

---

---

# **INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE COMPACTACION EN LAS DEFORMACIONES PERMANENTES DE SUELOS COHESIVOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS**

**Secretaría de Comunicaciones y Transportes**

**Instituto Mexicano del Transporte**

**Paul Garnica Anguas  
Natalia Pérez García**

**Publicación Técnica No. 165  
Sanfandila, Qro. 2001**

---

---

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Influencia de las condiciones de compactación en las deformaciones permanentes de suelos cohesivos utilizados en la construcción de pavimentos**

**Paul Garnica Anguas  
Natalia Pérez García**

**Publicación Técnica No. 165  
Sanfandila, Qro. 2001**

---

---

El presente trabajo ha sido elaborado en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores Paul Garnica Anguas y Natalia Pérez García.

Se agradecen los valiosos comentarios del Ing. Rodolfo Téllez Gutiérrez.

Los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo con el auxilio de los Técnicos Laboratoristas Miguel A. Cervantes Nieto y Mario A. Pérez González.

---

## Resumen

---

El diseño y evaluación de pavimentos con propósitos de construcción y rehabilitación requiere de una cuidadosa determinación de factores tales como: propiedades de los materiales, tipo de tránsito y volumen, condiciones ambientales, etc. Sin duda, las propiedades de los materiales constituyen uno de los factores más importantes en el diseño estructural del pavimento, así como en el comportamiento que presente durante su vida útil. En el pasado, el diseño de pavimentos flexibles ha involucrado correlaciones empíricas, las cuales fueron obtenidas con base en el comportamiento observado de los materiales en campo.

De hecho, el estudio del problema de fatiga de los materiales utilizados en la construcción de la infraestructura carretera ha sido prácticamente marginado, lo que ha dado como resultado que el fundamento de las metodologías de análisis y diseño actuales para pavimentos sea de carácter totalmente empírico.

Efectivamente, bajo un gran número de aplicaciones de carga los materiales tienden a fracturarse o bien a acumular deformación, dependiendo de su rigidez inicial, lo que causa algunos de los deterioros más significativos en la superficie de rodamiento de los pavimentos.

En este trabajo se presenta un estudio de la influencia de las condiciones de compactación en las deformaciones permanentes que se generan por el tránsito vehicular en suelos cohesivos, utilizados en la construcción de las capas inferiores de la sección estructural de carreteras.

## Abstract

---

Design, construction, and rehabilitation of a pavement requires a careful determination of factors like: material properties, traffic classification, rates of growth, percentage of heavy vehicles, environmental conditions, etc.

Needless to say that the properties of materials are one of the most important factors in the design and behaviour of any pavement. In the past, the pavement design have been based upon empirical knowledge, this means, the use of correlations which were obtained for certain environmental conditions, materials, etc. All these correlations do not apply for all situations.

As a matter of fact, the study of fatigue cracking has been marginated, which has given a semi-empirical methodology for analysis.

Surely, under too many applied loads, the materials tendency are to fracture or to accumulate deformation depending upon its initial stiffness. This is one of the most important reasons or causes for pavement surface deterioration.

This research is focused on the compacted conditions that have influence on permanent deformation mainly on subgrade soils.

## Resumen Ejecutivo

---

Se considera que un pavimento ha fallado cuando las deformaciones en sus capas componentes son suficientemente grandes para causar una superficie de rodamiento no tolerable o que la superficie presenta agrietamientos severos. De hecho, se sabe desde hace ya muchos años que uno o ambos modos de falla se desarrollarán si hay excesiva deformación plástica de los componentes del pavimento. Es por esto que los métodos de diseño actuales han sido desarrollados de tal manera que se minimicen las posibilidades de falla debido a estas causas.

En la primera parte de este trabajo se presenta una serie de conceptos relacionados con deformaciones, es decir, tipos de deformaciones que se pueden presentar y las causas que las provocan. Así también se presentan los criterios de falla que normalmente se utilizan en los diseños mecanicistas de pavimentos, en este punto se puede observar cómo existen varios criterios para tomar en cuenta el fenómeno de fatiga y el de deformación permanente.

En la segunda parte se discute el análisis de toda una serie de resultados que se obtuvieron al ensayar varias muestras en pruebas de deformación permanente con diferentes condiciones de compactación (peso volumétrico y contenido de agua).

De estos análisis se llegó a conclusiones como las siguientes:

El rango de deformaciones unitarias permanentes obtenidas en el suelo estudiado fue de 0.07 % a 1%, lo que ejemplifica que el problema en pavimentos se considera usualmente como de pequeñas deformaciones.

De las curvas isocaracterísticas de deformación obtenidas, se observó que la variable de mayor influencia es el contenido de agua.

La magnitud de la deformación parece acelerarse a grados de saturación mayores a los óptimos.

La deformación depende claramente de las condiciones de compactación.

# Indice

---

Resumen	III	
Abstract	V	
Resumen ejecutivo	VII	
Introducción	1	
<b>CAPITULO 1</b>	<b>Conceptos generales</b>	
1	Tipos de deformación	3
2	Criterios de falla	5
2.1	Agrietamiento por fatiga	5
2.2	Deformación permanente (Roderas)	7
2.3	Factores que determinan la deformación permanente	9
<b>CAPITULO 2</b>	<b>Comportamiento observado en el estudio experimental</b>	
2.1	Procedimiento de prueba	11
2.2	Descripción y propiedades del material utilizado	11
2.3.	Deformaciones permanentes	14
<b>CAPITULO 3</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	
	Conclusiones y Recomendaciones	23
	Bibliografía	25

# Introducción

---

El diseño y evaluación de pavimentos con propósitos de construcción y rehabilitación requiere de una cuidadosa determinación de factores tales como propiedades de los materiales, clasificación del tránsito, volúmenes diarios y sus tasas de crecimiento reales, porcentajes de vehículos pesados, condiciones ambientales, etc. Sin duda, las propiedades de los materiales constituyen uno de los factores más importantes en el diseño estructural del pavimento, así como en el comportamiento que presente durante su vida útil. En el pasado, el diseño de pavimentos flexibles ha involucrado correlaciones empíricas, las cuales fueron obtenidas con base en el comportamiento observado en los materiales en campo.

Por otro lado, las extrapolaciones de los métodos empíricos a condiciones más allá de las cuales fueron desarrollados, conduce a resultados inciertos. Otro punto importante es que las condiciones de tránsito cambian rápidamente, la tendencia es hacia vehículos más pesados, altos volúmenes de tránsito y nuevos tipos de configuraciones. Las tendencias anteriores conducirán al reemplazo de métodos de diseño empíricos por métodos de diseño basados en aproximaciones mecanicistas. El uso continuo de métodos empíricos requerirá investigaciones estadísticas costosas a medida que aparezcan nuevas configuraciones en los vehículos y nuevos desarrollos en los materiales.

Todo lo anterior lleva a la necesidad de profundizar en el conocimiento de los mecanismos de deformación de los materiales utilizados en carreteras, con la finalidad de entenderlos y establecer entonces métodos de diseño que incorporen tal conocimiento a diseños más apegados al comportamiento real de las estructuras de pavimento.

Es por esto que la presente publicación es una contribución al estudio de las deformaciones de suelos finos sometidos a carga cíclica, estudiando en particular la influencia de las condiciones de compactación en su comportamiento.

*El trabajo consta de 3 capítulos, como se presenta a continuación :*

El capítulo 1 comprende los conceptos relacionados a deformación permanente, tipos de deformación, así como también los criterios de falla que se manejan en diseño de pavimentos.

El capítulo 2 describe el procedimiento de prueba y el equipo triaxial utilizado en la determinación del comportamiento esfuerzo-deformación. En este mismo capítulo se presentan y analizan los resultados de pruebas de deformación.

En el capítulo 3 se presentan las conclusiones y recomendaciones más relevantes obtenidas a partir de los análisis efectuados en las diferentes partes que integran el trabajo.

Al final aparece la bibliografía.

# Capítulo 1      Conceptos Generales

---

## 1      *Tipos de deformación*

Es indiscutible que una acción de las más importantes sobre la sección estructural de un pavimento es la carga que aplican los vehículos que sobre ella transitan. Estos vehículos transmiten cargas que en casi todos los casos pueden considerarse como instantáneas ; los esfuerzos que se producen debido a ellas -y que se disipan gradualmente al profundizar en la sección estructural- provocan deformaciones cuya magnitud no necesariamente disminuye con la profundidad, sino que depende de la relación esfuerzo-deformación de cada uno de los materiales involucrados.

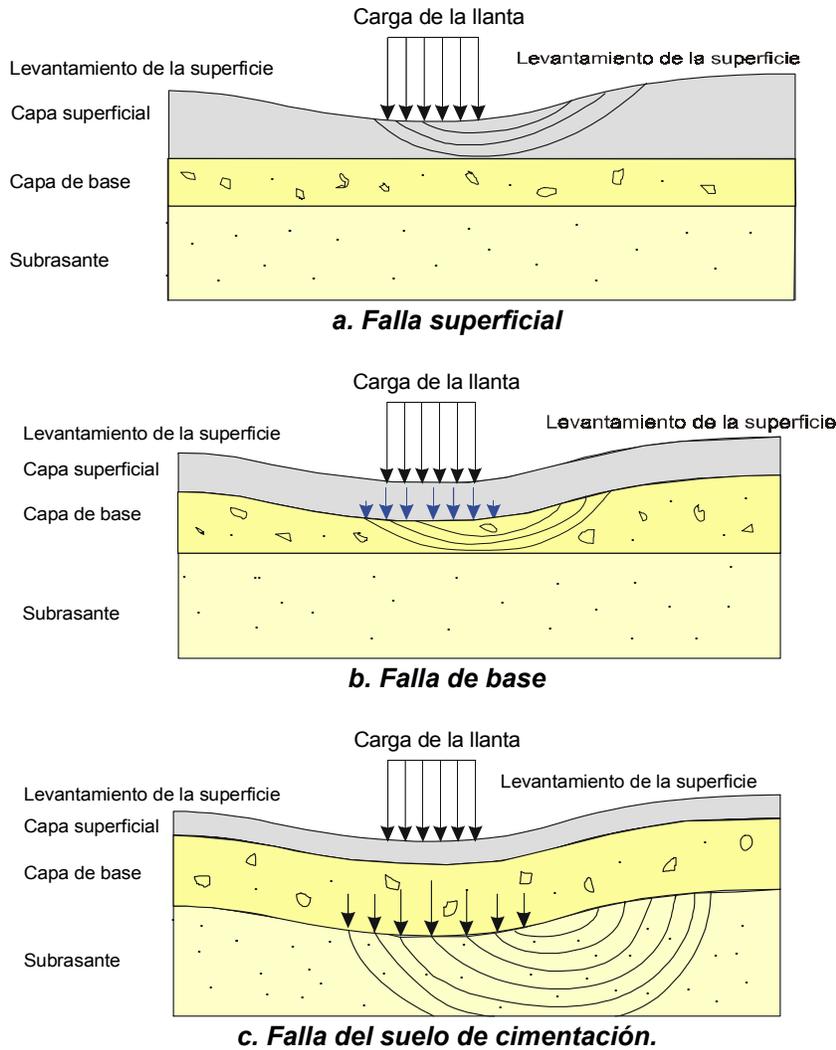
Si la carga es excesiva, sus aplicaciones repetidas ocasionarán agrietamientos que finalmente conducirán a un deterioro total del pavimento. La deformación del pavimento puede originarse por deformación elástica, por consolidación del terreno de cimentación y la infraestructura o por una combinación de deformación elástica y plástica. A continuación se definen cada una de ellas :

***Deformación elástica*** : Ocurre cuando una carga deforma temporalmente los materiales de la cimentación y comprime el aire que llena los huecos de la base, subbase y subrasante. Si la deformación fuera 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.

***Deformación por consolidación*** : Ocurre 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.

***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.

La Figura 1.1 ilustra las formas usuales en las que se producen las fallas de un pavimento. Cada uno es el resultado de un hundimiento producido por un esfuerzo cortante, acompañado por movimientos en las capas afectadas.



**Figura 1.1 Resultados de la deformación plástica en el suelo de cimentación, base y capa superficial (Según F.N. Hveem).**

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 (Ver figura 1.1).

## 2 Criterios de falla

Los tipos de fallas en los pavimentos son un factor importante en el diseño, desafortunadamente, muchas de ellas son causadas por deficiencias en los procedimientos de construcción, materiales que no cumplen con los requisitos de calidad, mantenimiento inadecuado, etc., y no debido a un mal diseño.

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. A continuación se explican ambos criterios.

### **2.1 Agrietamiento por fatiga**

El agrietamiento por fatiga se produce al interconectarse una serie de grietas causadas por fatiga de la carpeta asfáltica y sus componentes o de la base estabilizada bajo la repetición de cargas del tránsito. El agrietamiento se inicia en la parte inferior de la carpeta asfáltica donde los esfuerzos de tensión son mayores, después con la repetición de cargas del tránsito, las grietas se conectan y tienden a desarrollar patrones de agrietamiento como se muestra en la Figura 1.2. El agrietamiento por fatiga es considerado como una de las principales fallas en pavimentos.



**Figura 1.2 Agrietamiento por fatiga**

El criterio de falla relaciona el número de repeticiones de carga a la deformación por tensión basada en pruebas de fatiga de laboratorio en probetas de concreto asfáltico. Debido a la diferencia en geometría y condiciones de carga utilizadas en laboratorio, el número de repeticiones permitido en pavimentos es mucho más grande que el obtenido en pruebas de laboratorio, por lo tanto, el criterio de falla debe de incorporar un factor para tomar en cuenta esta diferencia.

#### **2.1.1 Modelos de fracturamiento por fatiga**

El concepto de daño acumulado, propuesto por Miner en 1945, se utiliza para predecir el fracturamiento por fatiga. Según este concepto, el número permisible

de repeticiones de carga está relacionado con el valor de la deformación por tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica. La cantidad de daño se mide por medio de lo que se denomina relación de daño, que es la relación entre los números de repeticiones esperadas y las permisibles.

La diferencia principal entre los métodos de diseño es la forma de la función de transferencia que relaciona las deformaciones de tensión ( $\epsilon_t$ ) en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, cuyo módulo de elasticidad es  $E_1$ , con un número de repeticiones admisibles ( $N_f$ ). Por ejemplo, los métodos de diseño de la Compañía Shell y del Instituto del Asfalto usan la expresión :

$$N_f = f_1 \epsilon_t^{-f_2} E_1^{-f_3} \quad (1)$$

donde  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$  son constantes que se determinan a partir de ensayos de fatiga llevados a cabo en el laboratorio y  $f_1$  se debe modificar posteriormente para correlacionarlo con el comportamiento observado en el campo.

Para una mezcla asfáltica estándar de diseño, la ecuación del Instituto del Asfalto para limitar a 20% el área afectada por el fracturamiento es :

$$N_f = 0.0796 \epsilon_t^{-3.291} E_1^{-0.854} \quad (2)$$

en tanto que en la Compañía Shell es :

$$N_f = 0.0685 \epsilon_t^{-5.671} E_1^{-2.363} \quad (3)$$

Dado que el exponente  $f_2$  es mayor que  $f_3$ , el efecto de  $\epsilon_t$  en  $N_f$  es más importante que el de  $E_1$ . Por ello, el término  $E_1$  puede llegar a omitirse y la ecuación puede simplificarse y quedar como :

$$N_f = f_1 \epsilon_t^{-f_2} \quad (4)$$

La ecuación anterior es utilizada por diversas instituciones. La Tabla 1.1 resume algunos de los valores de  $f_1$  y  $f_2$  propuestos por la literatura (Rico et al, 1998).

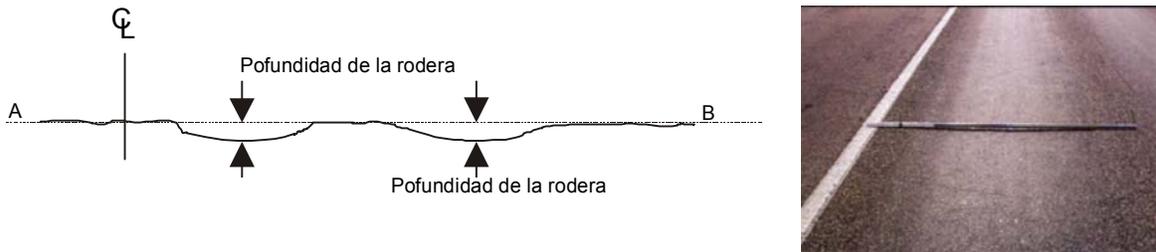
Institución	$f_1$	$f_2$
Departamento de Transporte de Illinois, USA	$5 \times 10^{-6}$	3.00
TRRL, UK.	$1.66 \times 10^{-10}$	4.32
BRRC, Bélgica	$4.92 \times 10^{-14}$	4.76

**Tabla 1.1 Resumen de algunos valores de  $f_1$  y  $f_2$**

**2.2 Deformación permanente (Roderas)**

En la última década, las roderas (deformaciones permanentes) han sido causa de muchos problemas que se tienen en carreteras. El incremento de la presión de las llantas, cargas por eje de los vehículos y la canalización o paso constante en un mismo eje longitudinal de la sección del pavimento son algunas de las causas de estos problemas.

Las roderas son usualmente causadas por la consolidación o movimiento lateral de los materiales, causado por el tránsito (Tyler Miller, Khaled Ksaibati, 1995). Estas se desarrollan gradualmente en los materiales del pavimento a medida que el número de repeticiones de carga se incrementa, usualmente aparecen como depresiones longitudinales en las huellas de las llantas acompañadas por pequeños levantamientos a los lados (Figura 1.3). Esto es causado por la combinación de densificación (decremento de volumen y un incremento en el peso específico) y deformación por corte y puede ocurrir en una capa o en todas las capas del pavimento, incluyendo la subrasante.



**Figura 1.3 Deformación permanente (Roderas)**

**2.2.1 Modelos de deformación permanente**

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 los métodos de diseño del Instituto del Asfalto y de la Compañía Shell, el número de repeticiones admisibles  $N_d$  -para limitar las deformaciones permanentes- se relaciona con la deformación vertical de compresión  $\epsilon_c$  en la fibra superior de la subrasante, con la ecuación de tipo :

$$N_d = f_4 \epsilon_c^{-f_5} \tag{5}$$

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 1.2 se muestran los valores típicos de  $f_4$  y  $f_5$  utilizados por diversas instituciones (Rico et al, 1998).

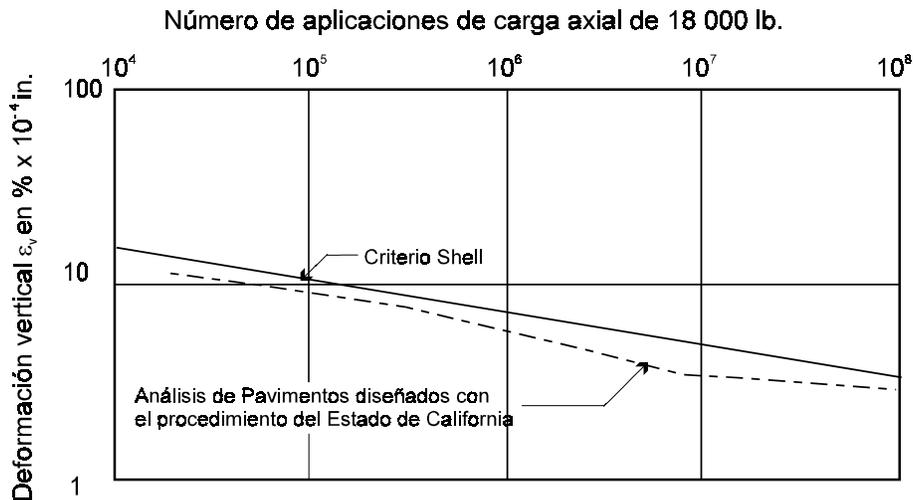
Institución	$f_4$	$f_5$
Compañía Shell		
50% de confiabilidad	$6.15 \times 10^{-7}$	4.0
85% de confiabilidad	$1.94 \times 10^{-7}$	4.0
95% de confiabilidad	$1.05 \times 10^{-7}$	4.0
Instituto del Asfalto	$1.365 \times 10^{-9}$	4.477
TRRL, U.K.		
85% de confiabilidad	$6.18 \times 10^{-8}$	3.97
BRRC, Bélgica	$3.05 \times 10^{-9}$	4.35

Nota: El Instituto del Asfalto especifica una profundidad máxima de rodadura de 12.7 mm y el TRR de 10.16 mm.

**Tabla 1.2 Valores de  $f_4$  y  $f_5$**

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.

Como ejemplo de los criterios de minimización de la deformación permanente son los desarrollados por Dorman y Metcalf (Criterio Shell) y otro por Monismith y McLean. Estos criterios se muestran en la Figura 1.4. Estos pueden ser utilizados para determinar (aproximadamente) la deformación permanente en la subrasante, la cual no causará una rodadura excesiva en la superficie del pavimento.



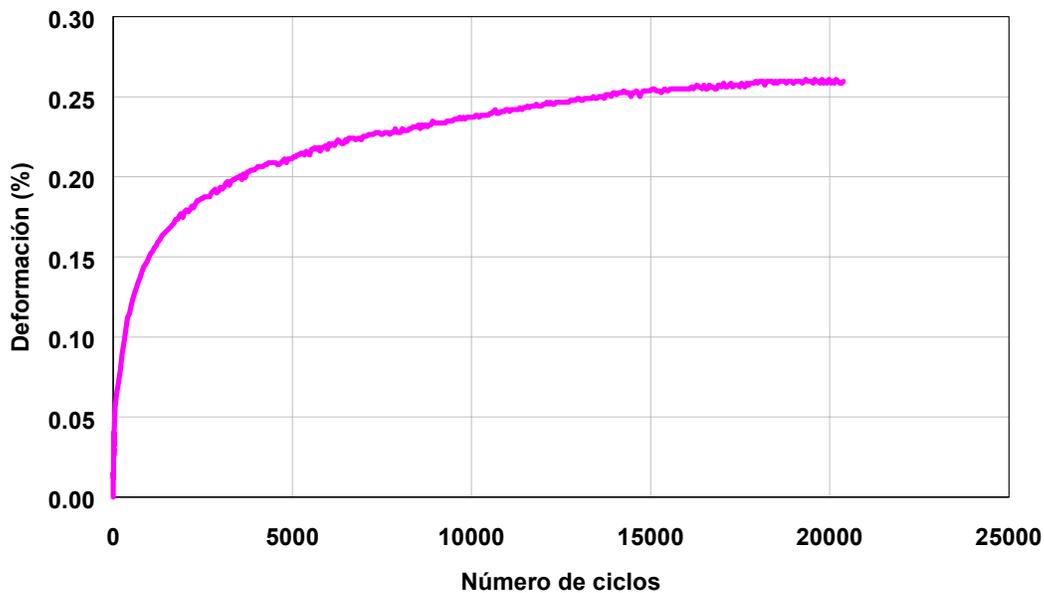
**Figura 1.4 Criterios de minimización de la profundidad de la rodera**

**2.3 Factores que determinan la deformación permanente**

Los factores que determinan la deformación permanente (rodera) son los siguientes :

**1 Estado de esfuerzos del suelo.** Seed et al (1955), Monismith et al (1975) y Brown et al (1977) mostraron que el esfuerzo desviador ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ) 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 incremento en la deformación plástica. Esto significa que  $\sigma_3$  es un factor secundario (Dingqing Li y Selig Ernest T., 1996).

**2 Número de aplicaciones del esfuerzo desviador.** De los ensayos llevados a cabo en carga repetida, se ha observado que la acumulación de la deformación permanente presenta prácticamente tres etapas en su evolución (Figura 1.5): la primera es casi instantánea, la cual se presenta en los primeros ciclos de carga. Enseguida se observa la fase que puede calificarse como transitoria, en la que la deformación se acumula gradualmente durante los ciclos de aplicación de la carga ; y finalmente, se tiende a un estado estable en el que la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeña ; a partir de este momento, la aplicación de un número mayor de ciclos de carga ya no tiene mucho efecto en la acumulación de la deformación. La descripción anterior corresponde al mecanismo típico de acumulación de la deformación en suelos finos sujetos a carga cíclica.



**Figura 1.5 Evolución típica de las deformaciones.**

**3 Estado físico del suelo** (contenido de agua y peso específico seco). Este punto se verá más claramente en el próximo capítulo en donde se explican más a detalle algunos de los factores.

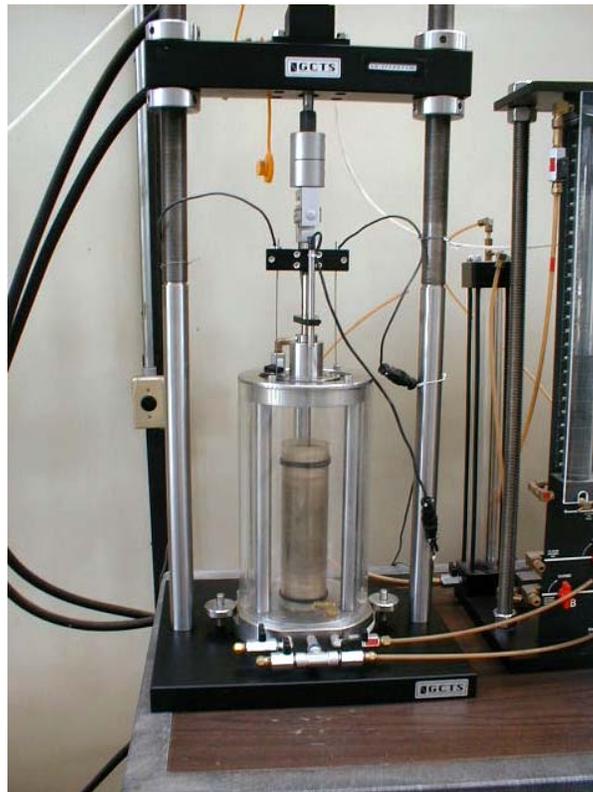
**4 Tipo de suelo.** Depende de la estructura del suelo y del método de compactación que se utilice, así como de la energía de compactación que se le aplique.

# Capítulo 2 Comportamiento observado en el estudio experimental

---

## 2.1 Procedimiento de prueba

El sistema de carga triaxial (Foto 1) utilizado en este estudio fue diseñado, entre otras funciones, para llevar a cabo pruebas bajo carga repetida, lo que intenta simular el estado de esfuerzos producido por varios vehículos en movimiento. Gergan (1972) demostró que los datos obtenidos de este tipo de pruebas dan resultados más cercanos al comportamiento de los materiales en campo.



Fotografía 1 Equipo triaxial

## 2.2 Descripción y propiedades del material utilizado

El material es representativo de los suelos arcillosos que se encuentran comúnmente en el terreno de cimentación del pavimento y en algunas ocasiones en la capa de subrasante.

Las propiedades índice determinadas y la clasificación del suelo -de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)- se muestran en la siguiente tabla :

<b>Clasificación SUCS</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP(%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>CL(%)</b>	<b>Ss</b>
CH	56	24	32	17	2.55

**Tabla 2.1 Propiedades índice del material y su clasificación**

### ***2.2.1 Preparación de los especímenes para pruebas de deformación y módulo de resiliencia***

Para determinar las características de deformación es necesario desarrollar pruebas en muestras que tengan las mismas propiedades -o tan cercanas como sea posible- a las condiciones a las que estará sujeto el material en campo. Esto involucra la preparación de muestras teniendo no solamente el mismo peso específico y contenido de agua, sino también el arreglo estructural que adquieren las partículas del suelo.

La estructura de los suelos compactados depende no sólo del contenido de agua de compactación, peso específico seco y método de compactación ; sino que varía también con el tiempo. Además, el peso específico y el contenido de agua varían con el tiempo. Por lo tanto, la selección de las condiciones apropiadas para la determinación el comportamiento esfuerzo-deformación de un material es un aspecto muy importante.

A continuación se presenta el procedimiento de prueba por medio del cual se determinaron las características de deformación del suelo estudiado.

#### **1 Muestreo**

El muestreo fue de tipo alterado. El material obtenido fue cuarteado y cribado por la malla No.4.

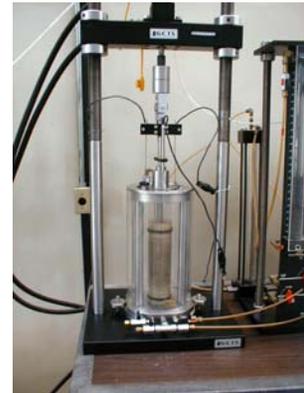
#### **2 Tiempo de curado**

Una de las variables del procedimiento de preparación es el tiempo de curado del material, que es el lapso comprendido entre el momento en que se añade el agua a la muestra y el momento de compactación; éste es necesario para distribuir uniformemente el agua en el suelo. Para la mayoría de los suelos se recomienda fijar como tiempo de curado un día (Mendoza, 1986).

### 3 Probetas

Todas las probetas utilizadas en el estudio se compactaron por medio de impactos, en cada una de ellas se varió el contenido de agua; lo que trae como consecuencia un cambio en el peso volumétrico. Los puntos siguientes son los que se siguieron al compactar las muestras.

- Se compacta el espécimen en un molde metálico de 7.1 cm de diámetro y 14.4 cm de altura. El molde está constituido por dos piezas, las cuales van atornilladas a una base mediante cuatro tornillos Allen.
- Se coloca el material de la primera capa en el molde, se compacta con cierta energía de compactación y así sucesivamente para cada una de las capas. El peso del pisón utilizado fue de 990 g y 13.6 cm de altura de caída.
- Después de compactar quinta capa, se enrasa y se pesa el conjunto muestra-molde.
- Se extrae la muestra del molde y se pesa; se toman sus dimensiones para obtener el área y volumen de la misma, y así determinar su peso volumétrico.



### 4 Tiempo de reposo

Cuando la realización de algún ensaye -para determinar propiedades mecánicas- ocurre tiempo después de compactar el suelo, las propiedades de éste sufren cambios importantes con respecto a los especímenes que se prueban

inmediatamente después de compactarlos. Para este caso, las muestras fueron probadas inmediatamente después de la compactación.

## **5 Prueba**

Se coloca la muestra en el marco de carga del equipo triaxial, en el cual se somete a los siguientes ensayos :

- Ensaye de deformación permanente con 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 subrasante.
- Ensaye de módulo de resiliencia de acuerdo con la secuencia propuesta por SHRP (Garnica, et al 2000).

Terminados los ensayos anteriores, se desmonta la muestra para determinar el contenido de agua de compactación así como el peso específico seco de la misma.

### **2.3 Deformaciones permanentes**

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. Se ha visto que las cargas repetidas afectan a los suelos en una gran variedad de formas, incluyendo excesiva deformación plástica .

El propósito de la presente investigación es estudiar la influencia de la humedad y del peso específico seco en la deformación permanente acumulada cubriendo con las muestras ensayadas un área definida en el espacio de compactación.

A continuación se presentan y discuten los resultados de los ensayos realizados, así como también el análisis estadístico generado mediante superficies de respuesta.

#### **2.3.1 Mecanismo de acumulación de la deformación permanente**

Cuando un espécimen de suelo se somete a un proceso de deformación bajo carga cíclica, se observa un comportamiento como el de la Figura 2.1.

En dicha figura se presentan la evolución de la deformación total y permanente con el número de ciclos, esto para un esfuerzo vertical de  $\sigma_d = 69$  kPa y un esfuerzo de confinamiento  $\sigma_3 = 13.8$  kPa.

Se observa que la acumulación de la deformación permanente (Ver Figura 2.1) presenta prácticamente tres etapas en su evolución: la primera es casi instantánea, la cual se presenta en los primeros ciclos de carga. Enseguida se observa la fase que puede calificarse como transitoria, en la que la deformación se acumula gradualmente durante los ciclos de aplicación de la carga ; finalmente, se tiende a un estado estable en el que la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeña ; a partir de este momento, la aplicación de un número mayor de ciclos de carga ya no tiene mucho efecto en la acumulación de la deformación.

La descripción anterior corresponde al mecanismo típico de acumulación de la deformación en suelos finos sujetos a carga cíclica.

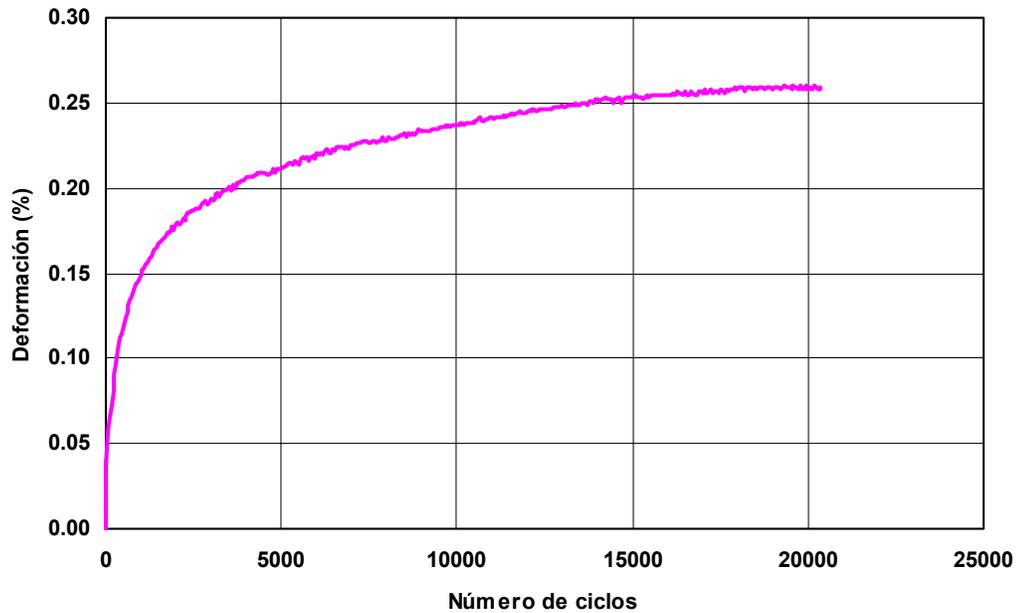


Figura 2.1 Evolución típica de la deformación permanente acumulada para el material en estudio

### 2.3.2 Influencia de las condiciones de compactación en la acumulación de la deformación permanente

A continuación se presenta una breve discusión en la que se indica el efecto de las condiciones de compactación, para lo cual se hará referencia a las muestras A, B, C, D, E, F, G y H (Tabla 2.1).

Prueba	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_p$ (%)
A	18.40	12.96	0.07
B	35.37	12.95	0.54
C	20.23	14.49	0.09
D	20.10	12.31	0.11
E	19.73	13.60	0.07
F	25.30	12.97	0.18
G	28.64	13.66	0.22
H	30.15	13.01	0.29

Tabla 2.1 Características de ensayos realizados

En la Figura 2.2 se presentan las características de deformación permanente acumulada para las muestras A y B.

La muestra B fue compactada con un contenido de agua de 35.37% (rama húmeda) y energía de compactación de 600 kN-m/m<sup>3</sup>, en esta muestra se obtuvo un peso específico seco de 12.95 kN/m<sup>3</sup>. La deformación permanente acumulada al final de la prueba fue de 0.54%, mientras que la muestra A fue compactada con un contenido de agua de 18.40% (rama seca) y una energía de compactación de 710 kN-m/m<sup>3</sup>, se obtuvo un peso volumétrico seco de 12.96 kN/m<sup>3</sup>. La deformación permanente acumulada obtenida fue de 0.07%. Es importante hacer notar que la deformación que presenta la muestra A es apenas una décima parte de la que presenta la muestra B.

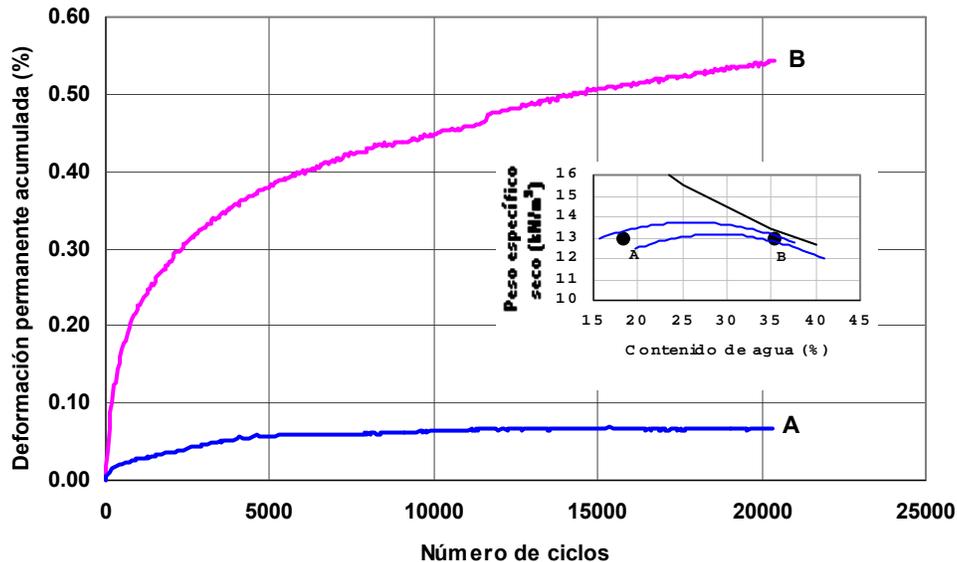
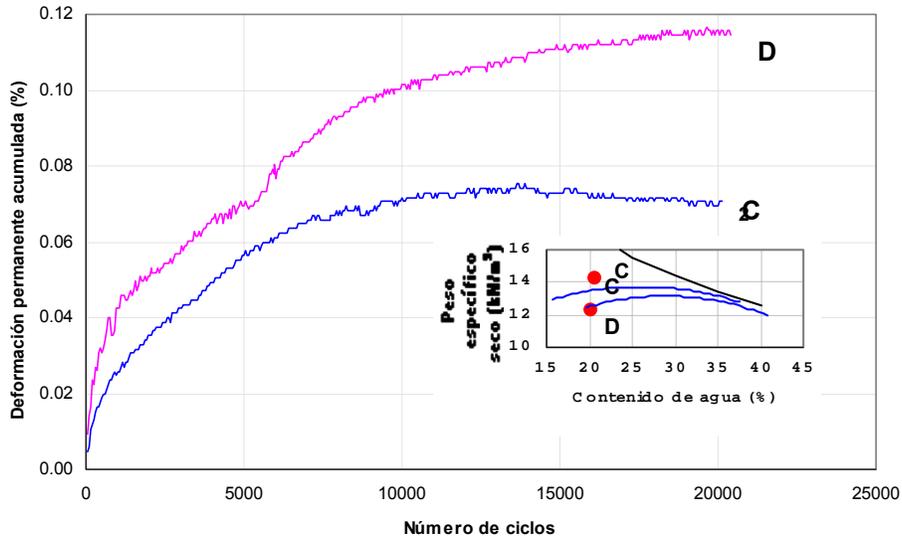


Figura 2.2 Ubicación de puntos en rama seca y rama húmeda

En la Figura 2.3 se presentan los resultados de deformación permanente acumulada de dos muestras compactadas aproximadamente con el mismo contenido de agua pero con diferentes energías de compactación.

En este caso, la muestra C fue compactada con un contenido de agua de 20.23% y la muestra D fue compactada con un contenido de agua de 20.10%. La diferencia en contenido de agua en ambas muestras es de 0.13%. Se observa como la muestra D, que tiene un menor peso volumétrico, se deforma más que la muestra que tiene un peso volumétrico mayor.



**Figura 2.3 Ubicación de dos puntos aproximadamente con el mismo contenido de agua**

La Figura 2.4 presenta las curvas de deformación permanente para dos muestras compactadas en el lado seco de ambas curvas de compactación (Próctor estándar -F- y Próctor modificada -E-). En este caso se aprecia cómo la muestra compactada con energía Próctor estándar y la cual se compactó con contenido de agua mayor presenta nuevamente mayor deformación.

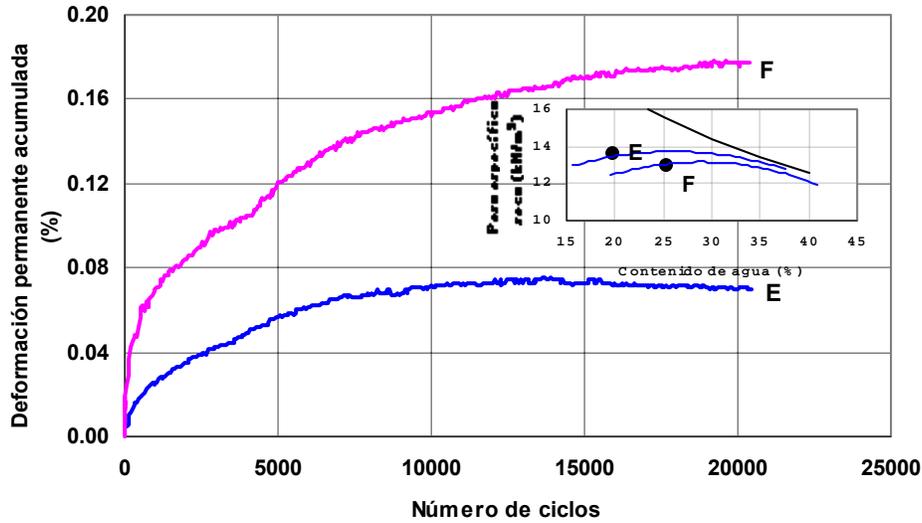


Figura 2.4 Ubicación de dos muestras en la zona seca de las curvas de compactación

El comportamiento de dos puntos localizados aproximadamente en los óptimos de ambas curvas de compactación es similar al presentado anteriormente. A mayor contenido de agua de la muestra se tiene mayor deformación permanente (Figura 2.5).

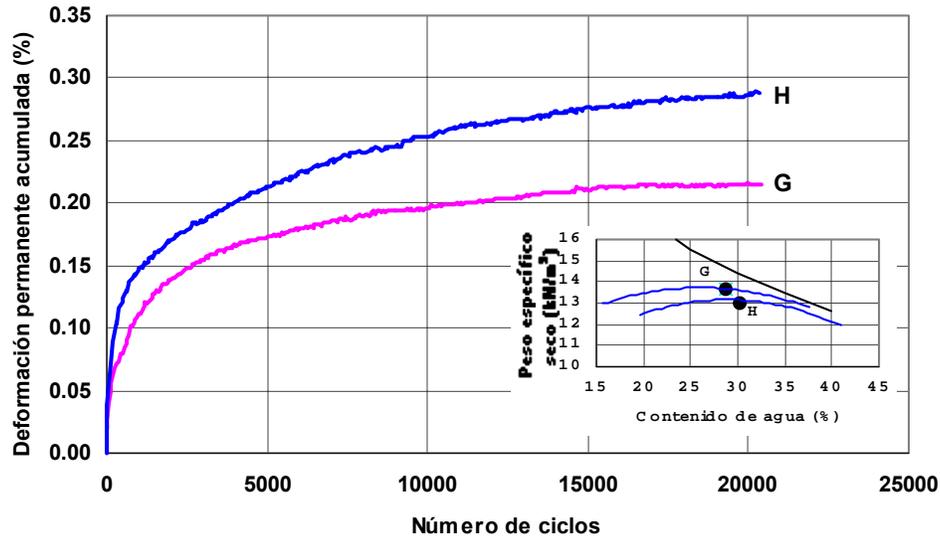


Figura 2.5 Ubicación de dos puntos en los óptimos de las curvas de compactación

De lo comentado anteriormente, se concluye que el contenido de agua tiene un efecto relevante en la acumulación de la deformación permanente de especímenes ensayados bajo carga cíclica.

Las curvas comentadas en párrafos anteriores son típicas del comportamiento esfuerzo-deformación de suelos arcillosos como el estudiado en este caso.

### 2.3.3 Análisis de resultados mediante superficies de respuesta

La Figura 2.6 presenta los valores de la deformación acumulada para cada una de las condiciones de compactación consideradas. Los pesos volumétricos oscilan entre 12 y 15 kN/m<sup>3</sup> y los contenidos de agua entre 14 y 36%. La deformaciones permanentes unitarias registradas están comprendidas entre 0.07 y el 1%. Como referencia se indican en la misma figura las curvas de compactación Próctor estándar y Próctor modificada.

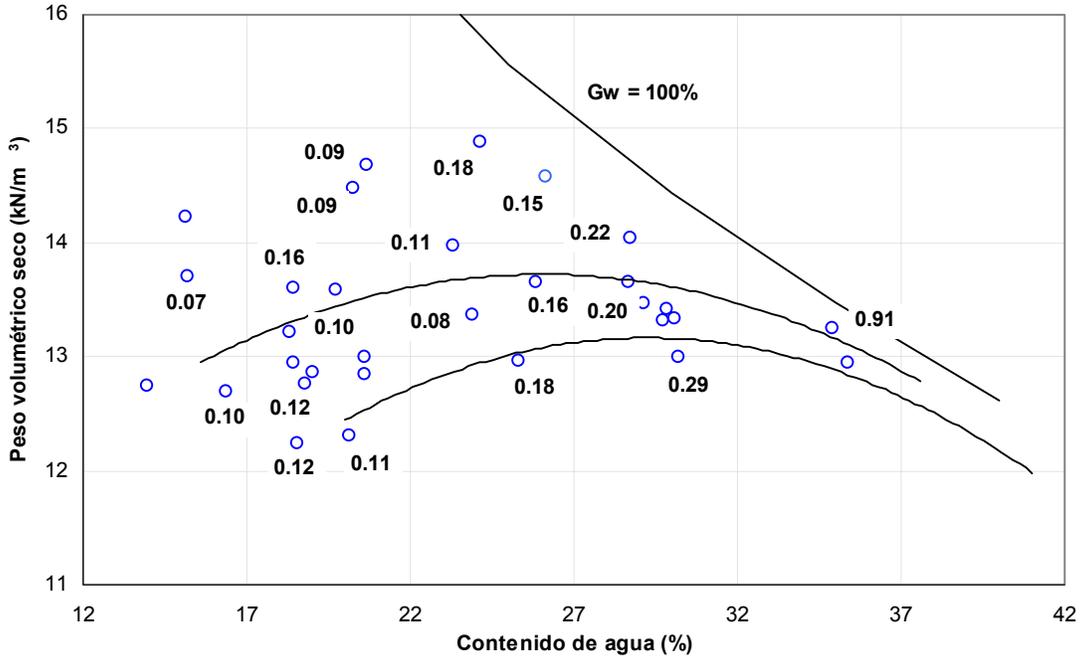


Figura 2.6 Datos de deformación permanente para los ensayos realizados

Tomando como base los puntos que se indican en la figura anterior, se generaron líneas isocaracterísticas de igual deformación permanente como se muestran en la Figura 2.7.

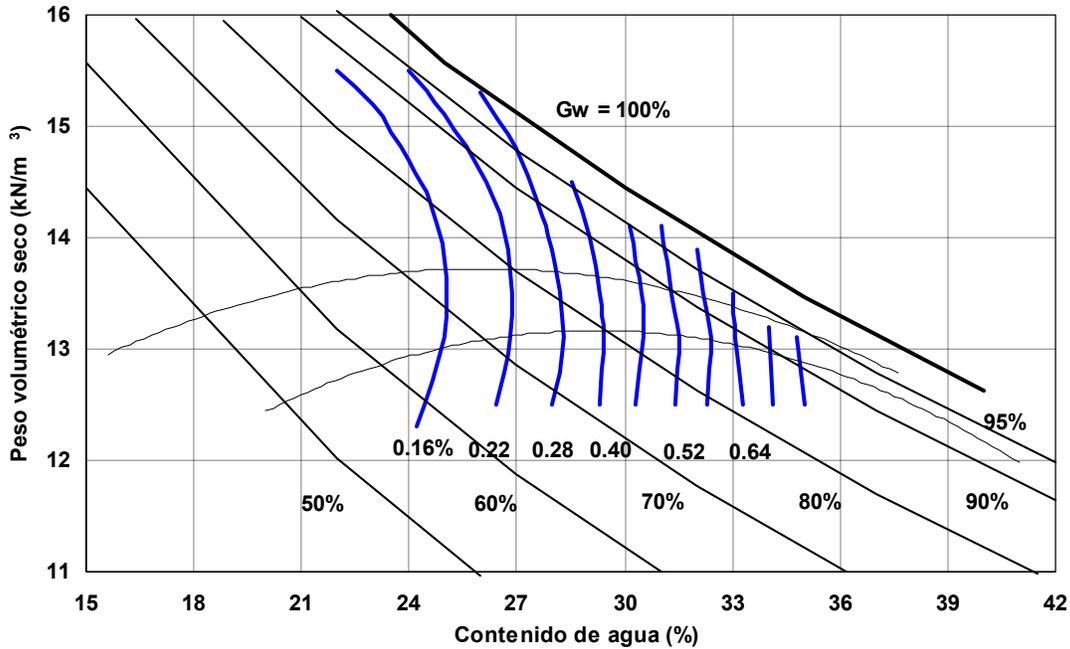


Figura 2.7 Líneas isocaracterísticas de deformación unitaria permanente

La figura 2.7 muestra claramente la influencia del contenido de agua de compactación y del peso volumétrico seco en la magnitud de la deformación permanente que se genera. De hecho, se observa que las curvas tienden a la vertical indicando una influencia más importante del contenido de agua de compactación. Es claro que la magnitud de la deformación acumulada aumenta al hacerlo el grado de saturación, en especial después de los óptimos de compactación (Figura 2.8). Una observación similar fue hecha por Seed et al (1962), para el caso de las deformaciones resilientes.

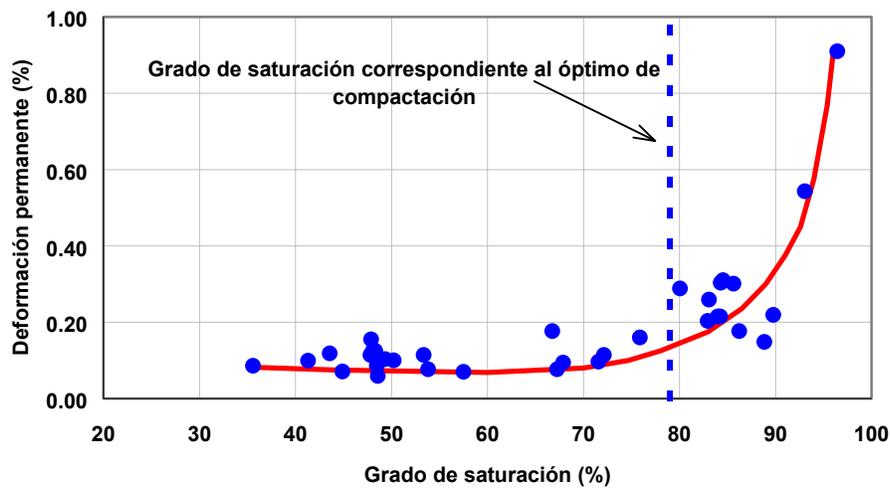
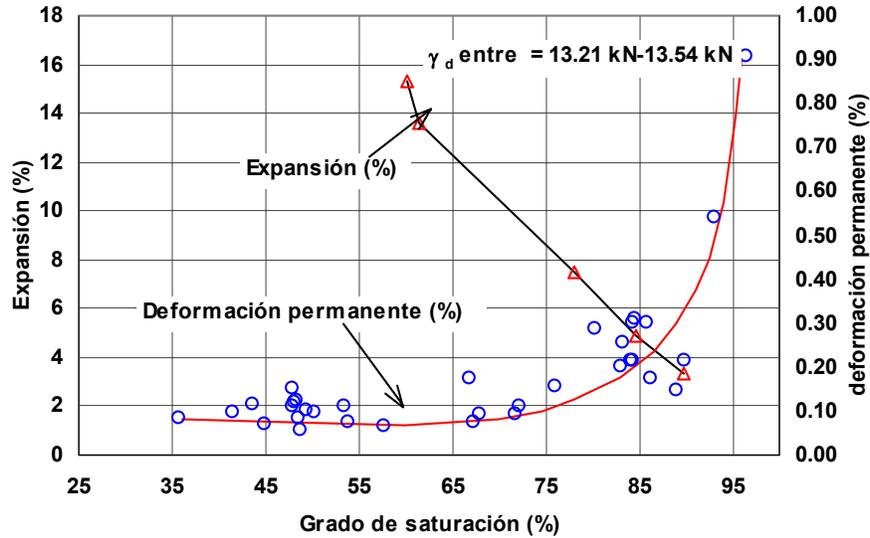


Figura 2.8 Comportamiento de la deformación permanente respecto al grado de saturación

Aunque es evidente que en cuanto a deformaciones permanentes se refiere, es conveniente compactar con grados de saturación inferiores al óptimo, hay que tomar en cuenta la posible expansividad del suelo.

Por ejemplo, en la Figura 2.9 se muestra el comportamiento de la deformación permanente y del porcentaje de expansión. Se puede observar que mientras la deformación permanente se incrementa al aumentar el grado de saturación, la expansión tiende a disminuir a medida que el grado de saturación aumenta.



**Figura 2.9 Tendencias de la deformación permanente y la expansión con el grado de saturación**

Así entonces, es recomendable evitar la presencia de suelos finos expansivos en lo posible en las capas que conforman la sección estructural de un pavimento (Rico, et al). En los casos en que no sea posible, será necesario un compromiso en lo que al contenido de agua de compactación se refiere, para minimizar tanto las deformaciones por expansión como las permanentes por el tránsito vehicular.

## Capítulo 3 Conclusiones y Recomendaciones

---

- Se observa que la acumulación de la deformación permanente presenta prácticamente tres etapas en su evolución: la primera es casi instantánea, la cual se presenta en los primeros ciclos de carga; enseguida se observa la fase que puede calificarse como transitoria, en la que la deformación se acumula gradualmente durante los ciclos de aplicación de la carga ; y finalmente, se tiende a un estado estable en el que la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeña ; a partir de este momento, la aplicación de un número mayor de ciclos de carga ya no tiene mucho efecto en la acumulación de la deformación.
- El rango de deformaciones obtenidas en el suelo estudiado fue de 0.07 % a 1%, lo que confirma que el problema de las deformaciones producidas en pavimentos por la aplicación de cargas del tránsito sean de pequeña escala o magnitud comparada con otro tipo de estructuras.
- De las curvas isocaracterísticas de deformación obtenidas, se observó que la variable de mayor influencia es el contenido de agua.
- La magnitud de la deformación parece acelerarse a grados de compactación mayores a los óptimos.
- La deformación depende claramente de las condiciones de compactación.

### ***De todo lo anterior se recomienda :***

- 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.
- Es conveniente hacer una clasificación de suelos comúnmente utilizados en la estructuración de pavimentos en función del parámetro deformación permanente.
- Profundizar en la relación que guarda la deformación permanente generada y el nivel del esfuerzo aplicado con respecto al de la falla por cortante.
- Se requerirá un estudio acerca de la influencia de la frecuencia tanto en la deformación permanente como en el módulo de resiliencia, ya que sobre esto no se reportan datos suficientes para poder llegar a una conclusión.

- Evitar en lo posible la utilización de suelos expansivos en las capas que conforman la sección estructural de los pavimentos, ya que las deformaciones por expansión pueden superar a las permanentes inducidas por el tránsito vehicular.
- El Instituto Mexicano del Transporte está consciente de la problemática tratada y de que se requiere mucho más experimentación sobre el tema para poder relacionar el comportamiento de materiales ensayados en laboratorio y el comportamiento de éstos en campo, lo cual se traducirá en mejores diseños, construcción, rehabilitación y un mejor comportamiento a lo largo de la vida útil del pavimento.

## Bibliografía

---

Brown, S. F, (1996). "Soil Mechanics in Pavement Engineering". Geotechnique 46, No. 3. Pp. 383-426.

Brown, S. F, (1994). "Behaviour of Layered Systems under Repetitive Loading". XIII ICSMFE. New Delhi, India, pp. 321-325.

Garnica, P. A, et al (2000). "Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares". Publicación técnica 142. Instituto Mexicano del Transporte.

Hewes, Laurence I. and Oglesby Clarkson H, (1958). "Highway Engineering". New York.

Huang, Yang H, (1993). "Pavement Analysis and Design". University of Kentucky. Prentice Hall, Inc.

Lentz, W. Rodney and Baladi Gilbert Y, (1981). "Constitutive Equation for Permanent Strain of Sand Subjected to Cyclic Loading". Transportation Research Record 810, pp. 50-54.

Li, Dingqing and Selig Ernest T, (1996). "Cumulative Plastic Deformation for Fine-Grained Subgrade Soils". Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 122, No. 12.

Monismith, C.L., et al (1975). "Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading". Transportation Research Record No. 537, Washington, D.C., pp. 1-38.

Monismith, C. L, (1992). "Analytically Based Asphalt Pavement Design and Rehabilitation : Theory to Practice, 1962-1992". Transportation Research Record 1354, pp. 5-26.

Oglesby, Clarkson H. and Hewes Laurence I, (1980). "Ingeniería de Carreteras". México.

Orozco y Orozco, J. M, (1986). "Selección de Materiales para la Sección Estructural de Carreteras y Vías Férreas". Memoria de la Tercera Reunión Hispano Mexicana de Técnicos en Vías Terrestres. México., pp. 177-186.

Orozco Santoyo, R.V, (1989). "Prevención de la fatiga en pavimentos flexibles". Revista Técnica de la Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres. México.

Pandey, B.B., et al (1987). "A Pneumatically Operated Laboratory Apparatus for Testing Soils under Repeated Loading". Indian Geotechnical Journal.

Rico R, Alfonso, Del Castillo M, Hermilo, (1992). " La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres". Volumen 2.

Rico, R. A., Téllez, G. R., Garnica, A.P. (1998). " Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias". Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 104. Querétaro.

Rico, R. A., Orozco, J.M., Téllez, G. R., Pérez, G. A. (1991). " Manual de calidad de los materiales en secciones estructurales de pavimentos carreteros". Instituto Mexicano del Transporte. Documento Técnico No. 1. Querétaro.

Ruz V, Francisco, (1986). " Características de Materiales para la Sección Estructural de Carreteras". Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, A.C. VII Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres. Querétaro.

Seed, H.B. et al (1955). "Effects of Repeated Loading on the Strength and Deformation of Compacted Clay". Annual Meeting of the Highway Research Board, Washington, D.C.

Seed, H.B. et al (1967). "Prediction of Flexible Pavement Deflections from Laboratory Repeated-Load Test". Highway Research Board. Report 35.

Sosa Garrido, Roberto, (1986). "Dimensionamiento de las Estructuras Viales". XIII Reunión de Mecánica de Suelos. Vol. 1. Mazatlán.

Vásquez, Carlos, (1996). "Criterios y Factores en el Diseño de Pavimentos Flexibles". Boletín de Vías No. 86. Vol XXIII., pp. 6-15.

Yoder, E.J. and Withczak M. W, (1975). " Principles of Pavement Design". United States of America.

Zafir, Zia, et al (1994). "Dynamic Pavement-Strain Histories from Moving Traffic Load". Journal of Transportation Engineering. Vol 120. No. 5.