

Evaluación de la curva característica en trayectoria de secado y su aplicación en el modelo climático integrado de la guía de diseño AASHTO empírico-mecanicista

Natalia Pérez García y Paul Garnica Anguas
Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México



RESUMEN:

Este artículo resume de forma general cómo la nueva guía de diseño de pavimentos empírico-mecanicista 2002 hace uso de las curvas características en trayectoria de secado para obtener la variación del módulo de resiliencia con el tiempo debido a cambios en el contenido de agua. Posteriormente se muestran las curvas características en trayectoria de humedecimiento y secado para tres tipos de suelo clasificados como CL, CL-ML y SM de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, de las curvas se observa que el área entre la curva de humedecimiento y secado va a depender bastante del tipo de suelo. Se muestra, además, que la curva característica obtenida con la correlación que hace uso del parámetro wPI puede ser muy diferente a la obtenida con datos de laboratorio.

ABSTRACT:

This paper describes in a general way how the new AASHTO Design Guide uses the soil water characteristic curve obtained from a drying path to generate the changes of the resilient modulus due to changes in water content. In addition, it is shown three soil water characteristic curves on drying and wetting paths for three soil types classified as CL, CL-ML and SM according to the Unified Soil Classification System. From the curves it is observed that the area between the drying and wetting paths seems to depend on the soil type. It is also shown that the soil water characteristic curve obtained based on the wPI parameter differs to that obtained with laboratory data.

1 INTRODUCCIÓN

Cuando se construye un pavimento, cada uno de los materiales que forman la estructura se compactan de acuerdo a los requisitos especificados por el organismo regulador (en el caso de México es la Secretaría de Comunicaciones y Transportes). Por ejemplo, a continuación se listan las condiciones de compactación de algunas capas que se utilizan en una sección de pavimento flexible:

	Grado de compactación (%)
○ Terraplenes	90 ± 2 (AASHTO estándar)
○ Subrasante	100 ± 2 (AASHTO estándar)
○ Subbase	100 mín (AASHTO mod.)
○ Base	100 mín (AASHTO mod.)

Una vez que se compactan los materiales en campo, éstos tendrán propiedades iniciales que variarán con tiempo debido a factores tales como las variaciones en las condiciones ambientales, las cargas aplicadas por el tránsito, derrames de combustibles, etc. En este documento sólo se tratará el efecto del agua.

Por la forma en la que se estructura el pavimento, es decir, la calidad de los materiales se reduce a medida que se incrementa la profundidad, los dos factores climáticos que más daño provocan a la estructura son la temperatura y las variaciones de agua. Por siglos el hombre ha observado que el agua tiene un efecto perjudicial en el comportamiento de los pavimentos ya que acelera la aparición de fallas tales baches,

deformaciones, agrietamientos, etc. Por tanto, se ha tenido la necesidad de que los métodos de diseño de pavimentos tomen en cuenta el efecto de posibles incrementos en los contenidos de agua de los materiales granulares y finos, éstos últimos son los han adquirido mayor importancia ya que se ha observado que gran parte de la deformación o deflexión que se genera en la superficie del pavimento se debe a la subrasante o terreno de cimentación que en muchos casos está formada por este tipo de suelos.

2 FUENTES DEL AGUA QUE AFECTA AL PAVIMENTO

Tomando en cuenta la forma en la que se estructura un pavimento, además de su localización, las fuentes de agua pueden ser las siguientes (Rao, 1997):

- Las fluctuaciones del nivel freático se pueden presentar debido a épocas de secas o de lluvias prolongadas.
- Filtraciones por la superficie del pavimento aún cuando el pavimento se diseña para que sea una superficie impermeable. En algunas ocasiones la aparición de grietas o de baches aceleran la entrada de agua y como consecuencia la resistencia de los materiales se reduce.
- Cuando las pendientes del terreno a los costados del pavimento no son adecuadas, el agua tiende a anegarse, lo cual crea otra fuente de agua para los

materiales del pavimento, entonces, el flujo de agua que se pueda presentar dependerá de la succión que se tenga en los materiales que conforman las capas inferiores del pavimento.

3 EL AGUA Y EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Uno de los materiales en los más se ha estudiado el efecto del agua son los materiales de subrasante. Por ejemplo, en la ecuación de diseño de la guía AASHTO de 1986 o 1993 ya se considera que el parámetro que toma en cuenta la rigidez del material es el módulo de resiliencia el cual puede variar estacionalmente. Entonces, a partir de los valores que se tienen para cada una de las estaciones del año o mensualmente se puede calcular un módulo de resiliencia efectivo que es el que se utiliza en el diseño.

En los métodos empírico-mecanicistas de diseño se toman en cuenta un mayor número de factores ambientales en el diseño. La Figura 1 muestra algunos de ellos.

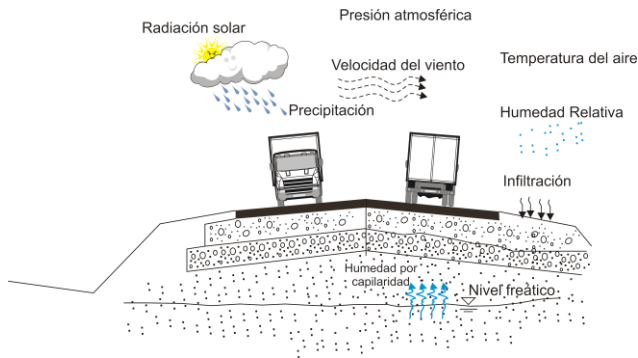


Figura 1. Factores adversos al pavimento (modificado de Quintero, 2007)

Para llevar a cabo la determinación del efecto de temperatura y variaciones de agua en el diseño, la guía empírico-mecanicista hace uso del modelo climático integrado mejorado (EICM). Para poder definir el modelo de variación del módulo de resiliencia debido a variaciones en contenido de agua que se utilizarían en el EICM primeramente llevó a cabo la recopilación bibliográfica de los modelos existentes. De ese estudio se encontró que el modelo que simulaba este comportamiento era el que se expresa en la ecuación (1) si es en términos de contenido de agua o con la (2) si es en términos de grado de saturación:

$$\log \frac{M_r}{M_{ropt}} = k_w (w - w_{opt}) \quad (1)$$

$$\log \frac{M_r}{M_{ropt}} = k_w (S - S_{opt}) \quad (2)$$

donde: M_r = módulo de resiliencia para grado el contenido de agua (w), M_{ropt} = es el módulo de

resiliencia en condiciones óptimas, k_w = es la pendiente de la gráfica $\log(M_r/M_{ropt})$ contra $(w-w_{opt})$ o $(S-S_{opt})$, S = es el grado de saturación y S_{opt} = es el grado de saturación en condiciones óptimas.

Después de llevar a cabo una nueva revisión de los modelos se llegó a la conclusión que un modelo sigmoideal era el más adecuado ya que éste se comporta aproximadamente lineal en el rango de $\pm 30\%$ del grado de saturación y se mantiene constante para grados de saturación menores a 30% con respecto al óptimo. La ecuación propuesta es:

$$M_r = 10^{\frac{a + \frac{b-a}{1 + \exp(\beta(k_w(S - S_{opt})) - 1)}}}{\beta(k_w(S - S_{opt})) - 1}} \cdot M_{ropt} \quad (3)$$

donde: a = valor mínimo de $\log(M_r/M_{ropt})$, b = valor máximo de $\log(M_r/M_{ropt})$, β = parámetro de localización y es igual al $\ln(-b/a)$.

En la guía se proponen valores para a , b y β .

De acuerdo a la ecuación anterior y conociendo los valores de a , b y β , se puede predecir el módulo de resiliencia a cualquier grado de saturación dados el grado de saturación en el óptimo y módulo de resiliencia para la misma condición.

Para poder aplicar el modelo anterior primeramente se debe predecir las posibles variaciones del grado de la saturación. Para esto y dependiendo de qué nivel de la guía se utilice (1, 2 o 3). Por ejemplo para el primer nivel se requiere de introducir los parámetros de ajuste de la SWCC obtenidos con el modelo de Fredlund o Xing o los datos de succión contra grado de saturación obtenidos en laboratorio. Para el segundo y tercer nivel, se hace uso de correlaciones para la obtención de la SWCC. De los parámetros necesarios en el segundo y tercer nivel son el D_{60} de la curva granulométrica para suelos no plásticos y el wPI (pasa la malla 200 multiplicado por el índice de plasticidad) para suelos con plasticidad.

Las curvas que utiliza la guía empírico-mecanicista se presentan en la Figura 2.

Entonces, una vez que se conoce la variación de los valores de succión durante el periodo de proyecto, se utiliza la curva característica para poder determinar los grados de saturación y de esta forma hacer uso de la ecuación (3) para poder obtener la variación de los módulos de resiliencia.

Un aspecto importante de estas curvas es que sólo se consideraron las trayectorias de secado, sin embargo, los materiales que forman el pavimento estarán expuestos a varios ciclos de humedecimiento y secado dependiendo de las condiciones climáticas que se presenten en el área, por tanto, sería recomendable tomar en cuenta este aspecto y generar las bases de datos con curvas en ambas trayectorias.

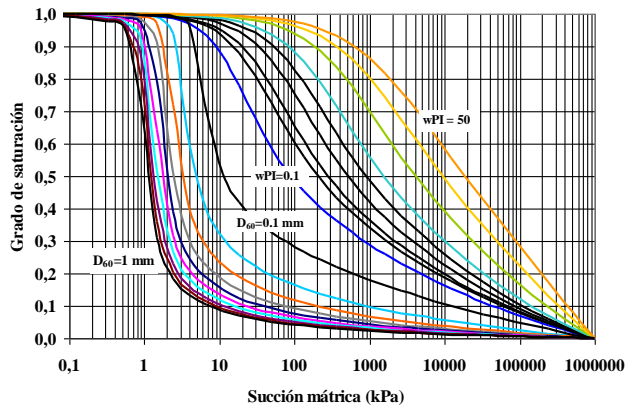


Figura 2. Base de curvas características de la guía de diseño empírico-mecanicista

En el siguiente inciso se presentan una serie de curvas características que se obtuvieron en trayectorias de humedecimiento y secado con dispositivos tipo Fredlund.

4 SUELOS DE ESTUDIO

Las propiedades de los suelos para los que se obtuvieron sus curvas características en trayectorias de humedecimiento y secado se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1 Propiedades de los suelos de estudio

Suelo	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	LL (%)	IP (%)	G_s	Pasa 200 (%)
CL	17.5	16.91	35	16	2.71	73
SM	10.5	19.54	NP	NP	2.71	27
CL-ML	10.8	19.57	26	8	2.71	54.8

5 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Existen varias técnicas de laboratorio para determinar la curva característica. Una de estas es la de celdas de presión que utiliza la técnica de translación de ejes.

En este estudio se utilizaron una serie de celdas de presión tipo Fredlund para determinar las curvas características en trayectoria de humedecimiento y secado. El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Se compactaron las muestras en los anillos (diámetro de 6.2 cm y 2.5 cm de altura) a 90 % del peso volumétrico seco máximo y a contenido de agua óptimo,
- La muestra fue saturada permitiendo que absorbiera agua por capilaridad,
- Se colocó en la celda de presión,
- Se aplicaron pesos sobre la placa de carga cuando era necesario simular un nivel de sobrecarga,

- Se aplicaba la primera presión de aire, la cual también corresponde al primer valor de succión ya que la presión de poro de agua es cero debido a que las buretas están abiertas a la atmósfera,
- En todo momento de la prueba se toman lecturas del nivel de agua. La cantidad de agua que fluye sirve para el cálculo de los contenidos de agua o grados de saturación de la muestra,
- Cuando ya no existe flujo de agua se aplica el siguiente nivel de succión y se repite el paso anterior,
- Una vez aplicados todos los niveles de succión, se extrae la muestra, se pesa y se pone a secar a $110 \pm 5^\circ\text{C}$,
- Con el peso seco de la muestra y los volúmenes de agua que fluyeron se calculan los contenidos de agua,
- Se grafica la relación succión contra grado de saturación,
- Si se requiere se realiza el ajuste de los datos con alguno de los modelos propuestos en la literatura.
- En este caso se usó el modelo de Fredlund y Xing (1994) para realizar el ajuste.

6 RESULTADOS SOBRE CURVAS EN TRAYECTORIAS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO

Las Figuras 3, 4 y 5 muestran las curvas características en trayectoria de humedecimiento y secado para cada uno de los suelos.

De las tres figuras anteriores se observa que el área entre la curva de humedecimiento y secado parece depender del tipo de suelo en cuestión. Es decir, el fenómeno de histéresis parece ser más marcado para algunos tipos de suelo. Por ejemplo, en el caso del suelo CL en el cual 73 % del material pasa la malla No. 200, el ciclo histerético está más cerrado.

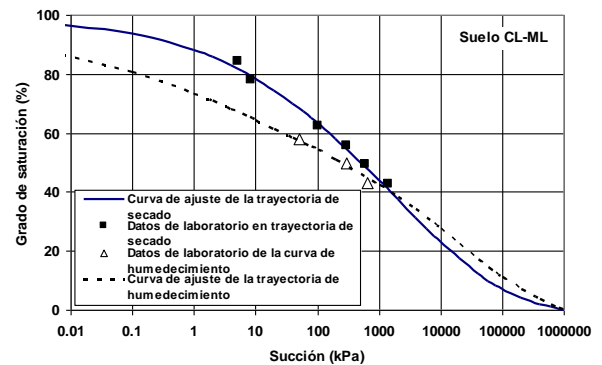


Figura 3. Curvas características en trayectoria de humedecimiento y secado para el suelo CL-ML

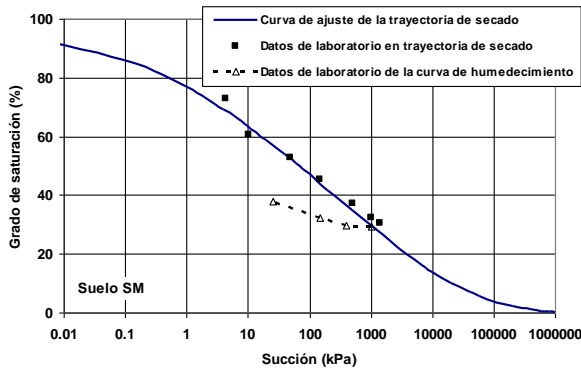


Figura 4. Curvas características en trayectoria de humedecimiento y secado para el suelo SM

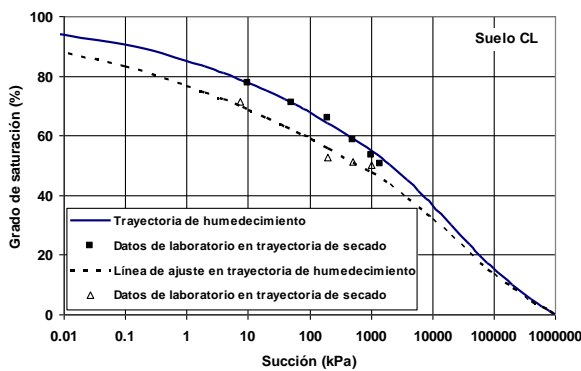


Figura 5. Curvas características en trayectoria de humedecimiento y secado para el suelo CL

Por otro lado, también se puede observar que el modelo de Fredlund y Xing se ajusta a los datos obtenidos en laboratorio para las curvas de secado y sólo para el caso del suelo CL-ML y CL para el caso de las trayectorias de humedecimiento (Figura 6).

Si se grafican las tres curvas de secado se puede observar que la curva del suelo CL se localiza en la parte superior, es decir, que la desaturación es más gradual con respecto a las otros dos suelos que contienen una mayor cantidad de arena (Figura 6).

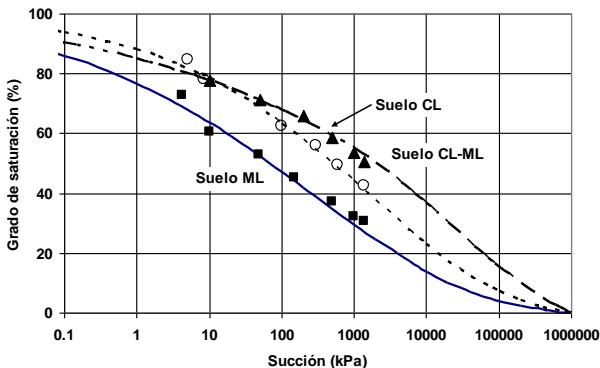


Figura 6. Curvas características en trayectoria de humedecimiento para los suelos CL, CL-ML y ML

7 CURVAS CARACTERISTICAS OBTENIDAS CONOCIENDO wPI

Si comparamos las curvas características obtenidas con la correlación de wPI y la de laboratorio se puede observar que difieren bastante (Figura 7). Esto quizá se deba que al generar las correlaciones no se hayan tomado en cuenta varios aspectos que afectan a la determinación de la curva característica, por ejemplo, el peso volumétrico, el nivel de sobrecarga, el tipo de compactación, tipo de muestra (compactada o inalterada), etc. (Pérez, 2008).

Por lo anterior, los autores opinan que es muy importante determinar en qué casos se puede hacer uso de correlaciones que fueron obtenidas para condiciones diferentes a las que se requiera simular.

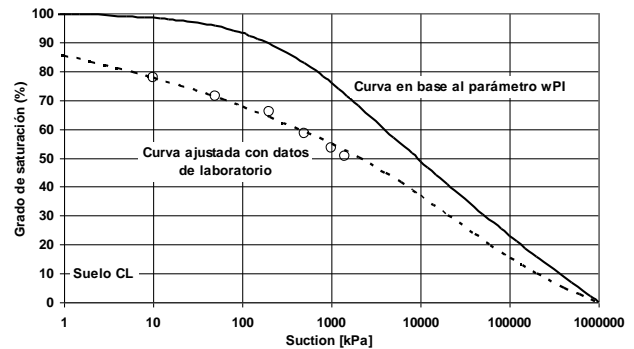


Figura 7. Curva de ajuste determinada con datos de laboratorio y obtenida en base a correlaciones con wPI.

8 CONCLUSIONES

La guía empírico-mecanicista para diseño de pavimentos es una propuesta para llevar a cabo los diseños en una forma más racional. Sin embargo, es claro que la cantidad de parámetros que se hace necesario introducir son considerables y muchos de ellos no se determinan en los laboratorios comunes, por tanto, pareciera que este tipo de diseño aunque más refinado necesitará de muchos esfuerzos para ponerse en práctica.

Dentro del software se hace uso del modelo que predice las variaciones que se presentarán en el módulo de resiliencia debidas a variaciones en condiciones de humedad (EICM). Lo primero que hace el modelo es predecir las variaciones de succión y a partir de éstas se determinan los grados de saturación de la curva características, sin embargo, las curvas características contempladas en la guía son únicamente son en trayectoria de secado. Sería necesario tomar en cuenta también la obtenida en trayectoria de humedecimiento ya que el suelo experimentará varios ciclos de secado y humedecimiento que dependerán de las condiciones climáticas. Los datos que se presentan para los tres tipos de suelo demuestran que el área entre la curva de humedecimiento y secado puede variar dependiendo del tipo de suelo, entonces, habrá suelos a los que afecte más el fenómeno de histéresis.

De acuerdo con la comparación de la curva obtenida con la correlación de wPI y los datos de laboratorio se

muestran diferencias importantes. Es importante que se verifiquen las consideraciones hechas en el desarrollo de correlaciones antes de ponerlas en práctica.

REFERENCIAS

- Fredlund, D. Y Xing, A., (1994). "Equations for the soil water characteristic curve". *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3), 521-532.
- Pérez-G. N., (2008). "Determinación de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión". Publicación técnica No. 313. Instituto Mexicano del Transporte.
- NCHRP (2000)., "Appendix-1: Resilient Modulus as function of soil moisture-summary of predictive models. Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures.
- Perez, N., (2006). "Development of a protocol for the assessment of unsaturated soil properties". PhD Dissertation. Arizona State University.
- Rao, S., (1997). "Analysis of in-situ moisture content data for Arkansas Subgrades". M. S. Thesis. University of Arkansas.
- AASHTO (1986). "AASHTO guide for design of pavement Structures".
- Quintero, N., (2007). "Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model (EICM) for the Ohio SHRP Test Road at U.S.. 23. Tesis de maestría, the Russ College of Engineering and Technology of Ohio University..