la resistencia al rutting
Agregado	Textura de la superficie	Suave a áspero	Aumenta
	Gradación	Abierta a continua	Aumenta
	Forma	Redondeada a angular	Aumenta
	Tamaño	Aumento en el tamaño máximo	Aumenta

2.2 MEZCLA

El comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la formación de roderas está íntimamente relacionado con el tipo de ligante asfáltico, las propiedades volumétricas y la calidad de los agregados pétreos y aditivos (en ciertos casos) empleados en la fabricación de la mezcla

2.2.1 Ligante asfáltico (Binder)

2.2.1.1 Tipo de ligante asfáltico

Un tipo de asfalto puede influir decisivamente sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas de una mezcla asfáltica en caliente. Basados en el ensayo uniaxial estático, Mahboub y Little (1988) encontraron que el uso de asfaltos menos viscosos hacían a la mezcla menos rígida y por consiguiente, más susceptible a las deformaciones permanentes. Los autores Monismith, Epps y Finn, en 1985, hicieron una observación similar y recomendaron el uso de asfaltos más duros, es decir, más viscosos para la construcción de pavimentos gruesos en climas calientes.

2.2.1.2 Contenido de ligante asfáltico

El contenido de ligante asfáltico o cemento asfáltico afecta la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir las deformaciones plásticas. El Método Marshall y Hveem son los dos métodos generalmente utilizados para seleccionar de manera preliminar el porcentaje de cemento asfáltico.

Monismith (1988), recomendó que la mezcla asfáltica debe tener un contenido asfáltico semejante al contenido de vacíos de aproximadamente 4%. Mahboub y Little (1988) indicaron que grandes contenidos de asfalto producen bajos contenidos de vacíos en las mezclas y como consecuencia un incremento potencial en la susceptibilidad a la deformación plástica de la mezcla. Ellos propusieron que la reducción en contenido de vacíos en la mezcla es resultado del incremento en el contenido de asfalto, indicaron que el espacio destinado a los vacíos es rellenado con el ligante asfáltico.

Introducir a la mezcla un contenido de asfalto mayor al debido, es equivalente a introducir lubricante entre las partículas de agregado y por otro lado se ajusta en gran medida la red de contenido de vacíos. Este fenómeno causa que la mezcla con alto contenido de asfalto sea también muy susceptible a las roderas.

Tabla 2.2 Efecto en la resistencia a la deformación permanente por el cambio en las propiedades del ligante asfáltico

Ligante Asfáltico	Factor	Cambio en el factor	Efecto del cambio en la resistencia al rutting
	Rigidez ¹	Aumento	Aumenta
	Contenido	Aumenta	Disminuye

¹Referente a la rigidez a temperatura a la cual la tendencia al **rutting** ha sido determinada. Algunos modificadores pueden ser utilizados para incrementar la rigidez en temperaturas críticas y así reducir el potencial de deformación permanente.

2.2.2 Polvo Mineral (Filler)

El polvo mineral junto con el ligante forman una masa asfáltica o mastico cuya calidad tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico, impermeabilidad, y durabilidad de la mezcla asfáltica.

Cuando el polvo mineral tiene afinidad por el agua puede producirse una degradación, en el tiempo, de la estructura íntima de la mezcla que se pondría de manifiesto por una menor estabilidad, con riesgo de deformaciones inesperadas; y por una clara caída de la resistencia.

2.2.3 Cantidad de vacíos (aire)

Mahboub y Little (1988) indicaron que altos contenidos de asfalto producían un bajo contenido de vacíos que llevaban a incrementar el potencial de **rutting**, como se puede apreciar en la figura 17. Ellos sugirieron que la reducción en los vacíos de aire como resultado del incremento en la cantidad de asfalto indicaba que los espacios vacíos eran llenados con asfalto, como resultado, el incremento en la cantidad de asfalto utilizado seria equivalente a la introducción de lubricantes entre las partículas de agregado, y por otro lado, las partículas quedarían separadas por una muy apretada red de vacíos de aire. Este fenómeno hace que las mezclas con alto contenido de asfalto sean más susceptibles a las deformaciones permanentes.

En el campo, el porcentaje de vacíos aceptable en una mezcla (4.5%), es generalmente alcanzado con energía de compactación.

Monismith (1994), observó que un incremento en el contenido de vacíos en la mezcla, provoca una disminución en la resistencia de la mezcla a la deformación plástica.

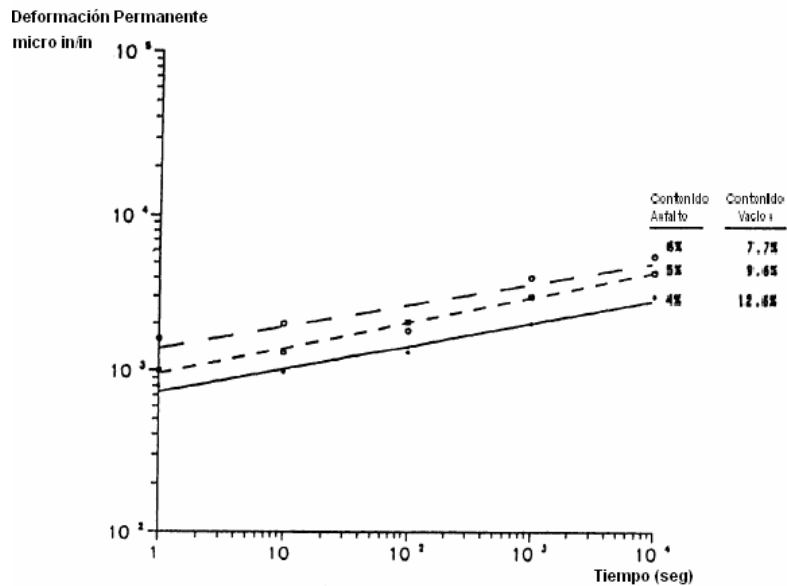


FIGURA 17 Tendencia a la deformación permanente según el contenido de asfalto y vacíos de aire

2.2.4 VMA: Vacíos en el agregado mineral

Alrededor del año 1985, varios investigadores llegaron a la conclusión que para lograr una buena resistencia a las deformaciones permanentes se requería bajo contenido de vacíos en el agregado mineral (VMA), y una gradación deseable con un mínimo de VMA se puede determinar utilizando ensayos de agregado seco.

Sin embargo, se advirtió que estos valores teóricos tan bajos de VMA podrían no ser deseables en la práctica, ya que no proporcionarían los suficientes vacíos en el agregado para tener la cantidad de ligante asfáltico que asegurará la compactación satisfactoria sin que la mezcla se vuelva sobrellenada.

En la figura 18 se identifican las curvas de gradación de agregados para nueve mezclas que fueron utilizadas para estudiar la influencia de los vacíos en las deformaciones permanentes, esto último se refleja en la figura 19.

Kandhal y Mallick (2001) observaron en su estudio el efecto de los vacíos en el agregado mineral (VAM) sobre el potencial de generación de roderas en las mezclas asfálticas, utilizando el analizador de pavimentos asfálticos APA sobre mezclas que contenían distintos tipos de agregados (calizas, granitos, entre otras), y concluyeron que el efecto de este factor está asociado con el espesor de la capa asfáltica. Un incremento en los vacíos y en el espesor de la capa de mezcla asfáltica, causan un incremento en las deformaciones permanentes para mezclas de granito y caliza, mientras que causa un decremento en las deformaciones de mezclas que contienen agregados de gran tamaño.

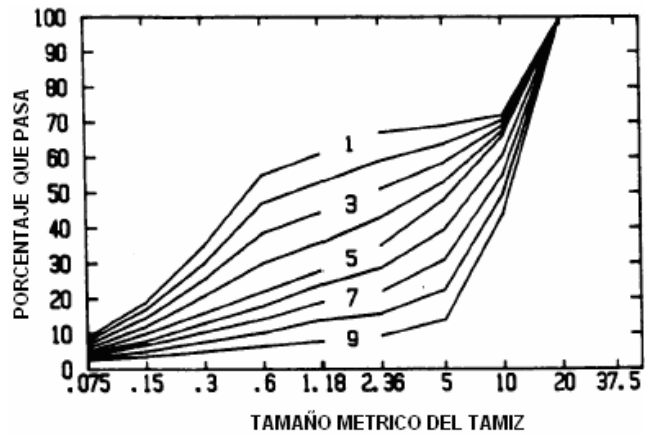


FIGURA 18 Curvas de gradación

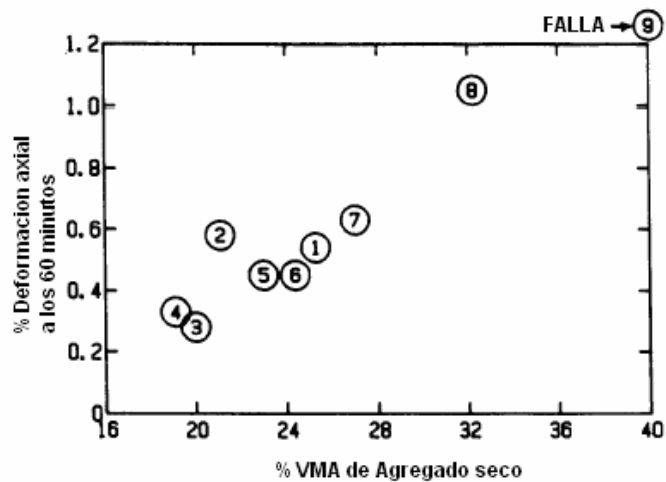


FIGURA 19 Efecto de los vacíos en el mineral sobre la resistencia a la deformación para nueve mezclas diferentes

2.2.5 Compactación

Como ya se ha mencionado, la reducción en los vacíos de aire, por encima de determinado punto, incrementa la resistencia de la mezcla al **rutting**. En el campo, un bajo contenido de vacíos generalmente se logra con una alta energía de compactación. Uge y Van de Loo encontraron que los desplazamientos relativos de las partículas minerales son de la misma naturaleza en una mezcla asfáltica manejada a alta temperatura que una a moderada temperatura, durante su colocación o compactación, pero si son sometidas a la acción de una carga prolongada. Por consiguiente, para minimizar la tendencia al **rutting**,

recomendaron el uso de mezclas duras y rodillos pesados para la compactación; dicha combinación resultaría en un arreglo improvisado del esqueleto mineral y, de este modo, un incremento en la fricción interna. Estas mezclas duras, totalmente compactadas después de su colocación serán más resistentes a la deformación permanente.

En 1987, Linden y Van der Heide resaltaron la importancia de una compactación apropiada y llegaron a la conclusión que el grado de compactación es uno de los principales parámetros de calidad en la colocación de la mezcla, especialmente para los diseños críticos, aquellos que tienen un bajo contenido de bitumen para intentar entregar una alta resistencia a la deformación permanente.

Tabla 2.3 Factores en la mezcla que afectan la resistencia a las deformaciones permanentes

Mezcla	Factor	Variación del factor	Efecto de la variación en la resistencia al rutting
	Contenido de Ligante Asfáltico	Aumento	Disminuye
	Contenido de vacíos de aire ¹	Aumento	Disminuye
	VMA	Aumento	Disminuye ²

¹ Cuando el contenido de vacíos es menor al 3%, se incrementa el potencial a que se presenten deformaciones permanentes.

² Se debe evitar la presencia de bajo contenido de vacíos minerales (menos del 10%)

2.3 MODIFICADORES ASFÁLTICOS

Diversos investigadores han tratado de mejorar el desempeño del pavimento ante las deformaciones permanentes, con el uso de modificadores asfálticos (polímeros, microfibras, etc.) y así intentar aumentar la viscosidad del ligante asfáltico a altas temperaturas sin tener el efecto adverso en temperaturas bajas.

El uso de mezclas asfálticas modificadas con polímeros, así como la adición de fibras en la mezcla asfáltica, contribuye en una mejor redistribución de los esfuerzos armando la mezcla.

Diversos análisis han demostrado que la modificación del asfalto con diferentes aditivos tiene el potencial de mejorar la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas de agregado. Sin embargo, los resultados han mostrado que para determinados asfaltos no todos los modificadores serán igual de efectivos en mejorar la resistencia al **rutting**, y que la influencia de un modificador específico es dependiente del asfalto. Por ello es importante evaluar la combinación particular asfalto/modificador con el agregado específico para determinar si el modificador asfáltico mejorará la resistencia a la deformación permanente de una mezcla. Los asfaltos modificados tienen una baja

susceptibilidad térmica a la de los convencionales, lo que favorece su buen comportamiento ante las deformaciones plásticas.

2.3.1 Empleo de polímeros

El empleo de modificadores asfálticos, en especial de los polímeros EVA (Etilenoacetato de vinilo), favorece de manera muy considerable el comportamiento de las mezclas, aumentan la resistencia a las altas temperaturas, lo que conduce a que las mezclas se comporten elásticamente, recuperando todas las deformaciones inducidas por las cargas del tráfico, evitando la formación de roderas.

Hanson (1991) realizó una evaluación y caracterización de pavimentos flexibles, elaborados con mezclas modificadas con caucho. En las pruebas de deformación plástica permanente realizadas sobre muestras extraídas en campo, se observó que las mezclas convencionales se deforman más rápido que las mezclas modificadas con el uso de caucho.

Mientras que Kroutz y M. Stroup - Gardiner (1992) realizaron estudios con el fin de observar el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado, llegando a que la adición del caucho reciclado genera mezclas con menos deformación permanente a altas temperaturas, comparadas con mezclas que no recibieron algún tipo de tratamiento.

Rebala y Estakhri (1995) observaron que mediante la incorporación de caucho al asfalto a temperaturas altas (vía húmeda) se producen mezclas asfálticas que inhiben el agrietamiento y pueden inhibir las roderas. Cuando se agrega el caucho como parte de la granulometría (vía seca) también se producen mezclas resistentes a la formación de roderas pero pueden tener efectos adversos en el agrietamiento. En el proceso de vía seca, el caucho existe como partículas separadas, dichas partículas en el asfalto normalmente intensificarán la propensión al agrietamiento pero podrán aumentar la resistencia a las roderas.

Kamel y Miller (1994) realizaron un estudio para observar el efecto de los modificadores sobre las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Emplearon tres tipos de asfaltos: uno convencional, uno modificado con polímeros, y un asfalto modificado sin el uso de polímeros llamado, Premium. Al inicio de las pruebas, el comportamiento de los tres pavimentos fue excelente, empezando a observarse diferencias en el comportamiento con el cambio de ciclos de carga de 10,000 a 20,000 cuando el pavimento convencional empezó a mostrar deterioros en una forma acelerada. A medida que se aplicaron más cargas, el comportamiento de las mezclas modificadas con asfaltos fue notoriamente superior, y ambas mezclas modificadas tuvieron un comportamiento muy similar durante toda la prueba. Debido a las deformaciones excesivas presentadas en el pavimento convencional, la prueba se terminó después de los 300,000 ciclos de carga. Las pruebas para los otros dos tipos de pavimentos (modificados) duraron

hasta los 900,000 ciclos de carga. Se comparó el número de ciclos necesarios para causar una deformación permanente de 26 mm. en cada uno de los tres pavimentos y resultó muy evidente que los pavimentos modificados incrementaron significativamente la capacidad de carga de las secciones analizadas.

2.3.2 Empleo de fibras

Monismith y Tayebali (1988), investigaron el comportamiento relativo de mezclas que contenían AR2000, AR8000 y AR2000 modificado por una microfibra de carbón negro. Basados en ensayos triaxiales estáticos y de carga repetida, las dos últimas mezclas produjeron una mejor resistencia a la deformación permanente a altas temperaturas, en comparación a los resultados obtenidos para la mezcla que contenía AR2000. Esto se puede apreciar en las figuras 20 y 21.

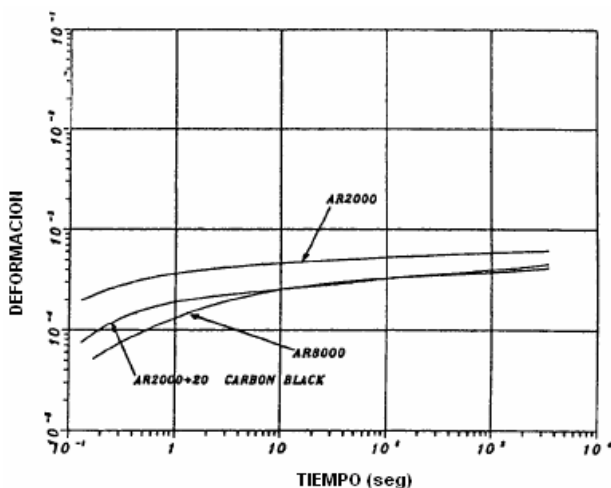


FIGURA 20 Comparación de la respuesta de tres mezclas por carga estática a 38° C

Para un estudio realizado con dos tipos de mezclas asfálticas, una convencional y otra modificada con 2% de polímetro SBS y tres tipos de fibra, se encontró que mediante la adición de fibras se tiene en la mezcla una mejor distribución de esfuerzos, además las fibras arman las mezclas confiriéndole mayor cohesión y tenacidad, gracias a su elasticidad, resultando mezclas más flexibles con una mayor resistencia al impacto y a los efectos abrasivos del tráfico.

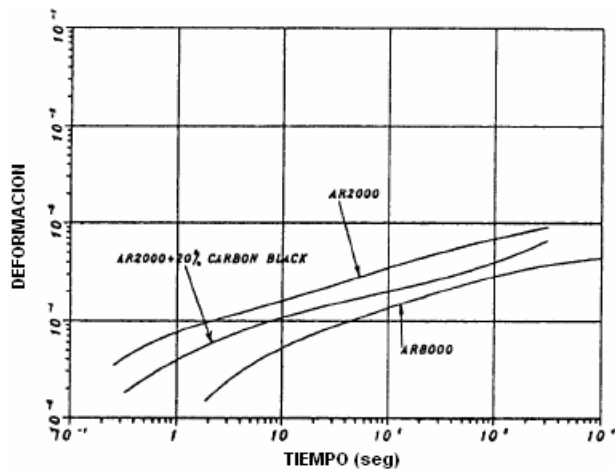


FIGURA 21 Respuesta de tres mezclas sometidas a carga repetida a 38° C

El uso de estos materiales especiales de altas prestaciones en la fabricación de carpetas asfálticas incrementan los costos iniciales de construcción de los pavimentos, sin embargo, al emplearlos es posible llegar a diseños de espesores menores que brinden comportamientos similares o mejores que pavimentos con espesores mayores fabricados con materiales convencionales.

2.4 CONDICIONES EN CAMPO

2.4.1 Temperatura

Hofstra y Klomp (1972) lograron determinar a base de medidas de ensayos de pista que el **rutting** se incrementa por un factor de 250 a 350, con el incremento de la temperatura desde los 20° C a 60° C.

Las mezclas asfálticas pueden tener un comportamiento elástico lineal, elástico no lineal o viscoso en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas el comportamiento es fundamentalmente elástico lineal, y al aumentar la temperatura se empieza a comportar como un material elástico no lineal, apareciendo el comportamiento viscoso a medida que la temperatura continúa aumentando, que hace que la mezcla fluya y se desplace con mucha facilidad. De allí que en invierno, cuando las temperaturas son bajas, no existen deformaciones plásticas, porque la mezcla se comporta de manera elástica, mientras que en otoño y primavera, cuando hay regularmente temperaturas intermedias, la mezcla tiene gran parte de su comportamiento elástico y las deformaciones plásticas son mínimas. Y en verano, a altas temperaturas, la

cohesión de la mezcla disminuye y las deformaciones originadas por el tráfico se incrementan; parte de estas deformaciones se dan en la componente viscosa de la mezcla, no siendo recuperables y apareciendo las deformaciones plásticas permanentes o roderas.

En la siguiente figura se muestra el cambio en el comportamiento de la mezcla asfáltica en función de la temperatura de servicio:

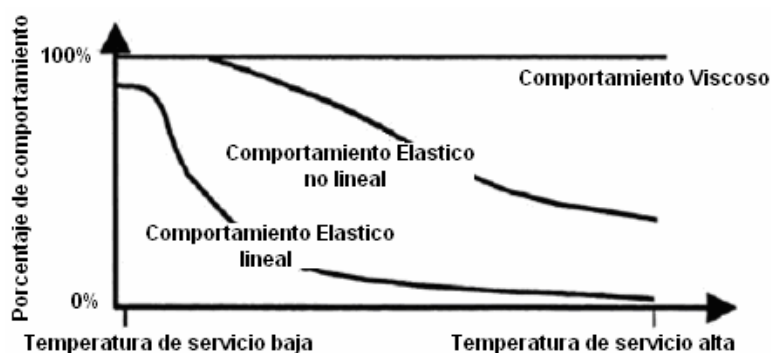


FIGURA 22 Cambio en el comportamiento de la mezcla asfáltica en función de la temperatura

2.4.2 Estado de esfuerzos

Seed (1955), Monismith (1975) y Brown (1977) mostraron que el esfuerzo desviador es el principal factor que tiene influencia en la deformación plástica acumulada para suelos finos bajo carga repetida. Un incremento en el esfuerzo desviador conducirá a un aumento de la deformación plástica.

Fredrik Lekarp, realizó un estudio acerca de la influencia de las repeticiones de carga y los estados de esfuerzos en la resistencia de las mezclas a las deformaciones permanentes. Observando, que el nivel de los esfuerzos tiene una marcada influencia en la deformación permanente; además, se encontró que, generalmente, a medida que la suma de esfuerzos principales aumenta, se incrementa la magnitud de la deformación permanente alcanzada en los materiales.

2.4.3 Tráfico

Normalmente una mezcla es diseñada para una intensidad y distribución de tráfico dada, que se ha basado en correlaciones del funcionamiento en campo. Los cambios en la distribución del tráfico, especialmente el incremento en la

proporción de camiones pesados, puede aumentar el rango de **rutting** aún si el pavimento fue diseñado y construido apropiadamente.

El tráfico tiene una gran influencia en la aplicación de las cargas en un pavimento y su caracterización es bastante compleja, debido no solo a la variabilidad de los distintos vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito.

Para caracterizar las solicitaciones producidas por el tránsito a un pavimento se pueden estudiar independientemente los siguientes aspectos:

- ⊕ Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (carga por eje, número de ejes que circulan, y número de repeticiones de carga).
- ⊕ Forma geométrica de cada solicitación sobre el pavimento (área de contacto y reparto de presiones sobre la misma).
- ⊕ Velocidad de los vehículos y tiempo de solicitación en un punto.
- ⊕ Estados de esfuerzos que producen las cargas, en función de su magnitud y tipología (verticales, tangenciales, fenómenos de impacto, etc).
- ⊕ Características de las capas del pavimento.

La distribución lateral de la zona de rodadas está influenciada por la velocidad del tráfico, el ancho del carril y la profundidad de las roderas. Las velocidades bajas del tráfico, corresponden a frecuencias de carga más bajas, algo que contribuye directamente al desarrollo de roderas en las capas asfálticas.

2.4.3.1 Repeticiones de carga

Cada paso de los neumáticos por un punto sobre el pavimento, se puede considerar como un pulso de carga, si la mezcla asfáltica está a una temperatura relativamente alta, esta condición le permite comportarse de una manera viscoelastoplástica. Ante las solicitaciones del tráfico, cada pulso de carga, se irá acumulando permanentemente lo que generará las roderas.

Fredrik Lekarp, analizó la influencia del número de ciclos de carga aplicados en la deformación permanente en pruebas triaxiales cíclicas. La figura 23 muestra la evolución de la deformación permanente con el número de aplicaciones de carga en 5 diferentes materiales estudiados, se aprecia claramente cómo la magnitud de la deformación permanente acumulada varía en forma directa con el número de ciclos de carga, mostrando además que la velocidad de acumulación de la

deformación permanente decrece con el número de repeticiones de carga. La deformación permanente parece incrementarse en forma asintótica hacia un valor límite.

De resultados de ensayos de pista se desarrolló la siguiente ecuación:

$$y = a + b(N)^{0.5} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde y es la profundidad de la huella, N es el número de repeticiones de carga y, a y b son parámetros determinados en laboratorio.

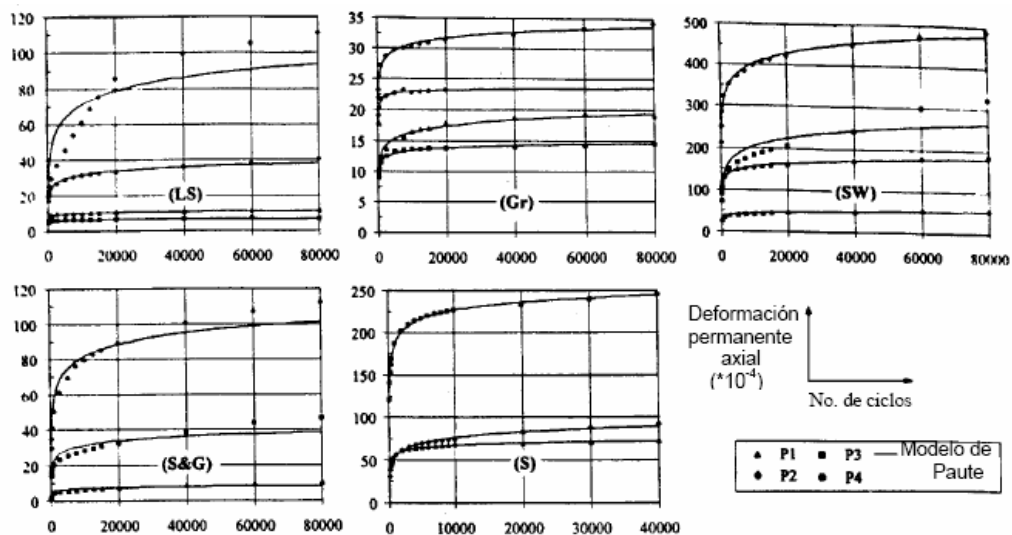


FIGURA 23 Deformación axial permanente versus el número de repeticiones de carga

2.4.3.2 Ejes Equivalentes y presión de contacto

Las altas presiones de contacto sobre los pavimentos están directamente relacionadas con los valores de las cargas por eje de los vehículos, y estas presiones son las que conllevan a la formación de roderas sobre los pavimentos. Las altas presiones de contacto dependen de la presión de inflado de los neumáticos, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta para presiones bajas de llanta, y para presiones altas, la presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta.

Se ha sugerido que la carga de rueda y la presión de inflado de la llanta tienen altas influencias sobre las deformaciones permanentes. La figura 24 ilustra la

influencia de la presión de contacto promedio, obtenida de diferentes cargas y presiones de llanta, sobre el parámetro b (coeficiente de regresión). Por ejemplo, incrementando, para una llanta doble, la presión de contacto de 0.6 MPa (87 PSI) a 0.9 MPa (130 PSI) se aumenta el parámetro b por un factor cercano a 3, lo que lleva a un incremento en la profundidad de la huella.

Un estudio del comportamiento de los pavimentos en Dubai, indicó que la inestabilidad puede ser anticipada teniendo especímenes de ensayo que hayan sido compactados en el laboratorio con las densidades reales obtenidas en el pavimento luego de 10 meses de tráfico.

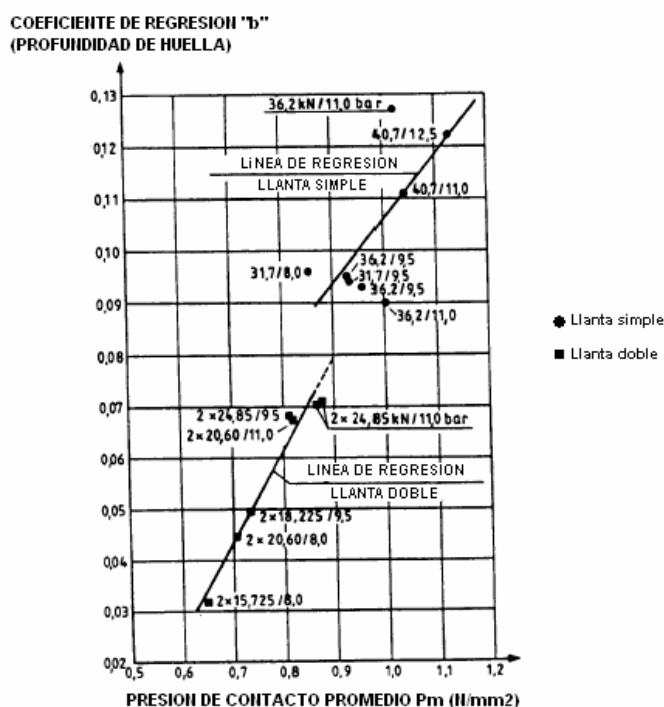


FIGURA 24 Efecto de la presión de contacto promedio sobre el rango de deformación permanente (coeficiente de regresión "b")

2.4.3.3 Velocidad

Otro aspecto que tenemos que considerar acerca del vehículo es la velocidad, si se utiliza la teoría viscoelástica para el diseño del pavimento, la velocidad está directamente relacionada con la duración de la carga; si se utiliza la teoría elástica, debe seleccionarse adecuadamente el módulo de resiliencia de los materiales para el pavimento, en proporción con la velocidad del vehículo.

2.4.4 Agua

El agua puede incrementar la tendencia de una mezcla a deformarse permanentemente, los efectos del agua pueden considerarse en la fase inicial del diseño de la mezcla o como una parte del proceso de evaluación de la misma. Cuando existe una modificación de la estructura de pavimento de estado seco a húmedo, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla.

En la figura 25 se muestran los resultados de ensayos de cortante simple realizados a mezclas antes y después de condicionar el agua. La tendencia al **rutting** en ambas mezclas se incrementó significativamente cuando fueron sujetas a saturación mantenida de agua.

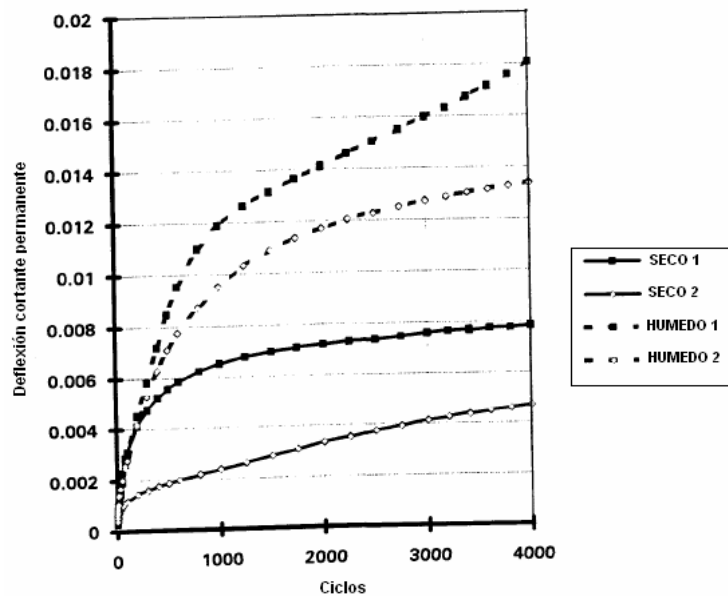


FIGURA 25 Comparación en la variación de las deformaciones permanentes en muestras de la misma mezcla sujetas a condicionamientos de agua

Para controlar las deformaciones permanentes, se recomienda utilizar grados de saturación menores al óptimo, siempre y cuando los materiales sean volumétricamente estables ante cambios de humedad.

En un estudio (Brown 1996), se midió la acumulación de la deformación permanente de 4 materiales granulares de calidad diferente, a los cuales, durante el proceso de aplicaciones de carga, se les inyectó agua, controlando las condiciones de drenaje a fin de conocer la influencia de un drenaje efectivo en el comportamiento de los materiales.

La Figura 26 muestra la evolución de la acumulación de deformación permanente con el número de aplicaciones de carga para los 4 materiales, a los cuales se les inyectó agua a partir de un cierto número de repeticiones de la carga. Se puede apreciar la ventaja de utilizar materiales de buena calidad (G1, correspondiente a una roca triturada), a la vez que se puede ver la importancia de un drenaje efectivo en el material (líneas discontinuas).

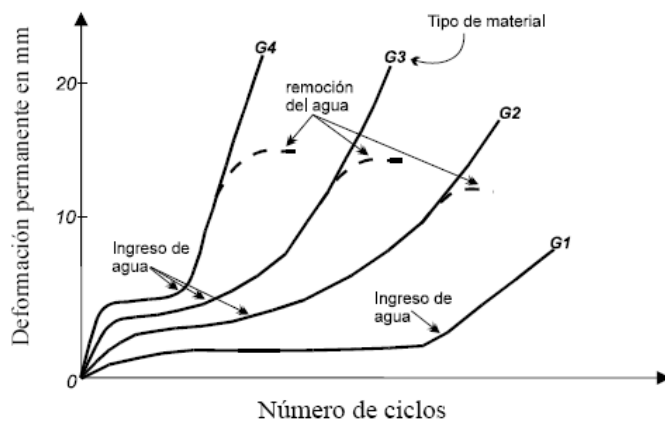


FIGURA 26 Influencia del agua, drenaje y tipo de material granular en la acumulación de deformación permanente

Tabla 2.4 Efecto de la variación en las condiciones de campo en la resistencia al rutting de los pavimentos

Condiciones en el campo	Factor	Variación en el factor	Efecto de la variación en la resistencia al rutting
	Temperatura	Aumento	Disminuye
	Estado de esfuerzo/deformación	Aumento en la presión de contacto de la rueda	Disminuye
	Repetición de carga	Aumento	Disminuye
	Agua	Seco a Húmedo	Disminuye si la mezcla es sensible al agua

CAPITULO III

ENSAYOS EN LABORATORIO

El desarrollo de los métodos o modelos para la predicción de las deformaciones permanentes requieren técnicas apropiadas, no sólo, para calcular la respuesta del pavimento a las cargas, sino también para la caracterización real de los materiales que componen la mezcla. Para todo modelo predictivo que se haya desarrollado, la determinación de los parámetros representativos se ha realizado mediante ensayos de laboratorio.

Por esta razón los ensayos de laboratorio deben reproducir lo mejor posible lo que ocurre en un pavimento cuando se aplican las cargas. Se pueden evaluar deformaciones bajo condiciones de temperatura, humedad, esfuerzos y características generales de los materiales, y al final se puede obtener un dictamen en el que se analizan dichas características y se comparan con los requisitos o normas fijadas.

Estos ensayos ayudan a que los pavimentos puedan ser previamente analizados antes o después de su colocación, y existen unos ensayos más aproximados a la realidad que otros. A continuación se mencionarán detalladamente algunos de los tipos de ensayos que más se utilizan.

3.1 ENSAYOS UNIAXIALES

3.1.1 Ensayo uniaxial estático (creep)

El ensayo uniaxial estático es usado por una gran variedad de métodos para medir las características de las mezclas, se encontró que para obtener una similitud adecuada entre los valores observados en un ensayo de pista y aquellos que se calculan con el uso de ensayos estáticos, estos últimos deben ser realizados a niveles de esfuerzo relativamente bajos dentro de la línea del rango de los materiales, la necesidad de que la prueba se realice dentro de un rango limitado se ha atribuido al hecho de que el tiempo de carga en campo es pequeño comparándose con el tiempo de carga que se aplicará en el ensayo estático. Van de Loo logró concluir que si se realiza el ensayo con niveles de esfuerzo de 15 psi, se obtendrán resultados aceptables de la prueba.

3.1.1.1 Modo de prueba:

El ensayo uniaxial estático consiste de una muestra de mezcla asfáltica con extremos planos y paralelos entre si, que se coloca entre dos placas de acero, una de las cuales es fija y la otra móvil. Una carga constante es aplicada sobre la placa móvil y la deformación en el espécimen se mide mediante un dispositivo LVDT (Transformador Diferencial Variable Lineal) en función del tiempo.

Generalmente, las dimensiones de los especímenes utilizados son de 4 pulg. de diámetro por 8 pulg. de altura, y aplican para todos los ensayos uniaxiales y triaxiales. La temperatura en el ensayo se mantiene constante, en la figura 27 se muestra el dispositivo que se usa para un ensayo de carga estática.

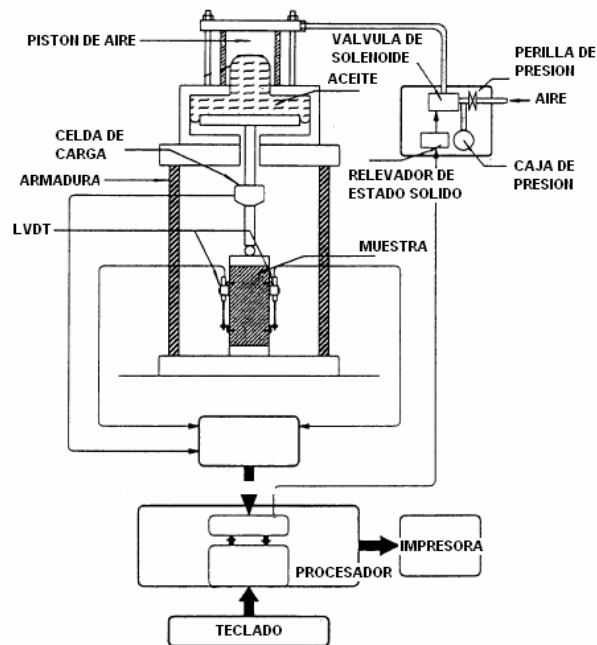


FIGURA 27 Dispositivo para ensayos de carga estática y repetida

Las condiciones del ensayo consisten de un esfuerzo estático axial (σ) de 100 kPa, que se aplica al espécimen por un periodo de una hora a una temperatura de 40° C. La presión aplicada usualmente no puede exceder los 206.9 kPa (30 psi) y la temperatura del ensayo usualmente no puede exceder los 40° C, o la muestra puede fallar prematuramente (Brown 2001)

Para que los resultados de los ensayos de carga estática no vayan a depender de la forma del espécimen o de la relación altura/diámetro, se debe procurar que los

extremos de la muestra sean planos, paralelos y bien lubricados. La lubricación es necesaria para evitar que las platinas restrinjan lateralmente al espécimen, y se proporcione una distribución uniforme de esfuerzos.

Los datos de salida que se obtienen de este ensayo son las deflexiones, medidas como función del tiempo de aplicación de carga, a una temperatura constante (T).

3.1.1.2 Ventajas

- ✦ Ensayo económico.
- ✦ Es el más difundido por su simplicidad para determinar las propiedades del material.
- ✦ El equipo generalmente está disponible en muchos laboratorios y cuenta con expertos necesarios para su implementación.

3.1.1.3 Limitaciones

- ✦ Son menos sensibles a la variación en las características de la mezcla frente a los ensayos de carga repetida.
- ✦ Se restringe a niveles bajos de temperatura del ensayo y los niveles de carga a aplicar, para evitar que la muestra falle prematuramente.
- ✦ Cuestionable su habilidad de predecir el desempeño de la mezcla ya que los pavimentos generalmente están expuestos a presiones de rueda de neumático de aproximadamente 120 psi (828 kPa) y temperaturas máximas de 60° C o mayores, por lo que las condiciones de este ensayo no simulan muy cerca lo que ocurre en campo.
- ✦ No simula el fenómeno dinámico que se presenta en realidad.
- ✦ Dificultad para obtener relaciones de altura diámetro de 2:1 en el laboratorio.

3.1.2 Ensayo uniaxial con carga repetida

Se han usado una variedad de sistemas de carga para medir la respuesta del pavimento a las cargas repetidas, desde sistemas simples como el mecánico o el neumático hasta sistemas más complejos como los electro-hidráulicos.

Los sistemas neumáticos, como el ilustrado en la figura 27, probablemente han sido los más apropiados para la medición de las deformaciones permanentes; los sistemas más sofisticados incluyen una cámara de ensayo que permite un control

más cuidadoso de la temperatura y la aplicación de la carga repetida, confinando la presión en coordinación con la carga repetida vertical.

Las deflexiones plásticas, como una función del número de repeticiones de carga, pueden ser halladas a partir de las medidas realizadas con este ensayo, siempre teniendo en cuenta que la forma y duración del pulso pueden tener una enorme influencia en las medidas, por lo que se debe procurar duplicar lo más exacto posible las condiciones existentes en el pavimento real.

3.1.2.1 Modo de prueba

El equipo debe tener las siguientes capacidades:

- ✦ Aplicación de carga axial repetida y pulsos de esfuerzo laterales en cualquier forma que se desee, ya sea en fase el uno con el otro o con un espaciamiento desde los 0.01 a los 1 segundos.
- ✦ Aplicación de esfuerzos axiales ya sea en tensión o compresión.
- ✦ Incorporación de periodos de descanso entre los pulsos de esfuerzo, en un rango desde casi cero a varios segundos.
- ✦ Capacidad de controlar la temperatura con una tolerancia de 0.5° F.

Las deformaciones permanentes vertical y horizontal son registradas de manera sencilla mediante un dispositivo LVDT en el pisón lateral, y la deformación lateral se mide sobre el espécimen.

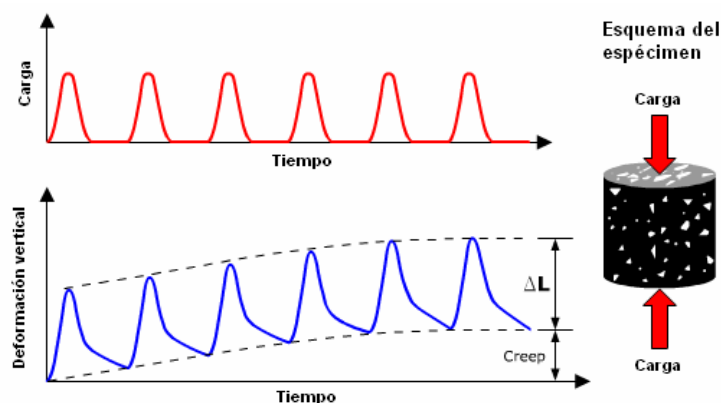


FIGURA 28 Esquema de un ensayo de carga repetida

3.1.2.2 Ensayo uniaxial con módulo dinámico

El ensayo uniaxial con módulo dinámico es una variación del ensayo uniaxial con carga repetida en cuanto al modo de prueba se refiere, pero difieren en sus ciclos de carga y frecuencia. Mientras el ensayo de carga repetida aplica la misma carga varias miles de veces en la misma frecuencia, el ensayo de módulo dinámico aplica una carga que varía sobre un rango de frecuencias entre 30 a 45 segundos. Se realiza aplicando una carga axial haversine al espécimen cilíndrico (coseno invertido para la mitad de su amplitud, un haversine continuo tiene apariencia de ser una onda sinusoidal con un pico negativo en cero), la figura 36 muestra el esquema de un ensayo de módulo dinámico típico.

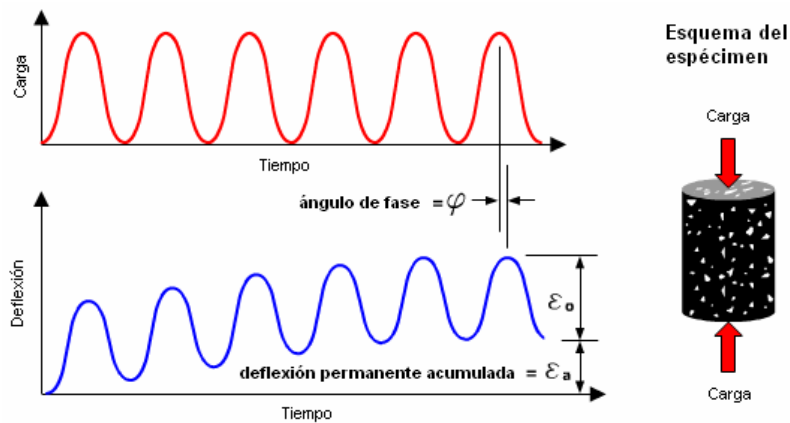


FIGURA 29 Esquema del ensayo de módulo dinámico

Este ensayo mide una relación de esfuerzo-deflexión en el espécimen, bajo una carga sinusoidal continua.

3.1.2.3 Ventajas

- ✦ Más sensible a los cambios en las características de la mezcla que los ensayos de carga estática.
- ✦ Buenas simulaciones de las condiciones de tráfico
- ✦ Los dispositivos más sofisticados incluyen una cámara de ensayo que permite un control más cuidadoso de la temperatura y la aplicación de la carga repetida.

3.1.2.4 Limitaciones

- ✦ Condiciona la temperatura del ensayo y los niveles de carga.
- ✦ El equipo es más complejo que el usado en los ensayos estáticos.

3.2 ENSAYOS TRIAXIALES

La diferencia con los ensayos uniaxiales, es que este tipo de ensayo proporciona una presión de confinamiento, lo que se aproxima más a las condiciones reales a las que está sometido un pavimento, proporciona una temperatura y presión similar a la del lugar, llevando a los especímenes a una falla a corto tiempo.

3.2.1 Ensayo triaxial estático (creep)

También es conocido como el ensayo estático (**creep**) confinado, su procedimiento es similar al ensayo uniaxial estático, pero además usa una presión de confinamiento de 138 kPa aproximadamente, lo que permite que las condiciones del ensayo estén más cercanas a reproducir el escenario real, por ello, se considera que este ensayo hace un mejor trabajo al predecir el comportamiento que el ensayo uniaxial estático (Roberts, 1996).

3.2.1.1 Modo de prueba

Se ensayan muestras cilíndricas, colocándolas dentro de una celda triaxial, esta celda se llena de un fluido a presión determinada. Los esfuerzos de corte se aplican mediante fuerzas de compresión verticales accionadas por pistones. El comportamiento esfuerzo-deformación es determinado por la presión de confinamiento (presión en la celda).



FIGURA 30 Sistema para el ensayo triaxial estático

El ensayo esfuerzo-deformación tiene una duración aproximada de 1 hora, tiempo durante el cual debe medirse la presión, el desplazamiento, y la deformación permanente que sufre la muestra se mide luego de la descarga (figura 31), que será relacionada con el potencial de **rutting** del espécimen ensayado.

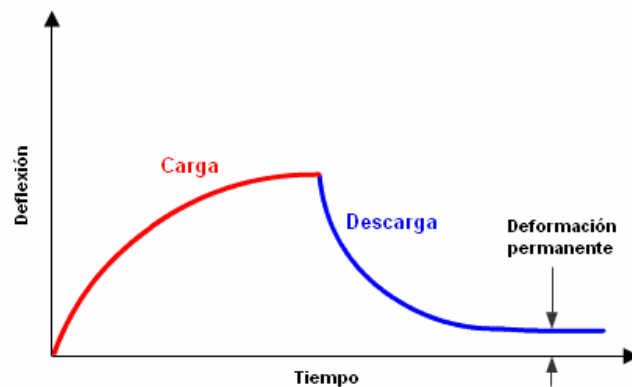


FIGURA 31 Curva para el ensayo estático (creep)

Para cada una de las variables se tiene un sensor que se adecua a los requerimientos de medición:

- ✦ Presión: transductores de presión
- ✦ Deformación diametral: galgas extensiométricas
- ✦ Deformación axial: potenciómetros lineales, LVDT

3.2.1.2 Ventajas

- ✦ Relativa simplicidad y disponibilidad del equipo
- ✦ Este ensayo predice mejor el comportamiento de las mezclas al reproducir de forma más exacta las condiciones en campo, que los ensayos uniaxiales o no confinados.
- ✦ Parece ser más factible para su uso, en comparación a los ensayos uniaxiales, ya que, en algunas mezclas, se necesita de algún confinamiento para asegurar que no ocurra falla temprana en las mismas.

3.2.1.3 Limitaciones

- ✦ Sus resultados no se relacionan muy bien con el rutting real medido en los pavimentos en servicio (Brown, 2001).

3.2.2 Ensayo triaxial con carga repetida

El ensayo triaxial de carga repetida parece ser el más correcto a la hora de medir las características de deformación permanente, en comparación con los ensayos de carga estática, ya que simula de una mejor manera el estado de esfuerzos producido por varios vehículos en movimiento.

En los ensayos triaxiales de carga repetida, las probetas se colocan dentro de la cámara triaxial, donde son sometidas a una condición de esfuerzo vertical de compresión que varía con una función sinusoidal (σ_v), a una presión horizontal estática e isotrópica (σ_H) y a una temperatura constante. Ante las condiciones descritas, la muestra de ensayo sufre alteraciones en su geometría: la altura total de la muestra disminuye por la aparición de deformaciones permanentes (ΔH_p) y la probeta sufre un achatamiento que genera variaciones en su radio (figura 32).

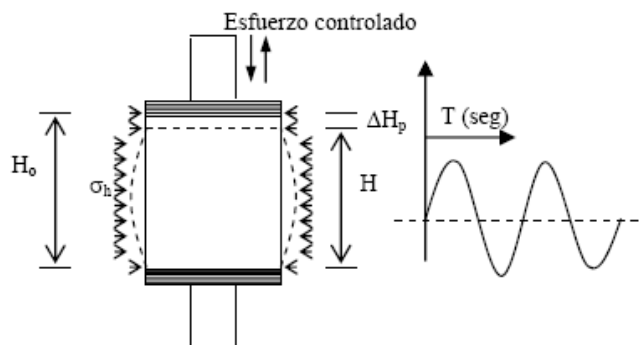


FIGURA 32 Esquema del principio del ensayo triaxial de carga repetida

El ensayo proporciona la relación entre el porcentaje de deformación permanente de la muestra en función del número de ciclos de carga a la que ha sido sometida, siendo H_0 la altura inicial de la muestra y ΔH_p la variación de altura asociada a la deformación permanente, la curva de variación de la deformación permanente $\epsilon = \Delta H_p / H_0$, en función del número de ciclos de carga es llamada curva de flujo.

Con la curva de flujo se pueden definir dos parámetros:

- ✦ El flujo inicial ϵ_0 , expresado en porcentaje y que es el punto de corte con la ordenada del origen.

- ⊕ La velocidad de flujo $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dN$, llamada tasa de flujo y que es la pendiente, y se expresa en porcentaje por millón de ciclos.

La velocidad de flujo constituye el parámetro más importante en la caracterización de la mezcla dentro de la ley de flujo bajo unas condiciones de esfuerzos, temperatura y frecuencia determinadas.

Los ensayos triaxiales cíclicos permiten encontrar la ley de flujo del material, determinando las relaciones matemáticas individuales entre la velocidad del flujo, la temperatura, el tipo y frecuencia de aplicación de carga y los esfuerzos vertical y horizontal generados en el material, como:

$$\dot{\epsilon} = f(\theta, \sigma_V, \sigma_H, f) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

El cálculo de la huella generada sobre la superficie del material se realiza con base en la variación de la velocidad de deformación, a diferentes profundidades y a diferentes horas del día. El valor de la huella total es:

$$\text{Huella} = DH = \int \int \dot{\epsilon} \frac{dN}{dt} dt dh \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Esta ecuación es el resultado de la relación que existe entre el valor de la deformación permanente (DH) y el número de ciclos.

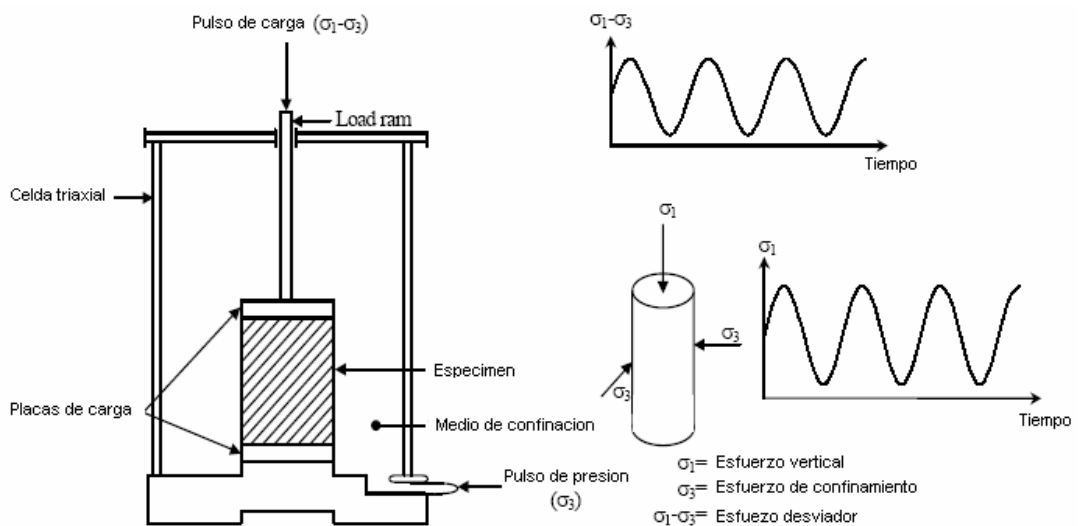


FIGURA 33 Ensayo triaxial con carga repetida

3.2.2.1 Modo de prueba

Una vez compactada la muestra, se coloca en el marco de carga del equipo triaxial, en el cual se somete a un esfuerzo desviador de 69 kPa y un esfuerzo de confinamiento de 13.8 kPa (20,000 ciclos de carga). Estos niveles de esfuerzo son el máximo esfuerzo desviador y el mínimo confinamiento propuesto por SHRP para prueba de módulo de resiliencia; además, se considera que estos niveles de esfuerzos son los que se presentan a nivel de la subrasante.

3.2.2.2 Ventajas

- ✦ Las temperaturas del ensayo y los niveles de carga simulan mejor las condiciones de campo que los ensayos no confinados.
- ✦ Mejor representación de las condiciones de tráfico.

3.2.2.3 Limitaciones

- ✦ Más complejo de utilizar en comparación con el ensayo uniaxial de carga repetida.

3.3 ENSAYOS DE CORTE

3.3.1 Ensayo de cortante simple

El ensayo de cortante simple ha sido usado mundialmente para la medida de las propiedades de los sólidos. Para mezclas asfálticas su uso se justifica cuando la causa predominante del ahuellamiento es la fluencia plástica de corte.

El equipo más apropiado es el que permite la aplicación de una carga repetida o dinámica sobre un rango de frecuencias que permita, además, la determinación de los módulos de corte resiliente y dinámico, o la respuesta cortante a la humedad bajo el control de esfuerzos o deformaciones; con o sin inversión de los esfuerzos.

Se ha empleado el ensayo de cortante simple para comparar la respuesta de muestras retiradas de pavimentos reales con la respuesta de especímenes compactados en laboratorio mediante el compactador de amasado California.

3.3.1.1 Modo de prueba

La máquina universal de prueba (UTM), utiliza muestras cilíndricas en cualquiera de las dos combinaciones de dimensiones: 15 cm. (6 pulg.) de diámetro por 5 cm. (2 pulg.) de altura, o, 20 cm. (8 pulg.) de diámetro por 7.5 cm. (3 pulg.) de alto; éstas son preparadas en el laboratorio por compactación con rodillo.

Para minimizar los efectos de flexión, se debe procurar que los especímenes tengan una relación diámetro-altura superior a tres, además, los análisis de elementos finitos mostraron que si se toman muestras con diámetro mínimo de 15 cm. (6 pulg.) el error al estimar el módulo cortante no será mayor de un 10%.

Para medir los desplazamientos cortantes se usa un transformador lineal diferencial variable (LVDT), y en el caso que se necesite presión de confinamiento, una membrana de látex de 0.64 mm. (0.025 pulg.) de grosor, se coloca alrededor del espécimen.



FIGURA 34 Sistema utilizado en el ensayo de cortante simple

3.3.1.2 Ventajas

- ✦ Ampliamente utilizado en los laboratorios.
- ✦ Un gran conocimiento de la importancia de la relación esfuerzo-deformación.
- ✦ La simplicidad de este ensayo en relación con los ensayos triaxiales.
- ✦ Puede simular las situaciones de campo que son caracterizadas por un estado de esfuerzo puro o cercano a él.
- ✦ Este es el ensayo simplificado que permite controlar la rotación de los principales ejes de deformación y esfuerzo.

3.3.2 Ensayo SST de frecuencia de barrido-módulo dinámico cortante

El ensayo de modulo dinámico cortante SST (Superpave Shear Tester) es conocido como un ensayo de frecuencia de barrido a altura constante (FSCH por sus siglas en ingles). Las ecuaciones del módulo dinámico cortante son las mismas que se utilizan para calcular el tradicional módulo dinámico, E^* , sólo que éste es reemplazado por G^* , que denota el modulo de corte dinámico, además σ_0 y ϵ_0 son reemplazados por τ_0 y γ_0 que corresponden a el esfuerzo cortante y la deflexión cortante, respectivamente.

El módulo complejo de corte dinámico esta dado por:

$$G^* = |G^*| \cos \varphi + i |G^*| \sin \varphi \quad \text{Ecuación 3.3}$$

donde:

G^*	=	Módulo complejo dinámico de corte
$ G^* $	=	Módulo dinámico de corte
φ	=	Angulo de fase, para materiales elásticos es igual a cero y el modulo complejo es igual al modulo dinámico; para materiales viscoso el ángulo es de 90°
i	=	Número imaginario

El valor absoluto del modulo complejo $|G^*|$ esta definido como el modulo dinámico cortante y es calculado por:

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

donde:

$ G^* $	=	Módulo dinámico de corte
τ_0	=	Amplitud máxima de esfuerzo cortante
γ_0	=	Amplitud máxima de la deflexión cortante.

3.3.2.1 Modo de prueba

El Superpave Shear Tester (SST FSCH) es un ensayo de deflexión constante, que es lo opuesto a un ensayo de esfuerzo constante. Los especimenes del ensayo tienen 150 mm. (6 pulg.) de diámetro por 50 mm. (2 pulg.) de alto. Para realizar el ensayo, la muestra es unida a dos placas (figura 44), y luego se inserta en el Superpave Shear Tester (figura 45), se aplica una deflexión horizontal en un rango de frecuencias de 0.1 a 10 Hz, usando un patrón de carga haversine; mientras la

altura del espécimen se mantiene constante por medio de compresión o tracción vertical. El SST produce una deflexión constante cercana a 100 micro-deflexiones (Witczak, 2002).



FIGURA 35 Muestra preparada (izq.) y muestras después del ensayo (der.)

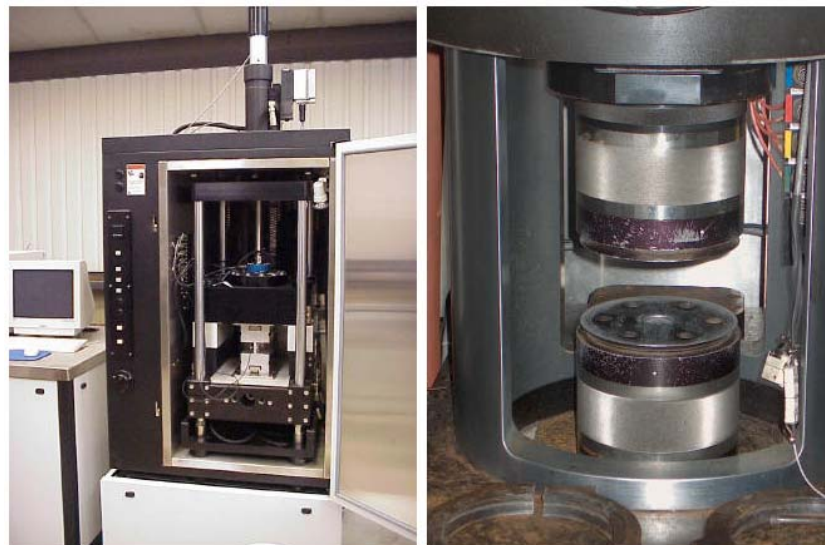


FIGURA 36 Dispositivo SST (izq.) y cámara de carga (der.)

3.3.2.2 Limitaciones

El SST de frecuencia de barrido es algo costoso y requiere de un operador altamente entrenado para que lo ejecute, haciéndolo impráctico para el uso en campo.

3.3.3 Ensayo SST de carga repetida con altura constante

El ensayo SST de carga repetida a altura constante (RSCH) se desarrolló para evaluar la resistencia al rutting de mezclas asfálticas.

3.3.3.1 Modo de prueba

Este ensayo consiste en la aplicación de un esfuerzo cortante haversine repetido de 68 kPa, a un espécimen compactado de mezcla asfáltica de 150 mm. de diámetro por 50 mm. de altura, en tiempos de carga de 0.1 segundos con un descanso de 0.6 segundos, mientras se suministra el esfuerzo axial necesario para mantener la altura constante. El ensayo es realizado para 5000 ciclos de carga o hasta que se presente el 5% de la deflexión axial en la mezcla.

La deflexión permanente se mide como la variable de respuesta para cierto intervalo de ciclo de carga, y se registra usando un LVDT y un sistema computarizado de adquisición de datos.

3.3.3.2 Limitaciones

Aún cuando el ensayo se realice con un alto control de las circunstancias y por operadores experimentados, los datos del RSCH han mostrado una alta variabilidad.

3.3.4 Ensayo triaxial de esfuerzo cortante

Es un método común para medir las propiedades mecánicas de los sólidos deformables. El principio detrás del ensayo triaxial cortante es que el esfuerzo aplicado en la dirección vertical (a lo largo del eje del cilindro) puede ser diferente al esfuerzo aplicado en las direcciones horizontales (a lo largo de los lados del cilindro), esto produce un estado de esfuerzos no hidrostático, el cual contiene esfuerzo cortante.

El ensayo triaxial esta diseñado para medir el límite de soporte a los esfuerzos cortantes presentes en el material.

De este ensayo es posible extraer parámetros fundamentales, incluyendo el ángulo de fricción interna, cohesión aparente y ángulo de dilatación, que son parámetros usados en modelos computacionales para predecir comportamientos.

Los tipos de ensayo triaxial cortante son:

- ✦ Ensayo consolidado drenado (CD)
- ✦ Ensayo consolidado no drenado (CU)

- ⊕ Ensayo no consolidado no drenado (UU)
- ⊕ Ensayo compresivo no confinado (UC), que es el mas usado en la industria comúnmente

3.3.4.1 Modo de prueba

La muestra está contenida en un mango cilíndrico de látex, con placas planas circulares de metal que tapan los extremos del espécimen. Este cilindro se coloca dentro de un baño de agua que provee presión a través de los lados del mismo. La placa superior puede manejarse mecánicamente hacia abajo o hacia arriba, a lo largo de los ejes del cilindro para comprimir el material. La distancia que recorre la placa superior es medida como una función de la fuerza requerida para moverla. También es medido el cambio en el volumen neto del material por cuánta agua se mueve hacia adentro o hacia afuera del baño circundante.

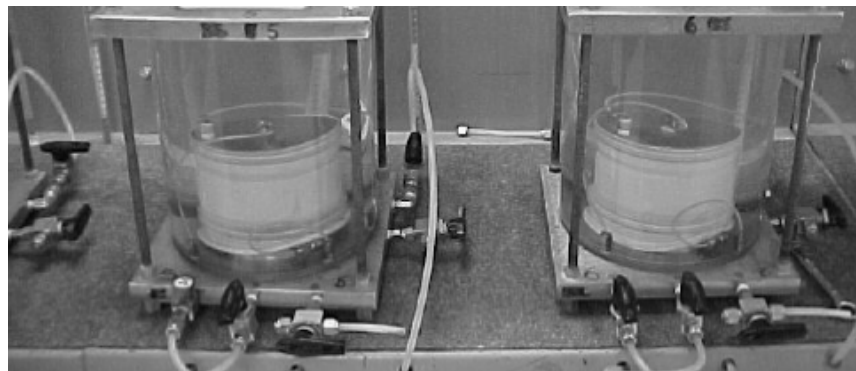


FIGURA 37 Ensayo triaxial de esfuerzo cortante

El esfuerzo en las placas se incrementa hasta que el material en el cilindro falla y se crean regiones deslizantes dentro del mismo, conocidas como zonas cortantes. Un movimiento donde el material se deforma bajo esfuerzo cortante se conoce como momento cortante, la geometría del momento cortante en un ensayo triaxial, típicamente, causa que el espécimen se vuelva más corto mientras se ensancha a los lados. Entonces el esfuerzo sobre la placa se reduce y la presión del agua empuja a los lados hacia adentro, causando que el espécimen crezca en altura nuevamente. Este ciclo se repite varias veces mientras se recolectan los datos de esfuerzo y deflexión de la muestra.

El drenaje, la presión de consolidación y la historia de esfuerzo pueden ser controladas apropiadamente, por lo que el ensayo es más apropiado para arcillas o suelos cohesivos (subrasante).

3.3.4.2 Limitación

Este ensayo es efectivo sólo cuando se están evaluando las propiedades del suelo que servirá como subrasante, especialmente aquellos que son cohesivos.

3.4 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

El ensayo de tracción indirecta representa el estado de tensión crítica para una mezcla bituminosa, reproduciendo el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción.

3.4.1 Modo de prueba

El principio del método consiste en imponer una deformación a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los platos de la prensa, mediante una carga de compresión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas. Esta configuración de carga, que puede ser sencilla o repetida, provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral. Se utiliza básicamente para determinar un parámetro que pueda caracterizar la mezcla bituminosa, este parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta y opcionalmente se puede determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal de la probeta durante el ensayo añadiendo unos sensores.

En el Laboratorio de Caminos del Departamento de ITT se utiliza la prensa MTS accionada hidráulicamente por un motor de inyección de aceite. La prensa está controlada electrónicamente; el TESTAR es el aparato electrónico que permite controlar y medir las tensiones y deformaciones que se aplican en las probetas.

La prensa está complementada con un soporte informático que permite tratar los datos en tiempo real, ya que los datos de tensión y deformación son almacenadas cada 0,2 segundos y se incorporan en una hoja de cálculo que luego nos permite realizar las gráficas tensión-deformación.

El ensayo dura pocos segundos, cuando la prensa llega a una tensión residual de 5 a 20 KN. La figura 38, izquierda, nos muestra el inicio del ensayo y a la derecha, el final del mismo, cuando la probeta llega a la rotura.

3.4.2 Ventajas

- ✦ Es un método práctico y sencillo para caracterizar las propiedades de las mezclas bituminosas o evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción.
- ✦ El tipo de muestra y el equipo son los mismos que los utilizados para otros ensayos.

- ✦ La rotura no se ve afectada por las condiciones de la superficie de la probeta.
- ✦ La rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción.
- ✦ El coeficiente de variación de los resultados del ensayo es relativamente bajo comparado con otros métodos. Tesoriere, en sus estudios habla de dispersiones inferiores al 15%.
- ✦ El ensayo puede utilizarse bajo carga estática y permite modificar la prensa para aplicar cargas dinámicas en función del tipo de estudio que se realice.
- ✦ El procedimiento se usa tanto para probetas fabricadas en laboratorio como para las extraídas del pavimento.

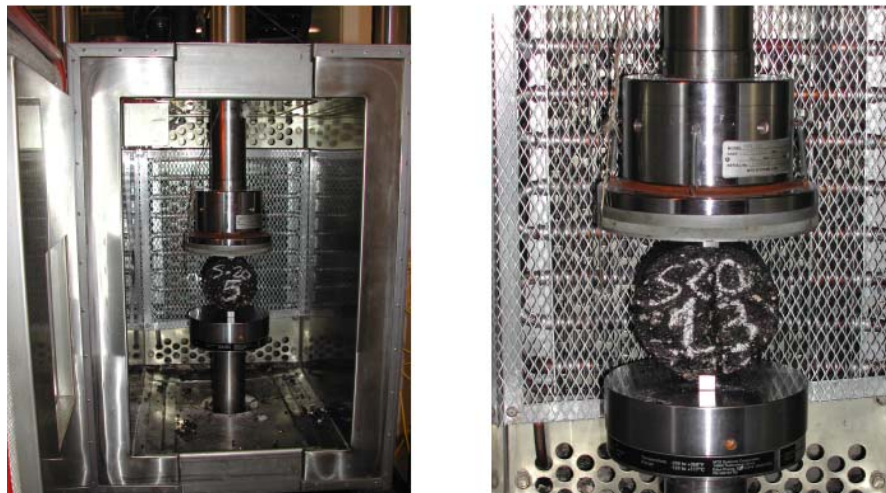


FIGURA 38 Realización del ensayo de tracción indirecta en la prensa M.T.S.

3.5 ENSAYOS EMPÍRICOS

3.5.1 Ensayo Marshall

El concepto del ensayo Marshall fue desarrollado por Bruce Marshall. El propósito de este ensayo es medir la fuerza de una mezcla asfáltica que ha sido compactada con un compactador estándar de laboratorio. Este ensayo también es usado como parte del procedimiento Marshall de diseño de mezclas para optimizar el contenido de asfalto de diseño, y en el control de calidad de las mezclas.

Se determinan dos propiedades en el ensayo: la carga máxima que el espécimen soportará antes de la falla, conocida como la estabilidad Marshall, y la cantidad de deformación en el espécimen antes de que falle, conocida como flujo Marshall. Muchas mezclas tienen valores de estabilidad que son dos o tres veces el mínimo especificado, pero exceden el valor máximo de flujo. Una propiedad más adecuada que se usa algunas veces para caracterizar las mezclas asfálticas es el valor de rigidez empírico, usado por algunos ingenieros para evaluar la fuerza de la mezcla. Un alto valor de estabilidad, dividido por el flujo indica una mezcla rígida y por consiguiente, la mezcla será más resistente a la deformación permanente. El flujo Marshall indica cuándo la mezcla está sobreasfaltada, altos valores de flujo indican excesivo contenido de ligante asfáltico.

3.5.1.1 Modo de prueba

El ensayo Marshall consiste en la fabricación de un espécimen de 63.5 mm. (2.5 pulg.) de alto por 101.6 mm. (4 pulg.) de diámetro, con el uso de un martillo de compactación estándar y un molde cilíndrico. El espécimen compactado se ensaya para medir su resistencia a la deformación a 60° C, y a un ritmo de carga constante de 50 mm/min, en el equipo mostrado en la figura 46.

La cabeza de carga confina la mayoría, pero no toda la circunferencia del espécimen, mientras que las caras superior e inferior de la muestra no están confinadas, por ello, la distribución de esfuerzo en la muestra durante el ensayo, es extremadamente compleja.



FIGURA 39 Dispositivo para ensayo Marshall

3.5.1.2 Limitaciones

- ✦ Los efectos de los límites de la superficie del espécimen están amplificados y la asunción de que se aplica una carga uniforme a lo largo del espécimen no es válida.
- ✦ Los investigadores de la Universidad de Nottingham encontraron, que comparado con los ensayos triaxiales de carga repetida, el ensayo Marshall es una medida pobre de la resistencia a la deformación permanente y puede no estar en capacidad de clasificar las mezclas dependiendo de su resistencia al rutting.

3.5.2 Ensayo Hveem

El procedimiento de ensayo Hveem, y sus aplicaciones han sido desarrolladas a través de extensivas investigaciones y estudios de correlación sobre pavimentos de autopistas.

El ensayo del estabilómetro ha sido desarrollado como una medida empírica de la fricción interna dentro de una mezcla. Sin embargo, la fuerza o estabilidad de la mezcla asfáltica involucra tanto la cohesión y como la fricción interna, por ello, se usa el cohesiómetro, como acompañante del ensayo Hveem, el cual mide las características de cohesión.

De manera similar al valor de flujo Marshall, la estabilidad Hveem, provee una indicación de cuándo una mezcla esta sobre-asfaltada (bajos valores de estabilidad indican contenido excesivo de ligante asfáltico)

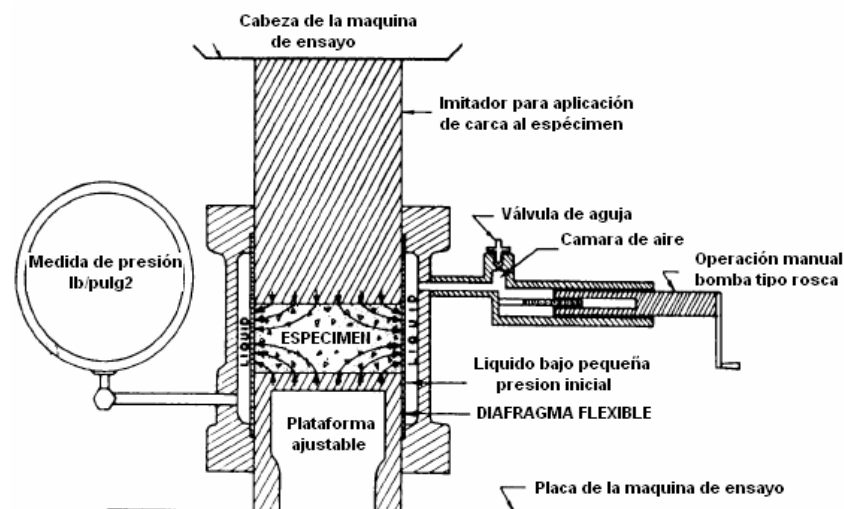


FIGURA 40 Esquema que muestra las principales características del Estabilómetro Hveem

3.5.2.1 Modo de prueba

El método Hveem usa especímenes estándar con un diámetro de 101.6 mm (4 pulg.) por 63.5 mm (2.5 pulg.) de alto. Estas mezclas son preparadas usando un procedimiento específico para calentamiento, mezclado y compactado de la mezcla de agregado-asfalto. Normalmente se usa el compactador de amasado de California para la preparación de los especímenes.

El estabilómetro Hveem, mostrado en la figura 40, es un dispositivo de ensayo triaxial, que consiste de un mango de caucho dentro de un cilindro metálico, conteniendo un líquido que registra la presión horizontal desarrollada por un espécimen compactado, como la carga vertical que es aplicada. Para el ensayo de estabilidad, la muestra se mantiene en un molde a 60° C de temperatura.

3.5.2.2 Ventajas

Los valores del estabilómetro son buenos indicadores de las características del agregado en la mezcla.

3.5.2.3 Limitaciones

- ✦ Los valores del estabilómetro son relativamente insensibles a las características del cemento asfáltico.
- ✦ No debe ser considerado para ensayos de desempeño de las mezclas ya que o tiene una cantidad significativa de datos que correlacionen al ensayo con el comportamiento real.
- ✦ Ha sido reemplazado por el Superpave

3.5.3 Máquina de ensayo giratoria (GTM)

La máquina de ensayo giratoria del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, es una combinación de compactador y máquina de ensayo de cortante simple para sólidos, agregados no confinados y mezclas asfálticas. Esta aplica un esfuerzo igual al aplicado por una llanta de camión sobre el pavimento mientras monitorea la deflexión cortante en el material. Los datos son usados para el diseño de mezclas y la evaluación de la susceptibilidad al **rutting**.

El procedimiento del ensayo de la GTM es relativamente simple, no requiere de mucho tiempo, provee información relacionando el efecto de la humedad e identificando las características de degradación por un análisis completo de gradación. Este mecanismo permite determinar el índice de estabilidad giratorio (GSI), que es una medida de la plasticidad (perdida de estabilidad) durante la densificación.

El contenido óptimo de asfalto se identifica independientemente del criterio de vacíos por medio de medidas del ángulo de flotación. Determina el módulo giratorio estático cortante y el módulo de compresión, además determina el módulo resiliente del espécimen para elevadas temperaturas.

3.5.3.1 Modo de prueba

La máquina está ajustada para el uso de especímenes cilíndricos de las mezclas. Se selecciona la carga vertical deseada, de acuerdo a la presión máxima de contacto del neumático, y el grado de deflexión cortante (ángulo giratorio). Luego la muestra es colocada en el molde, y éste es sujetado en una cuña. Los rodillos superiores e inferiores se mueven alrededor del borde de la cuña para transmitir un movimiento de amasado giratorio al espécimen, basado en un ángulo entre los rodillos de 0° a 3° , dependiendo de la preferencia del usuario.

Mientras esta máquina induce un ángulo ajustado manualmente, el ángulo desarrollado por el molde de cuña flotante varía dependiendo de la calidad de la mezcla. La magnitud del ángulo de flotación es debida a la dilatación del material durante el proceso de momento cortante y representa la deflexión axial, entre más débil sea la mezcla, más grande será el ángulo de flotación.



FIGURA 41 Máquina de ensayo giratoria (GTM)

Al mismo tiempo, la presión del rodillo medida, disminuye como un indicador de la fuerza cortante disminuida. Cuando los vacíos están sobrellenados debido a excesiva densificación o excesiva cantidad de asfalto en la mezcla, el ángulo flotante se incrementa (excesiva plasticidad) y la presión del rodillo disminuye (fuerza cortante reducida).

El límite superior de contenido de asfalto para un esfuerzo de diseño seleccionado (presión vertical) se determina como el contenido en la mezcla para el momento en el que el ángulo de flotación comienza a incrementarse.

Se pueden usar diámetros de especímenes de 4, 6 u 8 pulgadas, la máquina incluye un sistema de carga hidráulica con un control automático ajustable de presión vertical, un mecanismo giratorio de ángulo ajustable, transductores para medir el ángulo de flotación giratorio, altura del espécimen, presión vertical, presión del rodillo y revoluciones.

Las opciones del ensayo incluyen compactación hasta el equilibrio, densidad específica o número de revoluciones especificado por el usuario.

3.5.3.2 Ventajas

- ⊕ Puede ajustarse para simular las presiones de llanta para cualquier tipo de tráfico, incluyendo carros, camiones y aviones.
- ⊕ Permite monitorear el cambio en la respuesta de la mezcla con la densificación.
- ⊕ Establece la unidad de compactación requerida para compactar hasta el equilibrio bajo un esfuerzo vertical de diseño, eliminando la necesidad de correlaciones empíricas de un número de ciclos de carga para duplicar la densidad última en campo.

3.5.3.3 Limitaciones

- ⊕ El procedimiento no está listo para una adopción inmediata.

3.5.4 NAT: Nottingham Asphalt Tester

El equipo Nottingham Asphalt Tester fue diseñado para evaluar las propiedades mecánicas de materiales asfálticos para pavimentos (figura 42); esta máquina permite la realización de nuevos diseños de mezcla, la caracterización de nuevos materiales, la valoración de pavimentos en servicio, y el control de calidad, entre otras aplicaciones.

3.5.4.1 Modo de prueba

El equipo consta de un marco de carga, un sistema hidráulico, un sistema de adquisición de datos con panel de control, transductores y una cámara de temperatura controlada. Este marco servo-hidráulico facilita la realización de las

pruebas con muestras elaboradas en laboratorio o directamente de la vía (núcleos).

El marco de carga consta de una placa base, una cabeza móvil en acero inoxidable que soporta al cilindro pistón y en el movimiento, genera deflexiones mínimas; un cilindro pistón hidráulico para la aplicación de cargas verticales de 0 a 10 kN, con frecuencias hasta de 50 Hz, y con una exactitud de 0.001 kN, además cuenta con un LVDT (transductor de desplazamiento) fijado en la parte superior del móvil. La celda de carga junto a los transductores de desplazamiento LVDT presentan los valores de esfuerzo aplicado y deformación obtenida.



FIGURA 42 Equipo NAT

La cámara de temperatura controlada (CRT) puede establecer temperaturas en el rango de -10° a 60° C, con una fluctuación en la temperatura dentro de la cabina de $\pm 0.2^{\circ}$ C, y una unidad de cambio de 0.5° C.

Entre los ensayos que se pueden realizar en el equipo N.A.T. está:

Resistencia a la deformación permanente bajo carga sostenida: El objetivo es determinar las características de deformación la mezcla asfáltica con aplicaciones de carga en la muestra preparada en laboratorio o de núcleos tomados en campo con dimensiones de 98 ó 148 mm. de diámetro y una altura de 60 mm. El esfuerzo de compresión axial que se le aplica a la muestra es de 100 ± 2 kPa, la aplicación de la carga a la muestra es de forma constante después de realizada una precarga, y la temperatura en todo el proceso es de 20° C.

Resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida: Determina las características de deformación de la mezcla asfáltica, para muestras cilíndricas preparadas en laboratorio o núcleos tomados en campo, con diámetros de 98 o 148 mm. y una altura de 60 mm. El esfuerzo de compresión axial es de 100 ± 2 kPa, hasta que se apliquen un número N de repeticiones de carga establecidas.

3.5.4.2 Ventajas

- ✦ Permite la evaluación de muestras preparadas en laboratorio o extraídas en campo.
- ✦ Capacidad para realizar diferentes procedimientos de caracterización de mezclas asfálticas.

3.5.4.3 Limitaciones

- ✦ Si los transductores, en especial los LVDT, no cuentan con la adecuada sensibilidad y exactitud, no se obtienen resultados confiables.
- ✦ En los ensayos dinámicos, la repetición de las cargas en el mismo punto de aplicación y sus magnitudes constantes son suposiciones que no se presentan en el comportamiento real de un pavimento.

3.6 ENSAYOS DE SIMULACIÓN

Todos los métodos propuestos para la estimación de las deformaciones permanentes requieren la posterior validación con prueba de pista, una completa validación mecánica debe incluir la determinación del correcto perfil de deformación plástica que se pueda presentar. Para propósitos de diseño, la simulación en laboratorio del rutting debe duplicar las condiciones de esfuerzos que se presentan en los pavimentos reales.

El mayor avance de los estudios de este tipo es que ellos son representativos de la respuesta del pavimento bajo patrones de tráfico real y condiciones ambientales, pero su desventaja es la naturaleza de la confusión de los elementos incontrolables que pueden afectar el experimento y complicar su interpretación.

También se han desarrollado instalaciones circulares a escala real que son muy útiles para el estudio de la fatiga, pero generan algunas preocupaciones acerca de su eficacia para estudiar el comportamiento real de las deformaciones permanentes bajo las condiciones de tráfico, a causa de las diferencias entre el estado de esfuerzo impuesto por la llanta en su trayectoria circular de carga en comparación con el estado que se presentaría por las llantas siguiendo una trayectoria recta.

3.6.1 Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)

El analizador de pavimentos asfálticos es una modificación del Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT). Mediante el ensayo de rueda cargada en el APA, es posible realizar la evaluación de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la deformación permanente.

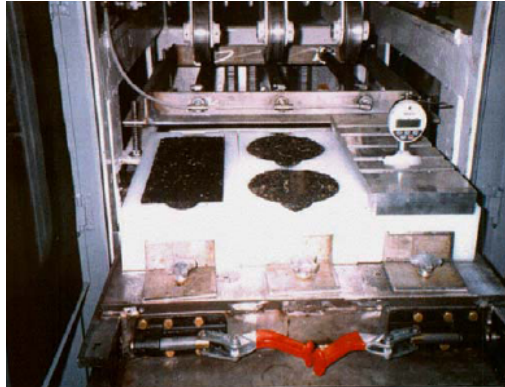


FIGURA 43 Analizador de Pavimentos Asfálticos (A.P.A.)

La evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente de las mezclas asfálticas se puede determinar tanto en especímenes rectangulares como en cilíndricos, mediante cargas repetidas aplicadas con ruedas y midiendo la profundidad de la huella que deja la rueda. El APA cuenta con un sistema de adquisición de datos automatizado.

3.6.1.1 Modo de prueba

Previamente al ensayo, se acondicionan las probetas en el horno a la temperatura de prueba (64° C) por un espacio de 6 h, para ello se introduce la temperatura en el panel de control principal del equipo, seguido de esto, se lleva a cabo la calibración de las ruedas del A.P.A. mediante una celda de carga, a fin de asegurar que cada rueda aplique una fuerza de 100 lb. durante el desarrollo de la prueba.

En el panel de control del ensayo de deformación permanente se especifica el tipo de probeta (viga o moldes cilíndricos); número de ciclos; presión de las mangueras; posición de los medidores de deformación (LVDT), entre otros parámetros. La prueba se ejecuta a 8000 ciclos, con una presión de aire en las mangueras de 100 lb/pulg². Una vez que el equipo ha alcanzado los 64° C, se retiran las probetas del horno y se colocan dentro de los moldes de plástico,

mismos que se introducen en el A.P.A., de tal forma que queden centrados por debajo de cada rueda (figura 44 izquierda).



FIGURA 44 Evaluación de la deformación permanente en el A.P.A.

La prueba termina una vez se completan los 8 000 ciclos, la figura 51 derecha, muestra la apariencia de las probetas después del ensayo de deformación permanente en el Analizador de Pavimentos Asfálticos.

3.6.1.2 Ventajas

- ✦ Cada espécimen puede estar sujeto a un diferente nivel de carga.
- ✦ Las partes de la rueda de carga y la presión de inflado son representativas de las condiciones actuales en campo.
- ✦ Pueden probarse seis cilindros a la vez bajo temperaturas controlables, tanto en condición seca como en húmeda.
- ✦ Este ensayo tiene el potencial de ser adoptado rápidamente como prueba de desempeño.

3.6.2 Ensayo de roderas Francés

Ensayo de pista realizado mediante el dispositivo LCPC: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, para la medición de las huellas creadas por el paso repetido de una llanta sobre una muestra de pavimento.

La máquina ensaya dos muestras a la vez usando dos llantas simultáneas, la carga de llanta en las dos placas debe ser igual para evitar presiones asimétricas

en el armazón de la llanta. Sin embargo, las dos placas no tienen que ser réplicas exactas, de hecho, se recomienda ensayar mezclas diferentes para calcular las variables asociadas con la variación sobre el tiempo. Cuando se van a ensayar placas con las mismas características, se hace en tiempos diferentes, usando ambos lados de la máquina.

La susceptibilidad al rutting se basa en el criterio de rodada/falla. Esta máquina es usada en Francia para evaluar las mezclas que no tienen ninguna historia de desempeño o que serán sujetas a tráfico pesado, y en la actualidad ha comenzado a usarse en Los Estados Unidos.



FIGURA 45 Máquina de ensayo LCPC

3.6.2.1 Modo de prueba

La susceptibilidad al rutting se mide usando una llanta neumática de caucho con presiones de inflado de 0.6 ± 0.03 MPa. La llanta pasa sobre el centro del espécimen dos veces por segundo y el tiempo de carga en dicho punto es aproximadamente 0.1 segundos.

Las placas del espécimen de pavimento tienen una longitud de 500 mm por 180 mm de ancho y un grosor de 50 ó 100 mm, pueden ser ensayadas a temperaturas desde los 30° a 70° C, a una velocidad de 194.44 cm/sg. (67 ciclos por minuto). También se pueden ensayar muestras con grosores entre 20 y 100 mm, fabricando un molde para tamaños no estandarizados, o colocando la placa sobre yeso o placas de acero. Se pueden ensayar mezclas preparadas y compactadas en laboratorio o pequeños especímenes cortados de pavimentos reales, pero éstos últimos deben ser cortados de manera que quepan dentro del molde para que se ajusten al equipo, asegurándolos de alguna forma, puede ser con yeso. La base y los lados del molde que sostienen a la placa son de acero rígido, además

la placa debe estar compactada al menos con dos o tres niveles de vacíos; luego de la compactación, la placa es envejecida en un cuarto a temperatura por 7 días.

Los gatos hidráulicos situados debajo de las placas, las empujan hacia arriba creando de esta forma la carga, la carga estándar es de 5000+/- 50 N, y la máxima carga que se puede aplicar es de 5500 N; la presión se gradúa en el panel de control de la máquina para una presión dada en cada gato hidráulico, calibrándolas en incrementos de 0.1 MPa por medio de una celda de carga.

Finalizado el ensayo, se calcula la deformación, definida como la media de 15 mediciones de profundidad de huella, medidas en cinco hileras paralelas a lo largo, y tres hileras distribuidas a lo ancho de la muestra.

La deformación plástica es medida por un porcentaje relativo de reducción en el espesor de la muestra en el trayecto de la rueda, el ensayo es terminado después de 10^5 ciclos a menos que la profundidad de la rodera exceda el 15% antes de llegar a este número de ciclos. Generalmente, se miden las profundidades de huella para los 30, 100, 300, 1.000, 3.000 y 100.000 ciclos de la prueba; el rango de temperatura en el que se realiza el ensayo varía entre los 50° C y los 60° C, buscando representar las condiciones mas desfavorables esperadas.

Cuando se ensayan placas de 50 mm, de acuerdo a las especificaciones francesas, la mezcla es aceptable si el porcentaje de profundidad de huella promedio para 1000 y 3000 ciclos es menor o igual que 10 y 20% respectivamente. Cuando se ensaya la placa de 100 mm, el porcentaje promedio de profundidad de rodera luego de 30.000 ciclos debe ser menor o igual al 10%.



FIGURA 46 Acercamiento de la llanta y la placa en el ensayo de rodera francés

3.6.2.2 Ventajas

- ✦ Es un ensayo que permite prevenir daños por ahuellamiento en la mezcla

3.6.2.3 Limitaciones

- ✦ El método no es válido para mezclas con tamaño máximo nominal de agregados mayor a 20mm.
- ✦ Se presentan estados de esfuerzo complejos y desconocidos en la placa que limitan su aplicación.
- ✦ Los datos obtenidos de este ensayo no se pueden usar en análisis mecanicistas de pavimentos y tampoco para determinar los módulos de la mezcla o los coeficientes de la capa usados por la AASHTO en sus procedimientos de diseño.

3.6.3 Dispositivo de ensayo de pista del Laboratorio de la Universidad Purdue

Este ensayo de rueda cargada se desarrolló en la Universidad de Purdue, y presenta similitud con el ensayo de Hamburgo, ya que permite determinar el ahuellamiento potencial y sensibilidad a la acción de la humedad.

3.6.3.1 Modo de prueba

Este dispositivo aplica una presión de 620 kPa sobre la muestra, ya sea extraída de campo o preparada en laboratorio, con una velocidad de 33.2 cm/sg, a través de una rueda neumática inflada a una presión de 793 kPa. Para los especímenes fabricados en laboratorio, las dimensiones son de 50 cm de longitud, 18 cm de ancho y 1 a 5 cm de espesor; las muestras de núcleos extraídos de campo son rectangulares, de 29 cm x 31 cm, y su espesor está en función del tipo de mezcla que se esté ensayando: superficiales, 3.8 cm; mezclas de base, 5.1 cm; y mezclas asfálticas gruesas para base, 7.6 cm. Estas se compactan por medios de compactación lineales, con contenidos de vacíos entre 6 y 8%.

El ensayo se realiza hasta los 20000 pases de ida y vuelta, o hasta que se presenten 2 cm de ahuellamiento. Finalizado el ensayo, se procede a obtener el coeficiente de humedad, definido como la relación entre el número de ciclos para los que se alcanza una huella de 1.27 cm. (este valor define un límite entre el buen y mal comportamiento frente a la humedad) en condiciones secas y el correspondiente para condiciones húmedas.



FIGURA 47 Máquina de ensayo, Laboratorio de la Universidad Purdue

3.6.3.2 Ventajas

- ✦ El ensayo se puede realizar para condiciones secas o húmedas.
- ✦ Puede adaptarse una rueda móvil, con la cual que simular un movimiento en sentido transversal en el ancho de la muestra.

3.6.4 Modelo móvil de simulación de carga

El modelo móvil de simulación de carga (M.M.L.S.) se desarrolló recientemente en Sudáfrica y puede evaluar el desempeño del pavimento en términos de rutting, en laboratorio o en campo bajo varias condiciones ambientales y de edad.

3.6.4.1 Modo de prueba

El MMLS consiste de cuatro ejes, cada uno con una llanta neumática de 300 mm de diámetro, circulando en un circuito cerrado vertical. Las llantas están soportadas en carretillas que se encuentran unidas por una cadena continua. Un motor eléctrico se usa para rotar el cilindro móvil, el cual arrastra las llantas del ensayo a través del pavimento. Los neumáticos pueden desplazarse lateralmente ± 80 mm. alrededor del eje central, haciendo a la trayectoria de la llanta de 240 mm. de ancho.

La velocidad nominal de la rueda es de 2.5 m/s, que equivale a la aplicación de 7200 cargas de rueda por hora, pero si se desea, se pueden seleccionar velocidades más lentas. La temperatura aplicada varía según la condición del ensayo: 50° C y 60° C para condiciones secas, y 30° C para condición húmeda.

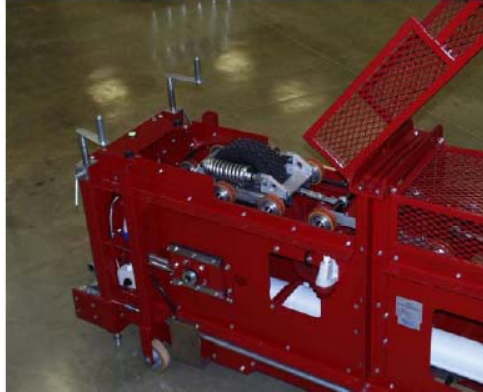


FIGURA 48 Modelo móvil de simulación de carga

Los valores medidos en el ensayo son los de profundidad de huella en los perfiles transversales, los cuales se utilizan para determinar el Módulo de Análisis Sísmico de Onda de Superficie, el cual permite evaluar el ahuellamiento o daños producidos por agrietamiento o humedad.

Los datos de salida del ensayo aparecen como el perfil mostrado en la figura 49.

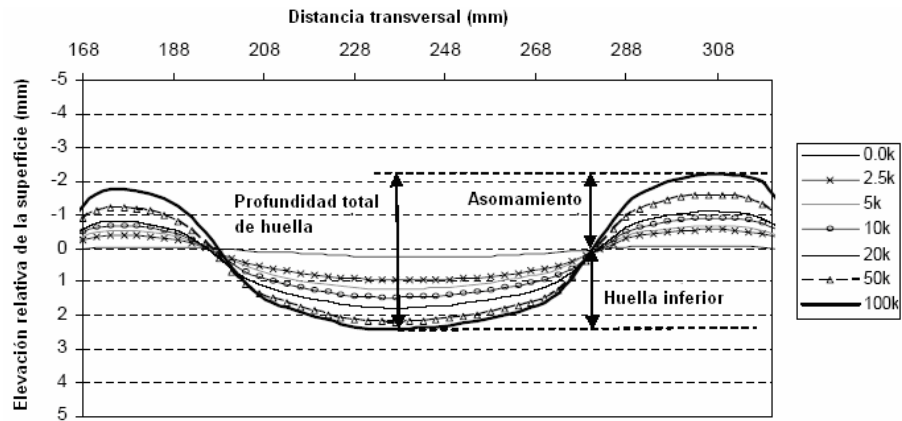


FIGURA 49 Datos de salida típicos de las lecturas del perfilómetro

3.6.4.2 Ventajas

- Las aplicaciones del dispositivo incluyen ensayos en campo, ensayos en laboratorio, muestras extraídas de campo, especímenes cilíndricos

preparados en laboratorio, placas de prueba preparadas en laboratorio o perfiles de pavimentos preparados en laboratorio.

- ✦ Posibilidad de realizar el ensayo en seco o en condiciones húmedas.
- ✦ Si el ensayo no se realiza a temperatura ambiente, ésta puede controlarse dentro de un rango de -5° a 60° C.

3.6.5 Wessex Dry Wheel Tracker

El mecanismo de pista Dry Wheel Tracker, fue diseñado por la Wessex Engineering Ltd. del Reino Unido. Wessex ha sido el principal constructor de máquinas de ensayos de pista en Inglaterra por los últimos 25 años. La más reciente máquina computarizada provee un ensayo totalmente automatizado con cálculos automáticos de las ratas de **rutting**.



FIGURA 50 Dispositivo Wessex para ensayo de pista

Este dispositivo determina deformaciones plásticas en mezclas asfálticas bajo temperaturas y presiones similares a las presentes en las vías en uso, el ensayo puede realizarse durante la construcción del camino o para el diseño de los materiales.

3.6.5.1 Modo de prueba

En esta máquina, una rueda cargada se corre sobre una muestra de pavimento en una cabina aislada y sellada, por 45 minutos. El dispositivo aplica una fuerza vertical de 710 N en la superficie de contacto, a través de una rueda de acero de 150 mm. de ancho cubierta con un caucho de 12.5 mm. de grueso. Además, tiene la posibilidad de un ensamblaje de doble rueda para acomodarse a ensayos de dos especímenes simultáneos.

Los especímenes pueden ser muestras extraídas del campo o fabricados en laboratorio (placas), con un grosor mayor a los 80 mm., y de 200 mm. de diámetro, si son especímenes cilíndricos, o 305 mm. de lado para las placas rectangulares.

La interfase del computador permite al usuario graficar la profundidad de huella versus tiempo mediante la instrumentación de los desplazamientos sobre cada rueda cargada.

La rata de carga es de 26 ciclos por minuto, que corresponde a 52 pasadas del neumático por minuto. Como generalmente la altura del espécimen varía +/- 5 mm., se usa yeso para llenar los pequeños vacíos debajo de cada muestra y proveer una base uniforme, luego que han sido instalados los especímenes.

3.6.5.2 Ventajas

- ✦ Ofrece un método simple y económico para la predicción del rutting.
- ✦ Posibilidad de disponer además de un dispositivo de inmersión y un compactador de placas.
- ✦ Permite el ensayo de muestras cilíndricas o rectangulares.

3.6.5.3 Limitaciones

- ✦ Sólo se pueden aplicar temperaturas mayores a los 75° C, lo que restringe los datos obtenidos del ensayo.

CAPITULO IV

MODELOS, METODOLOGÍAS Y PROGRAMAS PARA LA PREDICCIÓN DEL RUTTING EN PAVIMENTOS

Recientemente, el gran desarrollo en la computación ha permitido que muchas teorías de análisis puedan aplicarse a las condiciones prácticas. Esta aplicación se efectúa mediante el uso de nomogramas, ecuaciones de diseño o catálogos de estructuras. Además, gracias al amplio uso de la computadora, existe la tendencia a utilizarlas directamente en los nuevos métodos de diseño, con diversas modalidades, como análisis estructural empleando sistemas de capas múltiples o mediante elementos finitos. De esta manera, se utilizan con mayor frecuencia, los modelos de simulación para el diseño de pavimentos.

4.1 METODOS DE DISEÑO

Los métodos de diseño para pavimentos flexibles se pueden clasificar de una manera general en cinco categorías, como se indica en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Clasificación de los métodos de diseño para pavimentos flexibles

Método	Diseño en función de ...	Limitaciones
Empírico	Tipo de suelo (granulometría y plasticidad) y un índice de resistencia. Ejm, el VRS	Todas las desventajas de la correlación experimental.
Equilibrio límite	La resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.	Los pavimentos fallan primero por pérdida de funcionalidad.
Deflexión límite	La deflexión permisible en la superficie del pavimento.	Los pavimentos fallan por esfuerzos y deformaciones excesivos, y no necesariamente por deflexiones excesivas.
Regresión	Resultados obtenidos en tramos de prueba.	Sólo aplicable para las condiciones de prueba.
Mecanicistas	La mecánica de los materiales que conforman el pavimento y módulo de resiliencia.	Necesita una calibración en función del comportamiento real observado. Asume las hipótesis de las teorías de elasticidad y viscoelasticidad.

La mayoría de los Métodos Empíricos independizan el cálculo del espesor de la capa inferior del pavimento (normalmente subbase granular) del resto, fijando éste y las características de la subbase en función de la capacidad soporte de la subrasante. Los espesores de la capa de base y la capa asfáltica se definen en función del tránsito.

Por otra parte, los Métodos de Deflexión Límite y Equilibrio Límite, son diseños que limitan la deflexión o el esfuerzo, respectivamente, basados en la asunción que si la deflexión o esfuerzo vertical máximo por compresión, en la superficie de la subrasante, es menor que un valor crítico entonces la deformación permanente se limitará a un nivel tolerable para un número de aplicaciones de carga específico. Lamentablemente dichas metodologías no impedirían que el rutting pudiera ocurrir en la capa asfáltica.

Un alto número de procedimientos incluían un criterio en el que se limitaban los valores de deflexión en la subrasante a niveles que impidieran las deformaciones permanentes en la superficie del pavimento. Ejemplos de este método son el procedimiento Shell (Claessen, 1977), el procedimiento del Instituto del Asfalto de Los Estados Unidos (Shook, 1982) y la metodología del estado de Kentucky (Southgate, 1977). Algunos recomendaban la limitación de los esfuerzos verticales en la subrasante, por encima de las deflexiones, como la metodología propuesta por Barksdale y Miller en 1977; por otro lado también estaban los que utilizaron bases estadísticas para la formulación de ecuaciones de predicción del rutting, por ejemplo, Saraf (1976) presento una ecuación que incorporaba la suma de deflexiones en la superficie con base en un análisis elástico de capas.

Los Procedimientos Mecanicistas están basados en la suposición de que un pavimento puede ser modelado como una estructura multicapa elástica o viscoelástica sobre una cimentación elástica o viscoelástica. Suponiendo que los pavimentos pueden ser modelados de esta manera, es posible calcular los esfuerzos, deformaciones o deflexiones debidas al tránsito en cualquier punto del pavimento. En estos métodos, la caracterización de los materiales que conforman las capas de un pavimento se realiza tomando como propiedad básica a parámetros como el módulo resiliente, el valor relativo de soporte (VRS) o valor de resistencia (R).

Actualmente, en los métodos mecanicistas se utilizan principalmente dos criterios de falla: por fatiga y por deformaciones permanentes; éstos son analizados por separado al llevar a cabo el diseño, criterios que pronostican el deterioro del pavimento en función del tránsito y/o del ambiente.

4.2 MODELOS MATEMÁTICOS

La necesidad de desarrollar metodologías para estimar el ahuellamiento en un pavimento en servicio conduce a vincular el cálculo de esfuerzos y deformaciones en las distintas capas de la estructura con modelos de comportamiento de la deformación permanente o la velocidad de desarrollo de ésta en función del estado de esfuerzos, número de repeticiones de carga, temperatura y propiedades del material.

El cálculo de los esfuerzos y deformaciones en distintos puntos de la estructura del pavimento puede ser ejecutado mediante procedimientos elásticos o viscoelásticos. Más recientemente, el uso de elementos finitos ha posibilitado introducir consideraciones respecto al efecto localizado en la interfase neumático-calzada.

La tabla 4.2 resume algunos de los modelos, propuestos por diversos autores, para determinar la respuesta del pavimento junto con ecuaciones de deformación permanente.

Estos modelos representativos del comportamiento de las deformaciones plásticas en las mezclas asfálticas se pueden clasificar en tres categorías:

- 1) Ecuaciones empíricas de regresión
- 2) Leyes “típicas” de deformaciones plásticas
- 3) Ecuaciones funcionales basadas directamente de resultados en ensayos de laboratorio.

4.2.1 Procedimiento capa-deflexión (layer-strain)

El principio general de este método fue propuesto por Barksdale y Romain en 1972, el procedimiento hace uso de un sistema de análisis elástico de capas y representa uno dentro del gran número de métodos denominados *metodologías predictivas capa-deflexión*.

Este método consiste en predecir las profundidades de huella usando características de deformación permanente determinadas por ensayos de laboratorio junto con un procedimiento de análisis para la estructura del pavimento basado en la teoría elástica lineal o no lineal.

Para predecir la cantidad de deformación permanente que puede ocurrir luego de un número dado de aplicaciones de carga, cada capa de la estructura del pavimento es dividida en varias subcapas, y el estado de esfuerzo es calculado mediante análisis elástico, en el centro de cada una de dichas subcapas

Tabla 4.2 Resumen de los modelos y ecuaciones utilizados para la determinación de deformaciones permanentes

AUTOR	ANÁLISIS DEL PAVIMENTO	ECUACION DE DEFORMACION PERMANENTE	VARIABLES	ENSAYO DE LABORATORIO	OBSERVACIONES
Kirwan Saith Glynn	DEFFPAV Método layer-strain Teoría no lineal de elementos finitos	$\varepsilon_n = A\Delta^b$	ε_n = def. permanente axial inducida después del tiempo N A = función del material y tiempo transcurrido b = Constante para el material Δ = esfuerzo de compresión axial aplicado	Ensayo Uniaxial dinámico de compresión con carga estática	Valores de rutting más altos que los del ensayo de Nottingham
Monismith Inkabi McLean	ELSYM Teoría elástica de capas Método layer-strain	$\varepsilon_z^p = [\delta(T)N^\alpha \bar{\sigma}^{n-1}t]^*$ $\left[\sigma_z - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \right]$	ε_z^p = def. permanente vertical $\delta(T)$ = función de la temperatura α = coeficiente determinado experimentalmente N = número de repeticiones del esfuerzo $\bar{\sigma}$ = esfuerzo equivalente en función de $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. t = tiempo de carga	Ensayo triaxial de compresión con carga repetida	Considera los ejes de carga y las distribuciones laterales
Brown Bell	Programa DEFFPAV T. no lineal de elementos finitos Método layer-strain	$\varepsilon_p = \left(\frac{q}{a} \right)^b (N)$	ε_p = Deformación per. a cortante q = desviación de esfuerzos a, b = constantes N = número de aplicaciones de carga	Ensayo axial de carga repetida	Similitud relativam. buena con los ensayos de pista

Tabla 4.2 Resumen de los modelos y ecuaciones utilizados para la determinación de deformaciones permanentes

Meyer Haas	Program FEPAVE II Elementos finitos Método layer-strain	$\varepsilon_p = F(\sigma_1, \sigma_3, T, AV, N) \pm E$	ε_p = deformación permanente axial σ_1 = esfuerzo vertical σ_3 = esfuerzo lateral T = temperatura AV = vacío de aire N = numero de aplicaciones de carga E = estimación de error	Ensayo triaxial de carga repetida	Similitud con los valores medidos en el Brampton Test Road
Van de Loo	BISAR Teoría elástica de capa	$\varepsilon_p = c\sigma N^a$	ε_p = deformación permanente axial c = constante σ = nivel de esfuerzo axial (15 PSI) N = numero de aplicaciones de carga a = constante	Ensayo axial estático	Base del método SHELL, sobreestima la profundidad de huella
Kenis	VESYS Solución probabilística lineal viscoelastica	$\varepsilon_p(N) = e\mu N^{-\alpha}$	$\varepsilon_p(N)$ = def. permanente por pulso $\alpha = 1-S$ S = pendiente de la línea en la grafica Log (def. perm.) contra Log (N) e = tensión máxima de la carga para un pulso de duración d=0.1 seg $\mu = IS/E$ I = intercepción	Ensayo uniaxial de carga repetida	Base del enfoque VESYS

Tabla 4.2 Resumen de los modelos y ecuaciones utilizados para la determinación de deformaciones permanentes

<p>Fracken</p>		$\varepsilon_p(t) = At^B + C(\exp Dt - 1)$ <p><i>esfuerzos altos</i></p> $\varepsilon_p(t) = At^B$ <p><i>esfuerzos bajos</i></p>	<p>$\varepsilon_p(t)$ = deformación permanente A,B,C,D = parámetros $A = 115(\sigma_1 - \sigma_3)/ E^*$ $B = 0.182 + 0.294(\sigma_{VM} - \sigma_{VL})$ σ_{VM} = esfuerzo máximo σ_{VL} = umbral de falla plástica</p>	<p>Ensayo triaxial dinámico</p>	<p>Método usado para determinar la tendencia de las mezclas al rutting</p>
<p>Verstraete Romain Veverka</p>	<p>Programa ORN093 Teoría elástica de capas Teoría layer-strain</p>	$\varepsilon_p(t) = A \left(\frac{t}{10^3} \right)^B = \frac{C(\sigma_1 - \sigma_3)}{ E^* x \left(\frac{t}{10^3} \right)^B}$	<p>$\varepsilon_p(t)$ = deformación permanente en el tiempo t (seg) A = coeficiente en función de la composición de la mezcla y condiciones experimentales (esfuerzos, frecuencia, temperatura); se caracteriza por la susceptibilidad de la mezcla al rutting. B = coeficiente que varía entre 0.14 y 0.37 $C = f(V_b/(V_b+V_v))$ E^* = modulo de la mezcla σ_1 = amplitud del esfuerzo vertical σ_3 = esfuerzo lateral</p>	<p>Ensayo triaxial dinámico</p>	<p>Aceptable correlación con la profundidad de huella medida en 16 carreteras en servicio</p>

Tabla 4.2 Resumen de los modelos y ecuaciones utilizados para la determinación de deformaciones permanentes

Huschek	BISAR Teoría elástica de capas Teoría layer-strain	$e_{irr} = c * \sigma^A$ $e_{irr}(T, \Delta t_1, t) = \frac{\sigma \Delta t_1}{[\eta(T, t)]}$ $\eta(T, t) = \frac{t^{1-A}}{(c * A)}$	e_{irr} = deformación permanente c = constante A = características de consolidación σ = nivel de esfuerzos η = viscosidad T = temperatura Δt_1 = tiempo de carga	Ensayo uniaxial estático Ensayo estático de carga cíclica	La mezcla asfáltica se representa por un elemento Maxwell
Thrower	Teoría viscoelastica Método de separación	$\dot{e}_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{2\eta} i + j$ $\dot{e}_{ij} = \frac{\sigma_m}{3x} + \frac{(9\sigma_{ij} - \sigma_m)}{18\eta}$	\dot{e}_{ij} = rata de deformación σ_{ij} = estado de los esfuerzos σ_m = esfuerzo isotrópico medio X = coeficiente de volumen de viscosidad η = coeficiente de velocidad de cortante		
Battiato	Programa MOREL Teoría viscoelastica Sistema viscoelastico incompresible de dos capas	$J(t) = J_1 t^\alpha$ $u_{ik}^{perm} = \frac{1}{\eta_g} g_{ik}(y, z)$	$J(t)$ = función de maleabilidad estática t = tiempo J_1 = parámetros estáticos de cortante α = pendiente de la línea Log $J(t)$ contra Log (tiempo) u_{ik}^{perm} = deformación permanente η_g = viscosidad cortante de los elementos Maxwell $g_{ik}(y, z)$ = función tensora	Ensayo uniaxial estático	La mezcla asfáltica es representada por un modelo Maxwell

Tabla 4.2 Resumen de los modelos y ecuaciones utilizados para la determinación de deformaciones permanentes

Mahboub Little		$\frac{\varepsilon_{vp}}{N} = a\sigma^b$	ε_{vp} / N = deformación viscoplástica acumulada por ciclo σ = máximo esfuerzo cíclico a,b = parámetros de regresión	Ensayo uniaxial estático	
Tseng Lytton		$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \exp\left[-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta\right]$	ε_a = deflexión permanente N = ciclos de carga $\varepsilon_0, \rho, \beta$ = parámetros de regresión	Ensayos de carga repetida	
Lai Anderson		$\varepsilon_{vp} = a(\sigma)t^b$	ε_{vp} = deflexión viscoplástica t = tiempo $a(\sigma) = b_1\sigma + b_2\sigma^2$ σ = esfuerzo estático b, b ₁ , b ₂ = constantes de regresión	Ensayo uniaxial estático	
Célar	ERDT/ESSO Sistema elástico de tres capas	$\ln \dot{\varepsilon} = A + B.Ln \sigma_{vm} + C.\sigma_H + D.T$	$\dot{\varepsilon}$ = rata de deformación permanente σ_{vm} = esfuerzo vertical a compresión σ_H = esfuerzo horizontal a compresión A,B,C,D = coeficientes T = temperatura	Ensayo dinámico estático	Desarrolla curvas isoestáticas

Tabla 4.2 Resumen de los modelos y ecuaciones utilizados para la determinación de deformaciones permanentes

Khedr	Modelo OSU	$\frac{\varepsilon_p}{N} = A_a N^{-m}$	<p>ε_p = deflexión permanente N = número de ciclos de carga A_a = propiedades del material en función al modulo resiliente y el esfuerzo aplicado m = parámetros del material</p>	Ensayo multi-pasos dinámico	
Uzan		$\varepsilon_p(N) = \varepsilon_r \mu N^{-\alpha}$	<p>$\varepsilon_p(N)$ = deformación permanente para la enésima repetición ε_r = deflexión resiliente N = número de repeticiones α, μ = características de los materiales basadas en los coeficientes de intercepción y pendiente.</p>	Ensayo de carga repetida	
Leahy		<p>Deformación permanente derivada de modelos de predicción estadística</p> $\varepsilon_p = f(T, \sigma_d, V_{air}, N, \eta_{asp}, P'_{Wasp})$	<p>ε_p = deformación plástica ε_r = deflexión resiliente a,b = coeficientes determinados experimentalmente, que relacionan ε_p con las repeticiones de carga N. α, μ = (VESYS) coeficientes variables de la mezcla. T = temperatura σ_d = desviación de esfuerzo V_{air} = volumen de aire η_{asp} = viscosidad del asfalto P'_{Wasp} = contenido de asfalto efectivo</p>	Ensayos axiales de carga estática y repetida	Determina el efecto en la mezcla de las variables ε_p y ε_r

directamente debajo de la carga de rueda, como se puede apreciar en la figura 51, conociendo el estado de esfuerzo promedio en el centro de cada subcapa, se puede hallar la correspondiente deflexión plástica a partir de resultados de ensayos de laboratorio.

La profundidad total de la huella para un número determinado de repeticiones de carga se obtiene por la suma de los productos de las deflexiones plásticas promedio que ocurren en el centro de cada subcapa por el espesor correspondiente para cada subcapa, es decir:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n [(\varepsilon_i^p) * (\Delta z_i)] \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde:

- Δp : Profundidad total de la huella.
- ε_i^p : Deflexión plástica promedio en la i-ésima subcapa.
- Δz_i : Grosor de la i-ésima subcapa
- n : Corresponde al número total de subcapas.

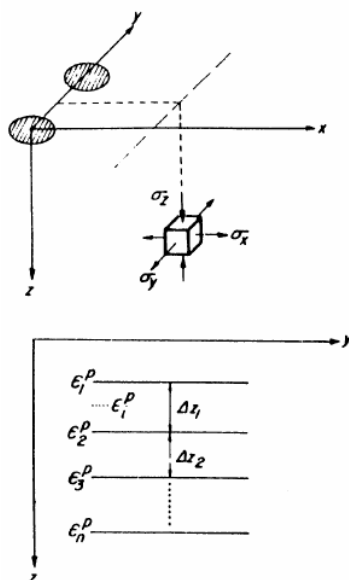


FIGURA 51 Diagrama del sistema de pavimento usado para estimar el rutting con el procedimiento capa - deflexión

Este enfoque ha sido adoptado de diversas formas por muchos investigadores y la metodología de diseño SHELL representa un ejemplo práctico del uso de este procedimiento.

Se han hecho mejoramientos a esta metodología, para ello, los procedimientos de laboratorio, además del uso de alguna forma de compresión axial, fuera estática o de carga repetida, debieron tener presente los estados de esfuerzos en los que se incluyeran componentes de cortante tales como los estados de esfuerzos presentes fuera de la línea central y que son de particular importancia cerca de los límites de la llanta.

4.2.2 Metodología visco elástica

Este enfoque considera las cargas móviles de rueda en conjunto con propiedades de los materiales dependientes del tiempo, para definir los estados de esfuerzos y deflexiones en puntos especiales en la estructura del pavimento. Un ejemplo de esta metodología ha sido incorporada en el procedimiento de diseño predictivo VESYS (Kenis, 1977).

Uno de los puntos más importantes de este proceso es que se pueden considerar directamente las cargas móviles de rueda, lo que permite una estimación mucho más correcta de la tasa de tiempo de carga que será aplicada a cada elemento del material y lleva a lograr estimar cómo será el flujo lateral plástico del material por debajo de la rueda en movimiento. Para este método se asume que las propiedades de los materiales dentro de una capa determinada son las mismas a través de toda la capa sin importar que el material este en tensión o compresión.

Inicialmente se consideró que un modelo viscoelástico no lineal sería adecuado para representar la respuesta del concreto asfáltico, pero un análisis de datos reveló que este tipo de respuesta no era suficiente para capturar el comportamiento observado, entonces, el modelo viscoelástico fue complementado con un modelo elastoplástico. El concepto del modelo se ilustra esquemáticamente en la figura 52, como se puede ver, la ley constitutiva consiste de dos componentes independientes: un componente elastoplástico independiente de la tasa y un componente viscoelástico lineal. Los dos componentes comparten la deflexión total y el esfuerzo total se obtiene por la suma de los esfuerzos de cada componente.



FIGURA 52 Concepto general de la metodología viscoelástica

4.2.2.1 Modelo viscoelástico no lineal

Se presentan dos puntos respecto a la microestructura de las mezclas del agregado asfáltico por los que se motivó el uso de relaciones viscoelásticas no lineales, el primero es la dilatación y endurecimiento bajo presión hidrostática que están asociados con los esqueletos del agregado. El segundo punto se refiere a que el comportamiento del agregado es insensible a la temperatura y a la historia de carga, es decir, no son proporcionalmente dependientes; por otra parte, el ligante asfáltico es sensible a la temperatura y a la rata de carga.

El modelo adoptado para capturar los muchos atributos de las mezclas consiste de un número tridimensional de elementos Maxwell en paralelo (figura 53), sin embargo, en vista de la naturaleza no lineal de las mezclas, se asume que cada elemento Maxwell estará compuesto de un resorte no lineal y un amortiguador de aire no lineal.

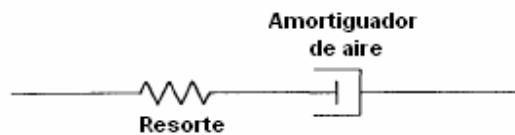


FIGURA 53 Esquema unidimensional de un elemento Maxwell

El modelo global se obtiene cuando un número de elementos Maxwell no lineales, descritos anteriormente, son ensamblados en paralelo. Donde todos los elementos comparten la misma deflexión total (ϵ) pero por otro lado ϵ^e (tensor elástico de deflexión) y ϵ^i (deflexión inelástica, viscosa) son evaluados independientemente para cada elemento Maxwell.

Esta ley constitutiva, con cualquiera de los modelos de daños, captura muchas de las características de las mezclas. Sin embargo, cuando se aplican a modelos de carga cíclica, muchas de las deflexiones se recuperan durante la descarga, por ello, para mejorar el modelo, se ha intensificado para incluir una rama elastoplástica adicional en paralelo con los elementos Maxwell.

4.2.2.2 Modelo elastoplástico

Comúnmente se ha aceptado que los materiales de los agregados pueden describirse por leyes constitutivas elastoplástica. Como ya se mencionó anteriormente, los materiales de agregados se dilatan y el módulo cortante efectivo es dependiente de la presión. Las pruebas de cortante con altura constante, realizadas con el equipo de cortante simple, sugieren que el efecto de la dilatación es elástico, ya que no se midió ninguna fuerza axial residual durante

el periodo de descarga. Por ello, se adopto un modelo elastoplástico independiente de la rata de carga, este modelo consiste de un componente elástico y del modelo clásico de plasticidad de Von Mises y de la ley de endurecimiento isotrópico y cinemática lineal.

4.3 GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO 2002

La metodología de la Guía del Diseño se basa en un enfoque del incremento de daños, éstos son estimados y acumulados para cada intervalo de análisis. El diseño y el análisis de una estructura de pavimento dada están basados en la acumulación de daño como función del tiempo y del tráfico.

Se define como unidad básica para el análisis un intervalo de un mes para realizar la estimación de daños. Sin embargo, el intervalo de análisis se reduce a quincenal durante los periodos de congelación y deshielo a causa del cambio rápido en los módulos bajo estas condiciones. Ya que como se sabe, el cambio de la temperatura y condiciones de humedad afecta directamente la respuesta del material y por consiguiente, su funcionamiento.

4.3.1.1 Deformación permanente

Un objetivo principal del subsistema de deformación permanente desarrollado en la Guía de Diseño, es asegurar que la mezcla de diseño esté ligada definitivamente al proceso de diseño estructural.

Para la Guía de Diseño, esta disponible un sistema predictivo del **rutting** para evaluar la deformación permanente dentro de todas las capas susceptibles a la huella, generalmente las capas asfálticas y todas las de material no confinado, en el pavimento dentro del periodo de análisis. Se predicen profundidades de rodera para cada capa individual en función del tiempo y repetición del tráfico. Adicionalmente, se asume que ninguna deformación permanente va a ocurrir en los materiales químicamente estabilizados, lecho de roca y placas de material PCC fracturado, dando por sentado que estos materiales no tienen contribución en la deformación permanente total del sistema de pavimento.

El daño o rutting se estima para cada subestación en la profundidad media de cada subcapa dentro del sistema del pavimento, para estimar la deformación permanente de cada subcapa individual, el sistema verifica el tipo de capa, aplica el modelo correspondiente al tipo de material de la subcapa y computa la deflexión plástica acumulada al final de cada subestación.

La deformación permanente global para una estación dada es la suma de deformación permanente para cada capa individual y se expresa matemáticamente como:

$$RD = \sum_{i=1}^{n \text{ subcapas}} \varepsilon_p^i h^i \quad \text{Ecuación 4.2}$$

donde:

RD:	Deformación permanente del pavimento.
n_{subcapas}:	Número de subcapas
ε_p^i:	Deflexión plástica total en la subcapa i
h^i:	Espesor de la subcapa i

Deformación permanente en las Mezclas Asfálticas

La relación constitutiva que se usa en la Guía para predecir el **rutting** en las mezclas asfálticas está basada en un análisis estadístico del ensayo de laboratorio de deformación permanente bajo carga repetida.

Esta forma del modelo de laboratorio seleccionado es:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = a_1 T^{a_2} N^{a_3} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

donde

ε_p:	Deflexión plástica acumulado a las N repeticiones de carga (in/in)
ε_r:	Deflexión resiliente del material asfáltico como una función de las propiedades de la mezcla, temperatura y proporción de tiempo de carga (in/in)
N:	Número de repeticiones de carga
T:	Temperatura (en grados F)
a_i:	Coefficientes de regresión No-lineales

Los factores de calibración de campo, β_{r1} , fueron necesarios para determinar el modelo final de daños de campo. El modelo nacional de calibración de campo usado en la Guía de Diseño, fue determinado por optimización numérica y otros modos de comparación, que resultaron en los factores de calibración nacional:

$$\begin{aligned} \beta_{r1} &= 0.509 \\ \beta_{r2} &= 0.9 \\ \beta_{r3} &= 1.2 \end{aligned}$$

Con esto, el modelo final queda como:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_1 * 10^{-3.4488} T^{1.5606} N^{0.479244} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

En esta ecuación se puede observar que se ha introducido un parámetro de profundidad "k₁" para proporcionar un modelo de predicción de profundidad de huella tan exacto como sea posible.

$$k_1 = (C_1 + C_2 * \text{profundidad}) * 0.328196^{\text{profundidad}} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

$$C_1 = -0.1039 * h_{ac}^2 + 2.4868 * h_{ac} - 17.342 \quad \text{Ecuación 4.6}$$

$$C_2 = 0.0172 * h_{ac}^2 - 1.7331 * h_{ac} + 27.428 \quad \text{Ecuación 4.7}$$

donde:

- k₁**: función de h_{ac} y la profundidad en el punto computacional para corregir la presión confinante a diferentes temperaturas.
h_{ac}: espesor total de las capas asfálticas (pulgadas)
profundidad: profundidad en el punto computacional (pulgadas)

Deformación permanente en materiales no confinados

El sistema inicial del modelo usado para predecir la deformación permanente en capas de materiales no confinados fue propuesta por Tseng y Lytton.

La relación básica es:

$$\delta_a(N) = \beta_1 \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^p} \varepsilon_v h \quad \text{Ecuación 4.8}$$

donde:

- δ_a**: Deformación Permanente para la capa/ subcapa (pulg).
N: Número de repeticiones del tráfico.
ε₀, β, ρ: Las propiedades de los materiales.
ε_r: Deflexión resiliente impuesta en el ensayo de laboratorio para obtener las propiedades de los materiales, enumeradas arriba, ε₀, β, ρ (pulg)
ε_v: Promedio de la deflexión resiliente vertical capa/subcapa obtenida del modelo de respuesta primario (pulg/pulg)
h: Espesor de la capa/subcapa (pulg).
β₁: Factor de calibración para los materiales granulares no confinados y de la subrasante.

Durante el desarrollo del proceso y los estudios de calibración de campo, numerosas modificaciones fueron necesarias para determinar una relación final razonable de calibración. Los cambios se enfocaron en la eliminación en el modelo del término de esfuerzo, se lograron mayores simplificaciones de las ecuaciones de “β” y “ρ”, y una combinación eventual de todos los materiales granulares no confinados y de subrasante dentro de un solo modelo.

Los modelos modificados que se desarrollaron son:

$$\log \beta = -0.61119 - 0.017638W_C \quad \text{Ecuación 4.9}$$

$$\log\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) = \frac{\left(e^{(\rho)^{\rho}} * a_1 E_r^{b_1}\right) + \left(e^{(\rho/10^9)^{\rho}} * a_9 E_r^{b_9}\right)}{2} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

$$C_0 = \ln\left[\frac{\left(a_1 E_r^{b_1}\right)}{\left(a_9 E_r^{b_9}\right)}\right] \quad \text{Ecuación 4.11}$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{C_0}{\left(1 - (10^9)^{\beta}\right)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

$$W_C = 51.712 \left[\left(\frac{E_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}} \right]^{-0.3586 * GWT^{0.1192}} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

donde:

W_C:	Contenido del Agua (%).
E_r :	Modulo resiliente de la capa/subcapa (psi).
GWT:	Profundidad del nivel freático (pies).
a₁:	0.15
b₁:	0.0
a₉:	20.0
b₉:	0.0

El modelo final de calibración para la **base granular** no confinada es:

$$\delta_a(N) = \beta_{GB} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^{\rho}} \varepsilon_v h \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Siendo el valor de calibración nacional $\beta_{GB} = 1.673$

El modelo de calibración final para todos los suelos de **subrasante** es:

$$\delta_a(N) = \beta_{SG} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^p} \varepsilon_v h \quad \text{Ecuación 4.15}$$

Con un factor de calibración nacional de $\beta_{GB} = 1.35$

Deformación Permanente en toda la Estructura del Pavimento

El **rutting** total en la estructura del pavimento es igual a la suma de las deformaciones permanentes individuales en cada capa para cada estación, puede expresarse como:

$$RD_{Total} = RD_{AC} + RD_{GB} + RD_{SG} \quad \text{Ecuación 4.16}$$

La deformación permanente en las capas asfáltica, base/subbase granular y subrasante, se definen en las ecuaciones 4.3, 4.14 y 4.15, respectivamente.

Confiabilidad de la deformación permanente

La confiabilidad del diseño se obtiene por la determinación del **rutting** predicho para el nivel de confiabilidad deseado como sigue:

$$RD_{-P} = \sum_i (RD_i) + \left(\sqrt{Se_{RDAC}^2 + Se_{RDGB}^2 + Se_{RD SG}^2} \right) * Z_P \quad \text{Ecuación 4.17}$$

donde:

- RD_{-P}** : **Rutting** predicho para el nivel de confiabilidad P (pulg).
- RD_i**: **Rutting** predicho, basado en las entradas medias (corresponde al 50% de confiabilidad) (pulg)
- Se_{RD_i}**: Error estándar del **rutting** al nivel predicho de **rutting** medio
- Z_P**: Desviación estándar normal
- i**: Tipo de capa, asfáltica, base o subrasante

El error estándar para cada capa del pavimento esta dado por:

$$Se_{RDAC} = 0.1587 RD_{ac}^{0.4579} \quad \text{Ecuación 4.18}$$

$$Se_{RDGB} = 0.1169 RD_{GB}^{0.5303} \quad \text{Ecuación 4.19}$$

$$Se_{RDSG} = 0.1724RD_{SG}^{0.5516}$$

Ecuación 4.20

Si el rutting predicho es mayor que los requerimientos de diseño, el diseño ensayado debe modificarse para aumentar la capacidad estructural y la calidad de los materiales usados en todas las capas.

4.4 METODOLOGIA SHELL

Existen métodos de diseño que se les llama semi empíricos, o empírico-mecanicistas, porque consideran leyes del comportamiento de los materiales en los cálculos de vida útil; por ejemplo el método Shell o el del Instituto Norteamericano del Asfalto.

Por otra parte el Método de Diseño de Pavimentos de SHELL, no modela la deformación permanente sino que directamente estima el ahuellamiento de la mezcla asfáltica como:

$$\Delta h = C_m * h * \frac{\bar{\sigma}}{S_{mix, visc}}$$

Ecuación 4.21

donde:

Δh:	Ahuellamiento
C_m:	Factor de corrección por efecto dinámico
$\bar{\sigma} = z \cdot \sigma_0$:	Tensión promedio de la capa asfáltica
σ_0:	Presión de contacto del neumático
z:	Coefficiente de influencia de la distribución de presiones dentro de la capa de estudio
S_{mix, visc}:	Rigidez de la mezcla asfáltica

Este método propone que la relación existente entre las rigideces de la mezcla asfáltica y el ligante (S_{mix} y S_{bit}) es la misma que entre sus partes viscosas S_{mix, visc} y S_{bit, visc}, donde:

$$S_{bit, visc} = \frac{3VISC}{N t_0}$$

Ecuación 4.22

donde:

- VISC:** Viscosidad del ligante a la temperatura media de la vida del pavimento.
- N:** Número de ejes equivalentes.
- t₀:** Tiempo de carga función de la velocidad de los vehículos pesados.

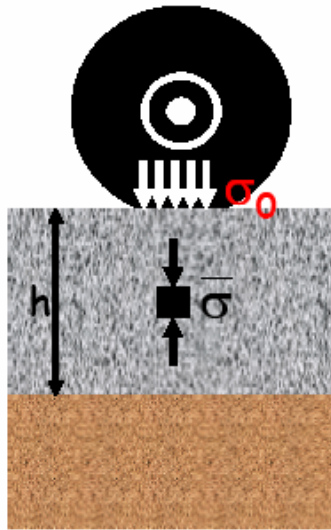


FIGURA 54 Modelo propuesto por SHELL

Hay dos procedimientos usuales para limitar las deformaciones permanentes. El primero consiste en limitar únicamente la deformación vertical de compresión en la fibra superior de la capa de subrasante y el segundo procedimiento es limitar la deformación permanente acumulada total en la superficie, debida a la contribución de cada una de las capas que conforman el pavimento.

En el método de diseño de la Compañía Shell, el número de repeticiones admisibles N_d , para limitar las deformaciones permanentes, se relaciona con la deformación vertical de compresión ϵ_C en la fibra superior de la subrasante, con la ecuación de tipo:

$$N_d = f_4 \epsilon_C^{-f_5} \quad \text{Ecuación 4.23}$$

donde f_4 y f_5 son constantes que se determinan a partir de ensayos de laboratorio, de tramos de prueba o del comportamiento observado en el campo. En la tabla 4.5 se muestran los valores típicos de f_4 y f_5 utilizados en la metodología SHELL.

En el primer procedimiento de control de deformaciones permanentes se considera que, controlando la deformación por compresión en la fibra superior de la subrasante, se pueden limitar las deformaciones permanentes en la superficie, supone el correcto control de calidad en las capas superiores.

Tabla 4.3 Valores de f_4 y f_5

Compañía SHELL	f_4	f_5
50% de confiabilidad	6.15×10^{-7}	4.0
85% de confiabilidad	1.94×10^{-7}	4.0
95% de confiabilidad	1.05×10^{-7}	4.0

Como ejemplo de los criterios de minimización de la deformación permanente están los desarrollados por Dorman y Metcalf (Criterio Shell), y otro por Monismith y McLean. Estos criterios se muestran en la figura 68, pueden ser utilizados para determinar, aproximadamente, la deformación permanente en la subrasante, la cual no causará una rodera excesiva en la superficie del pavimento.

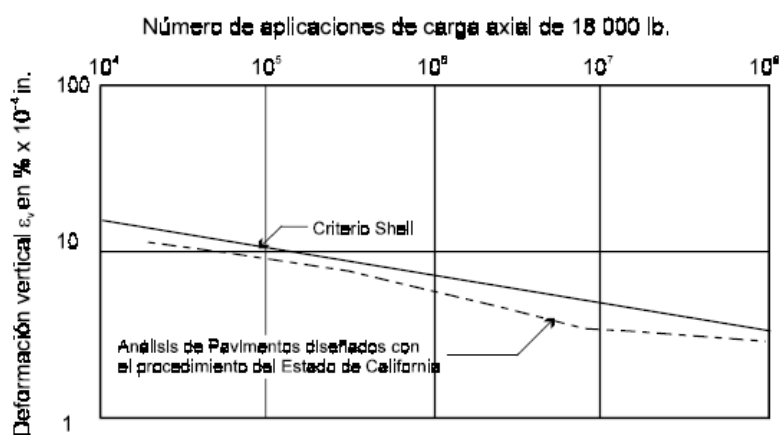


FIGURA 55 Criterios de minimización de la profundidad de la rodera

4.5 SHRP: STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM

En la metodología para la predicción de las profundidades de huella, es esencial la determinación de los estados de esfuerzos y deflexiones en la sección del

pavimento bajo la acción de las cargas. Para ello es necesario el uso de un apropiado modelo matemático del sistema del pavimento donde las propiedades del material estén interrelacionadas.

Algunos investigadores sugirieron que el uso de invariantes de esfuerzo sería el método más apropiado para representar correctamente los estados de los esfuerzos en la caracterización de los materiales. El uso de esfuerzos invariantes es particularmente útil en la zona de tensión del fondo de las capas bituminosas, y también para la predicción de las deformaciones permanentes lejos de los ejes de simetría de la aplicación de carga.

De acuerdo a ello, las condiciones de esfuerzos en cualquier punto pueden ser caracterizadas por el esfuerzo medio normal, p , y el esfuerzo octaédrico cortante, τ_{oct} , donde:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \text{Ecuación 4.24}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad \text{Ecuación 4.25}$$

Donde σ_1, σ_2 y σ_3 son los principales esfuerzos que están ocurriendo en el punto. Por simplicidad se puede definir un término para el esfuerzo cortante como:

$$q = \left(\frac{3}{\sqrt{2}} \right) * \tau_{oct} \quad \text{Ecuación 4.26}$$

En el ensayo de compresión triaxial, el esfuerzo cortante (q) es igual a la desviación de esfuerzos ($\sigma_1 - \sigma_3$). El esfuerzo medio normal (p) esta asociado con el cambio de volumen mientras q lo esta con la distorsión por cortante.

De manera similar a p y q , las invariantes de deflexión son la deflexión volumétrica (v) y la deflexión cortante (e), definida como:

$$v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad \text{Ecuación 4.27}$$

$$e = \frac{2}{3} * [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{1/2} \quad \text{Ecuación 4.28}$$

donde $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ y ε_3 son las principales deflexiones en el punto.

En el campo, las deflexiones permanentes se desarrollan como resultado de la combinación entre el cambio de volumen y la distorsión por cortante. La razón por la que se tomaron e y v siendo parámetros de deformación elástica, es porque para materiales como el asfalto las deformaciones plásticas se desarrollan aproximadamente proporcionales a las elásticas. Por consiguiente, la variación en e y v también dará una indicación de la variación correspondiente en las deformaciones plásticas o permanentes.

Con el uso de análisis elásticos de multicapas se pueden ilustrar fácilmente las variaciones de p , q , e y v con la profundidad y distancia a la línea central del montaje del eje de rueda doble; pero debido a la complejidad de los estados de esfuerzos y el gran número de parámetros involucrados en los análisis se requiere de programas de computadoras para definir la respuesta a las cargas de los sistemas multicapas.

En las gráficas 56 a 59, se puede observar la variación tridimensional de las invariantes p , q , e y v para la parte superior de una sección de pavimento.

Es evidente que los componentes de cortante (q y e) llegan a sus valores máximos cerca de la superficie y próximos a los límites de la rueda, indicando una fuerte tendencia a la distorsión cortante. Además, cerca de la superficie, el esfuerzo medio normal (p) es pequeño en la zona lejana a la línea central de la rueda; y la deflexión volumétrica (v) es casi imperceptible, denotando una pequeña tendencia al cambio volumétrico. Este cambio de volumen esta asociado a la compactación deficiente, y la deflexión por cortante se relaciona con los altos esfuerzos cortantes en el pavimento.

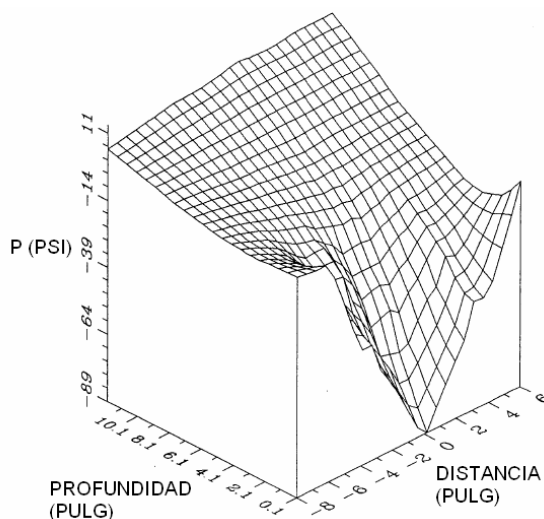


FIGURA 56 Variación del esfuerzo medio normal (p) dentro de la sección de pavimento para un montaje de llanta doble

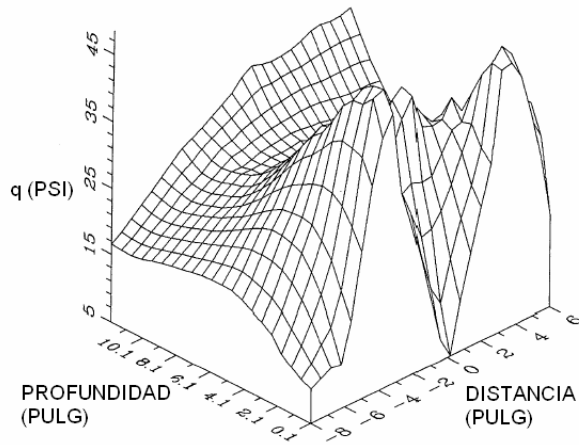


FIGURA 57 Variación del esfuerzo cortante (q) dentro de la sección del pavimento para un eje doble

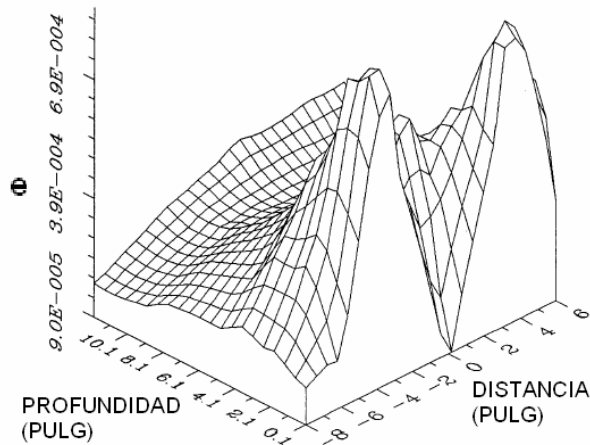


FIGURA 58 Variación de la deflexión cortante (e) dentro de una sección de pavimento sometida a un eje de doble rueda

La ventaja que se tiene al usar las invariantes de esfuerzos p y q es porque la tensión y esfuerzos principales fuera de los ejes no siempre pueden ser reproducidos directamente de los ensayos triaxiales. Sin embargo, algunos de los valores correspondientes para p y q si se pueden reproducir, además p y q puede calcularse, en la estructura del pavimento, usando una teoría elástica de capas o programas de elementos finitos.

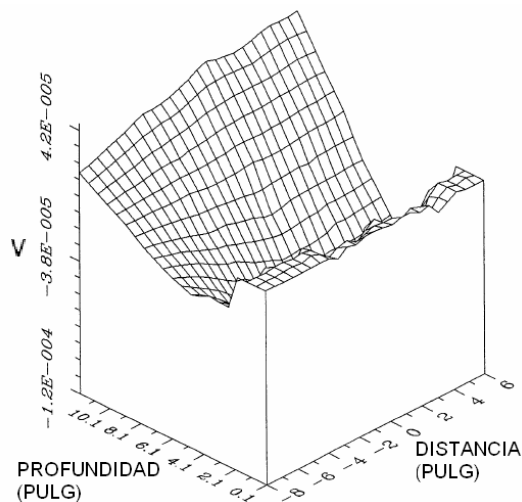


FIGURA 59 Variación en la deflexión volumétrica (v) dentro de una sección de pavimento sometida a un eje doble de carga

Los autores Brown y Bell, encontraron errores substanciales en el comportamiento de p y q si los esfuerzos cortantes eran ignorados en la determinación de los estados de esfuerzos, y esto llevaría a menospreciar las deformaciones permanentes en casi un 40%. De allí la importancia de ensayar los materiales en todo el rango de esfuerzos esperados en campo.

El desarrollo y la validación del programa de la SHRP para estudiar las deformaciones permanentes, en especial las especificaciones de los asfaltos, se realizaron a través de programas separados de ensayos que incluían el programa de la Universidad de California en Berkeley (UCB), la Ingeniería de Pavimento SWK de la Universidad de Nottingham (SWK/UN) y el programa de la Universidad Estatal de Carolina del Norte (NCSU).

4.6 HDM4: HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT SYSTEM

El HDM4 se puede catalogar como un método empírico-mecanicista, ya que logró combinar en las relaciones obtenidas las bases teóricas y experimentales de los modelos mecanicistas con los comportamientos observados en estudios empíricos.

El HDM-4 es un conjunto de herramientas para el análisis técnico y económico de alternativas de inversión relacionadas con la conservación y mejoramiento de

carreteras; estas herramientas se encuentran integradas en un programa de cómputo desarrollado por la Universidad de Birmingham

Entre las herramientas incorporadas en el HDM-4, se puede predecir el deterioro del pavimento durante su vida útil, usando los modelos de deterioro, y efectos de las obras (*RDWE* por las siglas *Road Deterioration and Works Effects*). Estos modelos permiten predecir, para un periodo de análisis definido por el usuario, la evolución del estado físico de las carreteras en función de las solicitaciones impuestas por el tránsito, de las condiciones climatológicas, y del tipo de pavimento.

Los modelos de deterioro del HDM-4 permiten analizar el comportamiento de una amplia gama de pavimentos asfálticos. Para ello, se utilizan variantes de los modelos específicos en la estimación de cada tipo de daño, o se modifican los coeficientes de los mismos.

4.6.1 Deterioros relacionados con la deformación del pavimento

En el HDM-4, la deformación de la estructura del pavimento se modela con:

- ✦ Roderas
- ✦ Irregularidad

Se considera que este tipo de deterioros varían en forma continua, por lo que sólo se modelan mediante ecuaciones de progreso. El HDM-4 modela cada uno de los deterioros anteriores en forma separada, sin embargo, en última instancia, combina los resultados para obtener un pronóstico de la irregularidad del pavimento.

La figura 60 muestra las interacciones entre los modelos utilizados para predecir los tipos de deterioro considerados.

El HDM-4 calcula el deterioro de pavimentos sobre una base anual, antes de analizar los efectos de las acciones de conservación y mejoramiento propuestas por el usuario. El procedimiento de cálculo involucrado en la predicción del deterioro puede dividirse las siguientes fases:

- ✦ Cálculo de la capacidad estructural del pavimento
- ✦ Evaluación del cambio en los deterioros superficiales
- ✦ Obtención del área dañada

✦ Cálculo del cambio en la profundidad de roderas

✦ Obtención del IRI

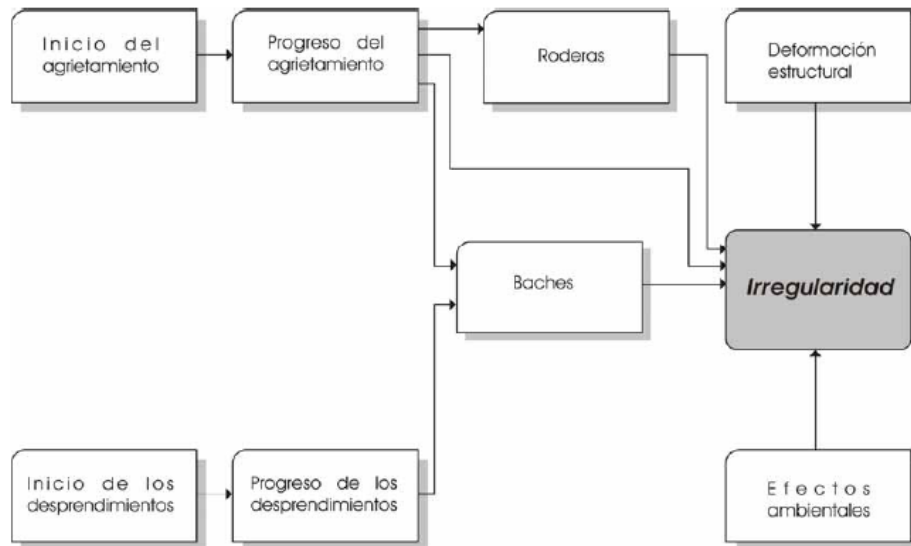


FIGURA 6059 Interacción entre los modelos de deterioro del HDM4 para pavimentos asfálticos

4.6.1.1 Roderas

El HDM-4 estima la profundidad de roderas después de calcular los tipos de deterioro superficial, y de redistribuir las áreas dañadas. La profundidad total de roderas se basa en la suma de las siguientes componentes:

- ✦ Densificación inicial
- ✦ Deformación estructural
- ✦ Deformación plástica
- ✦ Uso de llantas con aditamentos

Densificación inicial

Este fenómeno se relaciona con el grado de compactación relativa de la base, subbase y capas de relleno (COMP). Dicho parámetro se introduce como parte del

segmento de la vía; aclarando, que la densificación inicial sólo se modela para el año siguiente a la construcción de la base de un pavimento; no se toma en cuenta para superficies con más de un año de antigüedad. Esta componente de la profundidad de roderas se calcula como:

$$RDO = K_{rid} \left[a_0 (YE4 * 10^6)^{(a_1 + a_2 DEF)} SNP^{a_3} COMP^{a_4} \right] \quad \text{Ecuación 4.29}$$

donde:

RDO:	Profundidad de roderas debidas a la densificación inicial
YE4:	Número anual de ejes equivalentes (millones/carril)
DEF:	Deflexión promedio medida con viga Benkelman
SNP:	Número estructural ajustado del pavimento
COMP:	Compactación relativa (%)
K_{rid}:	Factor de calibración para la densificación inicial

Deformación estructural

Esta componente de las roderas, se modela bajo dos condiciones: deformación estructural sin agrietamiento y deformación estructural después del agrietamiento.

Deformación estructural sin agrietamiento

$$\Delta RDST_{UC} = K_{rst} \left(a_0 SNP^{a_1} YE4^{a_2} COMP^{a_3} \right) \quad \text{Ecuación 4.30}$$

Deformación estructural después del agrietamiento

$$\Delta RDST_{crk} = K_{rst} \left(a_0 SNP^{a_1} YE4^{a_2} MMP^{a_3} ACX^{a_4} \right) \quad \text{Ecuación 4.31}$$

donde:

$\Delta RDST_{UC}$:	Incremento de la profundidad de roderas debido a la deformación estructural sin agrietamiento, en el año de análisis.
$\Delta RDST_{crk}$:	Incremento de la profundidad de roderas debido a la deformación estructural cuando ya existe agrietamiento, en el año de análisis.
MMP:	Precipitación media mensual
ACX_a:	Área del agrietamiento indexado, se refiere a un parámetro que se calcula mediante una ponderación del agrietamiento total y el agrietamiento ancho. Al inicio del año de análisis.
SNP:	Número estructural ajustado

YE4:	Número anual de ejes equivalentes
K_{rst}:	Factor de calibración para la deformación estructural

Deformación plástica

Incluye al parámetro CDS, el cual indica si la carpeta es susceptible a este tipo de deterioro. Así mismo, se requiere conocer la velocidad media del tránsito pesado en el tramo en estudio (S_h), la cual constituye un parámetro esencial para la estimación de la deformación plástica que a su vez, es uno de los factores más importantes en la generación de las roderas.

El incremento anual en la profundidad de roderas debido a la deformación plástica se obtiene como:

$$\Delta RDPD = K_{rpd} CDS^3 a_0 YE4 S_h^{a_1} HS^{a_2} \quad \text{Ecuación 4.32}$$

donde:

$\Delta RDPD$:	Incremento en la deformación plástica durante el año de análisis
CDS:	Indicador de defectos en la construcción de superficies asfálticas
YE4:	Número anual de ejes equivalentes
S_h:	Velocidad de los vehículos pesados
HS:	Espesor total de las superficies asfálticas
K_{rpd}:	Factor de calibración de la deformación plástica

La componente debida al uso de llantas con aditamentos no se utilizó, ya que solamente aplica para vehículos con clavos en las llantas para facilitar su desplazamiento en superficies cubiertas de nieve, condición poco común en las carreteras latinoamericanas.

Profundidad total de roderas

Si la edad de la construcción del pavimento es menor o igual a un año, entonces:

$$\Delta RDM = RDO + \Delta RDPD + \Delta RDW \quad \text{Ecuación 4.33}$$

de otra manera:

$$\Delta RDM = \Delta RDST + \Delta RDPD + \Delta RDW \quad \text{Ecuación 4.34}$$

donde:

- ΔRDM :** Incremento en la profundidad media de las roderas en ambas huellas, en el año de análisis
- RDO :** Profundidad de roderas debida a la densificación inicial en el año de análisis
- $\Delta RDST$:** Incremento en la profundidad de roderas debida a la deformación estructural en el año de análisis
- $\Delta RDPD$:** Incremento en la profundidad de roderas debida a la deformación plástica en el año de análisis
- ΔRDW :** Incremento en la profundidad de roderas debida a la deformación por el uso de llantas con aditamentos

La profundidad total media de roderas para cualquier año es:

$$RDM_b = \text{MIN}[(RDM_a + \Delta RDM_b), 100] \quad \text{Ecuación 4.35}$$

donde:

- RDM_b :** Profundidad media de roderas en ambas huellas al final del año de análisis
- RDM_a :** Profundidad media de roderas en ambas huellas al inicio del año de análisis

Desviación estándar de la profundidad de roderas

De acuerdo con los estudios tomados en cuenta para el desarrollo de los modelos de deterioro del HDM-4, la irregularidad del pavimento se correlaciona con la desviación estándar de la profundidad de roderas, la cual se calcula con la expresión:

$$RDS_b = \text{MAX}[0.3, (0.9 - 0.04RDM_b)]RDM_b \quad \text{Ecuación 4.36}$$

donde:

- RDS_b :** Desviación estándar de la profundidad de roderas al final del año de análisis
- RDM_b :** Profundidad media de roderas al final del año de análisis

Finalmente, la documentación del sistema establece que la contribución de la profundidad de roderas al incremento del IRI, el cual se limita a un máximo de 16 m/km, se calcula como:

$$\Delta RI_r = a_0 \Delta RDS$$

Ecuación 4.37

donde ΔRDS se refiere al desarrollo de la desviación estándar de la profundidad de roderas durante el año de análisis, y se calcula como:

$$\Delta RDS = \text{MAX}[0.3, (0.9 - 0.04\Delta RDM)]\Delta RDM \quad \text{Ecuación 4.38}$$

Es decir, con una expresión similar a la empleada por el modelo para la desviación estándar de la profundidad de roderas.

4.7 MODELO Y SOFTWARE VESYS

VESYS, desarrollado por la FHWA, es una serie de programas de análisis computacional, probabilístico y mecanístico, para pavimentos flexibles. La serie VESYS esta basada en el modelo elástico de capas homogéneas de material en la mitad del espacio infinito, con algunas aplicaciones de la teoría viscoelástica-plástica.

Este sistema usa un modelo de respuesta primario elástico de N-capas mecanístico - probabilístico, el cual puede ser usado para analizar la respuesta primaria del pavimento; además calcula los daños en el pavimento en términos de esfuerzo, deflexión, rutting, rugosidad y agrietamiento.

Una de las últimas versiones publicadas de VESYS, es la número 5, que incluye nuevas características como:

- ✦ Longitud variable estacional
- ✦ Función de influencia
- ✦ Representación logarítmica bi-lineal de la deformación permanente
- ✦ Opción de rutting por capa o por sistema
- ✦ Cargas de ejes tandem y triple
- ✦ Entrada de la curva de fluencia

Los modelos de comportamiento del pavimento que se usan en VESYS, incluyen rutting, agrietamiento por fatiga, agrietamiento por baja temperatura, rigidez y el índice de servicio inicial (PSI).

4.7.1 Modelamiento del rutting

Existen dos modelos de rutting disponibles en VESYS, los modelos de “rutting por capa” o “sistema de rutting”.

El modelo de rutting por capa estima la deformación permanente en cada capa finita como el producto entre la compresión elástica en dicha capa y la ley de deformación permanente de capa, asociada con la capa en cuestión. Este modelo esta expresado como:

$$R_D = \int_{N_1}^{N_2} U_s + \frac{e_t}{e_s} \mu_{sub} N^{-\alpha_{sub}} + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{N_1}^{N_2} (U_i^+ - U_i^-) \mu_i N^{-\alpha_i} \quad \text{Ecuación 4.39}$$

donde:

- U_s^+ : Deflexión en la superficie de la subrasante, debida a un eje de carga simple
- U_i^+ y U_i^- : Deflexión en la superficie y el fondo de la capa finita i debido a un grupo de ejes
- e_t : Tensión en la superficie de la subrasante debida a un grupo de ejes
- e_s : Tensión en la superficie de la subrasante debida a un eje de carga simple
- μ_{sub} y α_{sub} : Parámetros de deformación permanente de la subrasante
- μ_i y α_i : Parámetros de deformación permanente de la capa i

La formulación del sistema de rutting trata al sistema de pavimento como un todo, y primero calcula un juego equivalente de parámetros de deformación permanente del sistema de pavimento (μ_{sys} y α_{sys}), que son determinados como función de las repeticiones de carga por un análisis de regresión cuadrática.

La profundidad de la huella en el pavimento es estimada por:

$$R_D = \int_{N_1}^{N_2} U \mu_{sys} N^{-\alpha_{sys}} dN \quad \text{Ecuación 4.40}$$

donde U es la deflexión en la superficie del pavimento.

CONCLUSIONES

Este proyecto se realizó como punto de partida para futuras investigaciones y aportes que se deseen realizar sobre el tema *de las deformaciones plásticas en los pavimentos*, ya que en él se integraron algunos de los ensayos más usados para la modelación y predicción en laboratorio de este tipo de falla, los parámetros que más afectan la resistencia del pavimento a las deformaciones permanentes y diferentes métodos que han venido abordando el estudio de las mismas.

Las deformaciones plásticas son uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de los pavimentos en servicio, y a su vez uno de los criterios de falla más utilizados en la actualidad; para pronosticar el daño causado al pavimento por factores como el tránsito y/o el ambiente. Razón por la que el estudio de este tipo de daño en las estructuras debe continuar, y lo más importante, iniciar un estudio más profundo sobre el tema en Colombia, ya que este tipo de irregularidades varían según las condiciones de un país a otro.

Existen una serie de factores que afectan y generan las deformaciones permanentes en los pavimentos, entre los más importantes o que mayor influencia tienen está el porcentaje de vacíos, el contenido de ligante asfáltico, el tipo y la calidad del agregado.

La conformación de la carpeta asfáltica contribuye al igual que los factores tenidos en cuenta para el diseño a la deformación total de la estructura, específicamente el parámetro de diseño que se refiere al espesor de la carpeta y de cada una de las capas; el grosor de la carpeta asfáltica no es una medida que genere mejoras a la resistencia de las deformaciones permanentes, pues la profundidad de rodera alcanza un valor límite para grosores determinados.

Con la evaluación de la literatura se encontró que la deformación cortante es uno de los principales mecanismos que contribuyen en la aparición de roderas, de allí la importancia de considerar directamente el efecto de los esfuerzos cortantes, por medio de ensayos donde los esfuerzos normales y cortantes puedan controlarse independientemente.

Algunas características propias de las condiciones de laboratorio no pueden ser excluidas en la generación de las deformaciones permanentes la temperatura y el grado de compactación hacen parte de estas características; y para el estudio en laboratorio del comportamiento de las mezclas se deben reproducir lo mejor posible las condiciones presentes en la realidad.

Los ensayos triaxiales tienen la capacidad de aproximarse más a las condiciones reales, en comparación a los ensayos uniaxiales, ya que proporcionan una presión de confinamiento a la muestra. Además aquellos de carga repetida son más fieles a representar las características de deformación permanente ya que simulan el estado de esfuerzo producido por varios vehículos en movimiento.

Los métodos empleados para la estimación de deformaciones permanentes requieren la validación con pruebas de pista, ésta debe incluir la determinación del correcto perfil de deformación que se pueda presentar.

El mayor avance de los ensayos de pista es que son representativos de la respuesta del pavimento bajo condiciones ambientales y de tráfico real, pero su desventaja radica en los elementos incontrolables que pueden afectar al ensayo y complicar su interpretación. La gran variedad de este tipo de pruebas que existen actualmente permiten que se realicen para condiciones húmedas o secas, realizar estudios en laboratorio o en campo bajo un amplio rango de temperaturas. Los dispositivos más recientes permiten ensayos totalmente automatizados con cálculos automáticos de las proporciones de rutting, el dispositivo LVDT, es uno de los más utilizados en los ensayos, pues permite de manera sencilla registrar las deformaciones permanentes del espécimen.

Los avances en computación han permitido nuevos métodos de diseño, como el análisis estructural empleando sistemas de capas múltiples o mediante elementos finitos, de allí que se utilicen con mayor frecuencia los modelos de simulación para el diseño de pavimentos.

Hay una variedad de métodos de diseño en los que se consideran las deformaciones permanentes de una u otra manera. Los métodos empíricos realizan un cálculo de la capa de subbase en función de la capacidad portante de la subrasante, y la base y capa asfáltica en función del tránsito. Mientras los métodos de deflexión límite y equilibrio límite, limitan la deflexión o el esfuerzo a un nivel tolerable para determinado número de aplicaciones de carga, pero esto no podría asegurar la resistencia de la capa asfáltica a la presencia de deformaciones plásticas. Por otra parte, los procedimientos mecanicistas se basan en el modelamiento del pavimento como una estructura multicapa elástica o viscoelástica sobre una cimentación elástica o viscoelástica.

Actualmente hay una amplia variedad de programas de computador que permiten la evaluación del comportamiento de un pavimento; la tendencia actual son los métodos empíricos-mecanicistas, que combinan las relaciones obtenidas de bases teóricas y experimentales de los modelos mecanicistas con los comportamientos observados en estudios empíricos. Pero se busca, en un futuro, la implementación de métodos puramente mecanicistas.

La Guía de Diseño AASHTO 2002 se basa en un enfoque del incremento de daños, donde ellos son estimados y acumulados para cada intervalo de análisis. Se tienen en cuenta las deformaciones permanentes en la capa asfáltica, la base granular y la subrasante por separado, para después calcular la cantidad de deformación total en el pavimento; permitiendo realizar ajustes individuales de cada variante que influye en el comportamiento, en caso que se necesite mejorar el resultado obtenido.

El modelamiento de las deformaciones permanentes por HDM4 se realiza estimando la profundidad de las roderas como la suma de la densificación inicial del pavimento, la deformación estructural, la deformación plástica, y el efecto del uso de llantas con aditamentos para el caso de las zonas donde se presentan nevadas.

El software VESYS plantea dos formas de modelar el ahuellamiento, ya sea por capa o por sistema. El modelo por capa estima la deformación permanente en cada capa finita del pavimento, mientras el modelamiento por sistema toma al pavimento como un todo.

RECOMENDACIONES

Para alcanzar una relación coherente entre dos ensayos de laboratorio, con diferentes técnicas de modelación, es fundamental conservar las mismas características en la fabricación de las probetas.

La selección final de un tipo de ensayo para determinar las características de una mezcla será el punto óptimo entre la exactitud, el sentido común y la práctica, es decir, que los resultados que nos den sean los más coherentes y parecidos a la realidad pero adaptados al tiempo disponible, número de probetas a realizar, factor económico, facilidad de interpretación de los resultados y software disponible.

Se sugieren, el ensayo triaxial de carga repetida y las pruebas de simulación, por ser ellos los que mejor representan las condiciones reales a las que están sometidos los pavimentos en servicio. El ensayo triaxial de carga repetida permite someter los materiales que conforman las capas de pavimento a condiciones de confinamiento y trayectorias de esfuerzos similares a las que produce el paso de los vehículos, de esta manera se pueden obtener relaciones entre esfuerzos y deformaciones. Por su parte, los ensayos de simulación, como su nombre lo indica, están destinados a imitar las condiciones ambientales y de tráfico real de las capas del pavimento.

Los parámetros básicos en la realización de estos ensayos, están relacionados de la siguiente manera:

Tabla 5 Correlación de parámetros

Ensayo triaxial con carga repetida	Ensayo de simulación
Temperatura controlada "t"	Temperatura controlada "t"
Frecuencia de carga	Velocidad de la rueda
Esfuerzo vertical σ_v (esfuerzo desviador)	Carga de la rueda
Esfuerzo horizontal σ_h	Confinamiento de la capa

Haciendo la equivalencia entre estos parámetros se va a garantizar que las condiciones de ensayo para las muestras sean las mismas, por consiguiente, los resultados arrojados por estas pruebas, en cuanto a deformaciones permanentes, se espera, sean similares.

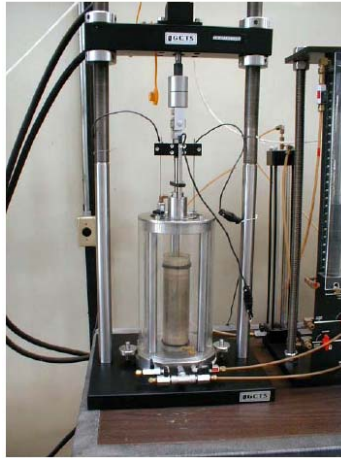


FIGURA 61 Equipo utilizado en el ensayo triaxial de carga repetida



FIGURA 62 Equipo de simulación para el ensayo de Georgia



FIGURA 63 Maquina de pista NLT para realizar el ensayo de simulación

La comparación de los resultados obtenidos se debe realizar en términos de ahuellamiento para ambos ensayos. Las prácticas de simulación arrojan directamente los valores de ahuellamiento, gracias a la implementación de dispositivos electrónicos de avanzada. Mientras que en el caso del ensayo triaxial de carga repetida, se debe determinar la ley de flujo para el material, que permite encontrar la tasa de deformación permanente en porcentaje por unidad de ciclos de una capa de rodadura; y así calcular el ahuellamiento.

Se espera que este trabajo de investigación sirva como punto de partida para futuras indagaciones, y porque no, implementaciones que puedan ser utilizadas en el estudio de este fenómeno tan importante en el comportamiento de los pavimentos, como lo son las deformaciones plásticas. Dicha investigación se podría implementar en dos fases:

- ✦ El objeto de la primera fase sería establecer modelos para predecir el resultado de los ensayos de simulación a partir de los resultados de la implementación del ensayo triaxial.
- ✦ En la segunda fase, se buscaría tratar de predecir el ahuellamiento, en tramos experimentales, a partir del ensayo triaxial de carga repetida y los ensayos de simulación.

BIBLIOGRAFIA

AASHTO. Guide for Mechanistic – Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board. National Research Council. Illinois, 2002.

ACEVEDO PEÑALOZA, Carlos Humberto. Estudio del Angulo de Presión y la Presión en Contacto en Mecanismo Leva Palpador Cuya Ley de Desplazamiento se Diseña con Curvas Beizer. Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cataluña. España, 2002.

ALARCON IBARRA, Jorge. Estudio del Comportamiento de Mezclas Bituminosas Recicladas en Caliente en Planta. Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cataluña. España, 2003.

ALVAREZ LUGO, Alex Eduardo. Primera Experiencia Nacional en Instrumentación de Pavimentos Flexibles en el Carrusel de Fatiga. Universidad de Los Andes, Departamento de Ingeniería Civil. Santafé de Bogotá, D.C., Colombia.

ANALISIS COMPARATIVO EN LABORATORIO DE ASFALTOS DE DIFERENTE VISCOSIDAD. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

ANGELONE, Silvia; CAUHAPÉ CASAUX, Marina; GAVILAN, Emiliano; MARTINEZ, Fernando Y SANTAMARIA, Enrique. Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas. Reporte técnico RT-ID-06/02, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Argentina, 2006.

BIANCHETTO, Hugo D. y NOSETTI, Adrián. Durabilidad de Mezclas con Macrotectura. Revista Vial Digital, Edición 49. Argentina, 2006.

BITUMINOUS MIXTURES LABORATORY (BML). Equipment French (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) Pavement Rutting Tester. Asphalt Pavement Technology, Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation.

BROWN, E. Ray; KHANDHAL, Prithvi S. and ZHANG, Jingna. Performance Testing for Hot Mix Asphalt. NCAT Report 01 – 05, National Center for Asphalt Technology. Auburn University. Alabama, 2001.

CACIQUE, A. y CONTRERAS, C. Contribución al Estudio del Comportamiento del Material Granular en un Pavimento. Publicación técnica. Universidad de los Andes. Santafé de Bogotá, D.C.

CAICEDO HORMAZA, Vernardo; CARO SPINEL, Silvia y CORAL TRIVIÑO, Leonardo. Modelación del Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas de Pavimentos. Revista Uniandes N° 18, Universidad de los Andes. Santafé de Bogotá, D.C., 2003.

CARRILLO DELGADO, Eduardo; CARRILLO GIL, Arnaldo; DONAYRE CORDOVA, Oscar y VERA ALIAGA, Ivan. Evaluación de un Modelo Avanzado de Diseño de Pavimentos Flexibles y su Comparación con los Métodos Tradicionales. Ponencia presentada al XIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Perú, 2001.

CHIRINOS, José Jesús y SANCHES LEAL, Freddy J. Obtención de Módulo de Elasticidad de Mezclas Asfálticas Compactadas a través del Ensayo Marshall. 3er Simposio Venezolano del Asfalto, INVEAS – EXPOASFALTO. 2006

CORONADO ITURBIDE, Jorge. Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos. Guatemala, 2002.

CORREA, Angel y GARNICA ANGUAS, Paul. Conceptos Mecanicistas en Pavimentos. Publicación técnica N° 258, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. México, 2004.

DELGADO ALAMILLA, Horacio; GARNICA ANGUAS, Paul y GOMEZ LOPEZ, José Antonio. Análisis de la Influencia del Método de Compactación en el Comportamiento Mecánico de Mezclas Asfálticas. Publicación técnica N° 255,

Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte. México, 2004.

DELGADO ALAMILLA, Horacio; GARNICA ANGUAS, Paul y SANDOVAL SANDOVAL, Carlos Daniel. Análisis Comparativo de los Métodos Marshall y Superpave para Compactación de Mezclas Asfálticas. Publicación técnica N° 271, Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte. México, 2005.

DUSSÁN NAVARRO, Eduardo y FLAUTERO VALENCIA, Fernando. Automatización de Ensayos Dinámicos del Laboratorio de Pavimentos en el Equipo N.A.T. de la Pontificia Universidad Javeriana. Proyecto de grado. Santafé de Bogotá, D.C., 2005.

FONSECA RODRIGUEZ, Carlos H. En Busca de una Transferencia de Tecnología Ordenada en el Area de Pavimentos Asfálticos en México. Revista Digital de Postgrado, Investigación y Extensión Edición 52, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. México.

FONSECA RODRIGUEZ, Carlos y MARTINEZ BRINGAS, Claudia L. El Empleo de Fibras en la Elaboración de Mezclas Asfálticas para Pavimentos de Graduación Abierta. Cuaderno ficha N° 33, Fundación ICA. México, 1999.

FORERO ACEVEDO, Sergio Enrique y GARCIA HERRERA, Francisco Adrián. Estado del Arte de la Caracterización y Diseño de Pavimentos Flexibles. Proyecto de grado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2001.

GARNICA ANGUAS, Paul y GOMEZ LOPEZ, José Antonio. Deformaciones Permanentes en Materiales Granulares para la Sección Estructural de Carreteras. Publicación técnica N° 176, Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte. México, 2001.

GARNICA ANGUAS, Paul; GOMEZ LOPEZ, José Antonio y PEREZ GARCIA, Natalia. Modulos de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares. Publicación técnica N° 142, Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte. México, 2000.

GARNICA ANGUAS, Paul; GOMEZ LOPEZ, José Antonio y SESMA MARTINEZ, Jesús Armando. Mecánica de Materiales para Pavimentos. Publicación técnica N° 197, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. México, 2002.

GARNICA ANGUAS, Paul; MARTINEZ PEÑA, Guadalupe Evangelina. Algunos Aspectos de la Resistencia a la Tensión y Fatiga en Suelos Arcillosos Estabilizados con Cal. Publicación técnica N° 203, Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte. México, 2003.

GARNICA ANGUAS, Paul y PEREZ GARCIA, Natalia. Deformaciones Permanentes en Suelos Cohesivos Utilizados en la Construcción de Pavimentos. Publicación técnica N° 165, Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte. México, 2001.

GARNICA ANGUAS, Paul; RICO RODRIGUEZ, Alfonso y TELLEZ GUTIERREZ, Rodolfo. Pavimentos Flexibles: Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias. Publicación técnica N° 104, Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte. México, 1998.

GOMEZ LOPEZ, José Antonio; HERNANDEZ DOMINGUEZ, Roberto Israel y SOLORIO MURILLO, Ricardo. Análisis de Sensibilidad de los Modelos de Deterioro del HDM-4 para Pavimentos Asfálticos. Publicación técnica N° 253, Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte. México, 2004.

GUALDRON SUAREZ, Guillermo Alfonso y RANGEL VELASCO, Rubén Darío. Ensayos no Destructivos en la Caracterización de Pavimentos Flexibles. Proyecto de grado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1993.

KRUGER, J.; HARTMAN, A.M. and LOOTS, H. Towards Developing a Test Protocol for Field Permanent Deformation Performance Evaluation Using the MMLS3. 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. South Africa, 2004.

LABORATORIO DE PAVIMENTOS, ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS. Grupo CECATA, Pontificia Universidad Javeriana. Santafé de Bogotá, D.C., 2004.

LVDT. Laboratorio de Sensores e Instrumentación. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina

MONTENEGRO, Carlos y REYES L., Fredy. Evolución de la Geotecnia en la Ingeniería de Pavimentos. Publicación técnica, Grupo CECATA Universidad Javeriana. Santafé de Bogotá, D.C.

MORENO RUBIO, Javier. Efecto de Equipo y Procedimiento de Medida en la Determinación del Módulo Resiliente y Resistencia a Tracción Indirecta de las Mezclas Bituminosas. Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cataluña. España, 2005.

MUENCH, Steve. Mix Design. WSDOT: Pavement Guide, Interactive Training Guides. Washington State Department of Transportation, University of Washington.

PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la Resistencia a las Deformaciones Plásticas de Mezclas Bituminosas Densas de la Normatividad Mexicana Mediante el Ensayo de Pista. Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cataluña. España, 2004.

PAEZ MORENO, Diego F. y PEREIRA FERNANDEZ, Henry F. Estudio del Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas. Universidad de los Andes, 2005.

PEREIRA AREIZA, Javier José; ROJAS GARCIA, Jairo y RUEDA REY, Leonardo Augusto. Medidas de Control de Calidad en la Superficie de los Pavimentos Flexibles en la Carretera Socorro – Cimacota Km 10+000 al Km 10+200. Monografía, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1999.

REYES LIZCANO, Fredy Alberto; REYES ORTIZ, Oscar Javier y TRONCOSO RIVERA, Juan Ricardo. Efecto de la Presión de Contacto y la Temperatura en el Ahuellamiento de una Mezcla Asfáltica. Revista Ingeniería y Universidad Volumen 10, Universidad Javeriana. Santafé de Bogotá, D.C., 2005.

SHELL PAVEMENTE DESIGN MANUAL, Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffics. Shell International Petroleum Corporation Limited. London, 1978.

SHRP. Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes, SHRP – A – 415. Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington, D.C., 1994.

SHRP. SHRP – LTPP Overview: Five – Year Report. Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington, D.C., 1994.

SHRP. Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete, SHRP – A – 318. Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington, D.C., 1991.

VIALIDAD NACIONAL ARGENTINA. Fundamentos de Evaluación de Estado de los Pavimentos. Argentina.

Paginas Web consultadas:

<http://www.cooper.co.uk>
<http://www.dynatest.com>
<http://www.e-asfalto.com>
<http://www.editorialrevistas.com>
<http://www.fhwa.dot.gov>
<http://www.imt.mx>
<http://www.lanamme.ucr.ac.cr>
<http://rainhart.thomasnet.com>
<http://www.rockproducts.com>
<http://www.tfrc.gov>
<http://www.wessexengineering.co.uk>