

Evaluación de la relación entre módulo de resiliencia y succión

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



SUMMARY

Since the application of the AASHTO pavement design guide of 1986 the parameter resilient modulus has got great attention of the engineering community. Nowadays the new mechanistic-empirical pavement design guide utilizes this parameter for thickness design. This paper reports the resilient modulus testing that was carried out on a silty soil and a high plasticity clay and its relationship with suction. The suction values were extracted from the soil water characteristic curve that was evaluated with samples compacted at optimum water content and maximum dry unit weight.

RESUMEN

A partir de la guía de diseño de pavimentos AASHTO de 1986, el estudio del módulo de resiliencia (M_r) ha adquirido una importancia impresionante. En nuestros días, con la propuesta de diseño empírico-mecanicista, la determinación de este parámetro es de fundamental importancia. En este artículo se muestra la relación que existe entre este parámetro y la succión para un limo (MH) y una arcilla (CH). Los valores de succión utilizados en el análisis fueron determinados de la curva característica del material obtenida con muestras que se compactaron a contenido de agua óptimo y peso volumétrico seco máximo.

1 INTRODUCCIÓN

Mucho se ha publicado sobre el efecto de las variaciones de las condiciones ambientales en el comportamiento de pavimento. De hecho, el programa del comportamiento de pavimentos a largo plazo (por sus siglas en inglés LTPP), fue uno de los proyectos de los que se obtuvieron gran cantidad de datos para análisis del comportamiento de pavimentos tanto existentes como nuevos. De este estudio se reportaron varios artículos que demuestran la variación en las propiedades de los materiales debido a variaciones en contenido de agua, temperatura, etc.

Con la propuesta de la nueva guía empírico-mecanicista, varios organismos de transporte han enfocado sus investigaciones hacia la determinación de los parámetros requeridos en dicha guía. De los parámetros que han adquirido una gran importancia es el módulo de resiliencia. En Estados Unidos se ha generado una gran cantidad de información sobre este parámetro. En el caso de México, el Instituto Mexicano del Transporte inicia las investigaciones sobre el tema a partir de 1997 hasta la fecha. Hoy en día, uno de los objetivos es generar una base de datos de módulo de resiliencia que incluya varios de los materiales que generalmente se utilizan en las estructuras carreteras, esto tiene como propósito que aquellos organismos que requieran este tipo de datos y que no cuenten con el equipo necesario para desarrollar tal tipo de prueba estén en condiciones de tener datos al menos como datos preliminares de proyecto.

Otro de los objetivos es desarrollar una relación entre módulo de resiliencia y la succión del suelo, relación que sirva para determinar en qué grado debe cambiar la succión del suelo (también relacionada con contenido de agua volumétrico, contenido de agua gravimétrico o grado de saturación) para que se presente un cambio importante en el módulo de resiliencia.

En este artículo se presentan los resultados para dos tipos de suelo, uno que bien cumple con los requisitos de material de terraplén y otro que por sus características de plasticidad queda excluido, pero que sin embargo, es un material que generalmente se encuentra en las áreas donde se proyectan las obras de caminos o carreteras.

1.1 Uso del módulo de resiliencia en el diseño de pavimentos

El uso del módulo de resiliencia se da a partir de la guía de diseño AASHTO de 1986. En esta guía, el módulo de resiliencia de la subrasante podía mostrar variación con respecto al tiempo, sin embargo, para obtener el valor de diseño se hacían una serie de cálculos de factores de daño que posteriormente se promediaban para finalizar con la obtención del M_r de diseño (para material de subrasante).

En cuanto a los módulos para las capas de base, subbase y carpeta, éstos se determinaban pasando los coeficientes de capa a valores de módulo con el uso nomogramas o ecuaciones especificados en la guía. Una vez determinados los módulos, se procedía a la determinación de los espesores de las capas tomando datos como: número de ejes equivalentes, módulo de resiliencia de la subrasante, módulos de las capas de base, subbase y carpeta, la confiabilidad, la desviación estándar y el nivel de servicio final.

Para el caso del diseño AASHTO empírico-mecanicista, se proporcionan como datos de entrada todos los ya mencionados anteriormente aunados a otra serie de parámetros que no eran tomados en cuenta en diseños anteriores como por ejemplo, la radiación solar, la curva característica de los materiales de base, subbase y subrasante, etc.

Por otro lado, el software de diseño utiliza algoritmos para determinar cómo será la variación del módulo de

resiliencia de los materiales durante el periodo de diseño. Dicha variación se deberá a cambios en los contenidos de agua de los materiales como base, subbase, subrasante o terraplén o a variaciones en las temperaturas en el caso del material que conforma la superficie de rodamiento.

Para determinar la variación del M_r , la guía hace uso de un modelo llamado Enhanced Integrated Climatic Model (por sus siglas en inglés EICM). Este modelo utiliza la relación que muestra cuál es la variación del módulo del resiliencia relativo a un cambio en grado de saturación (Figura 1).

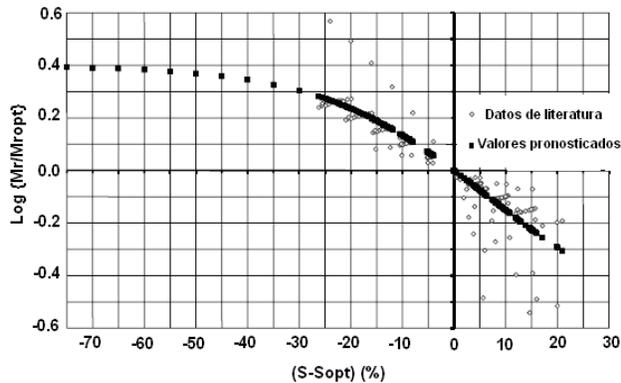


Figure 1. Variación del módulo de resiliencia con respecto al cambio en grado de saturación (extraída del apéndice DD del documento NCHRP)

De la Figura 1, se determinó que el modelo que expresa la relación entre ambas variables era:

$$\log \frac{M_r}{M_{ropt}} = k_w (S - S_{opt}) \quad [1]$$

donde: M_r = módulo de resiliencia para un cierto grado de saturación, M_{ropt} = es el módulo de resiliencia en condiciones óptimas, k_w = es la pendiente de la gráfica $\log(M_r/M_{ropt})$ contra $(S-S_{opt})$, S = es el grado de saturación y S_{opt} = es el grado de saturación en condiciones óptimas.

En el documento de la NCHRP (2000) se presentan todos los modelos de relación entre módulo de resiliencia y grado de saturación o contenido de agua. 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:

$$M_r = 10^{a + \frac{b-a}{1 + \exp(\beta + k_s(S - S_{opt}))}} \cdot M_{ropt} \quad [2]$$

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 a $\ln(-b/a)$.

Para verificar un modelo de variación del módulo de resiliencia como el anterior se requiere llevar a cabo pruebas para varias condiciones de humedad. En los párrafos siguientes se muestran algunos resultados obtenidos para una arcilla y un limo de alta compresibilidad.

2 PROPIEDADES DEL SUELO ANALIZADO

Las propiedades de los suelos en los que se llevó a cabo el estudio se muestran en la Tabla 1. Los valores obtenidos se determinaron con base en normas ASTM.

Tabla 1 Propiedades del suelo de estudio

Suelo	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	LL (%)	IP (%)	G_s	Pasa 200 (%)
CH	33.0	12.56	72	46	2.59	92.9
MH	34.0	12.73	57	26	2.64	89.6

La Tabla 2 resume los valores de contenido de agua volumétrico, grado de saturación y succión para los óptimos de compactación.

Tabla 2. Características en las condiciones óptimas

Suelo	θ_{opt} (%)	S_{ropt} (%)	Succión en el óptimo (kPa)
CH	42.3	83.6	130
MH	44.1	88.4	5

3 DESCRIPCIÓN DE PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES, PROCEDIMIENTO DE ENSAYE Y PUNTOS DE CONTROL

Para la preparación de los especímenes de prueba primeramente se llevó a cabo la adición del agua requerida para alcanzar los contenidos de agua requeridos y se dejó equilibrar durante 24 horas. Posteriormente, se compactó en un molde partido de 14.4 cm de altura por 7.1 cm de diámetro. Una vez que se tenía el espécimen compactado, se tomaron dimensiones y pesos. Para finalizar, se determinó el módulo de resiliencia siguiendo el procedimiento NCHRP I28A, el cual aplica 16 secuencias en las cuales los confinamientos varían entre 14 y 55 kPa y el esfuerzo desviador entre 25 y 89 kPa. La carga se aplica con una onda tipo haversine con un tiempo de carga de 0.2 segundos y un tiempo de reposo de 0.8 de segundo (para materiales de subrasante). Las Figuras 2 y 3 muestran los espacios de compactación donde se indican tanto los contenidos de agua y los pesos volumétricos a los que se compactaron los especímenes utilizados en el análisis.

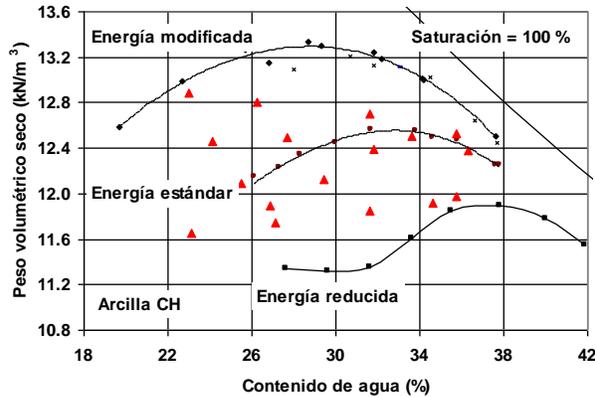


Figure 2. Espacio de compactación para la arcilla CH

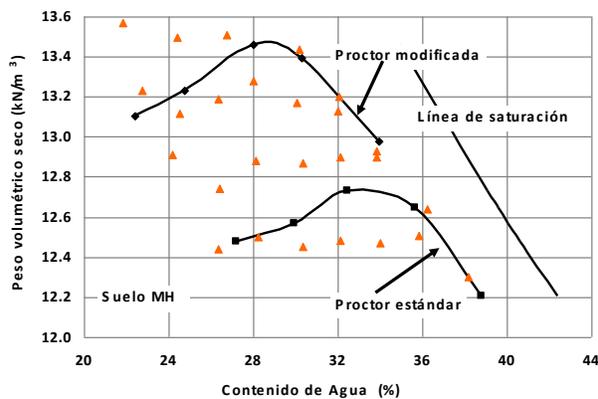


Figure 3. Espacio de compactación para el limo de alta compresibilidad MH

4 DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

Para determinar las curvas características de los suelos, éstos se compactaron en anillos de 6.3 cm de diámetro y 1.9 cm de altura en condiciones de contenido de agua óptima y peso volumétrico seco máximo. Posterior a la compactación, se saturaron y después se colocaron en las celdas de presión para iniciar con la aplicación de las presiones de aire, valores que se toman como el valor de succión ya que la presión de poro de agua es cero porque las dos buretas del sistema están abiertas a la atmósfera. Las curvas características que se obtuvieron para los suelos se muestran en las Figuras 4 y 5.

Como se puede observar de estas figuras, el rango de valores de succión mátrica impuestos durante la prueba fueron entre 100 y un valor menor a 1000 kPa. Quizá tendría que utilizarse más de un método para determinar el valor de succión de tal forma que se obtengan valores de laboratorio en rangos más amplios de tal forma que la curva de ajuste sea más exacta.

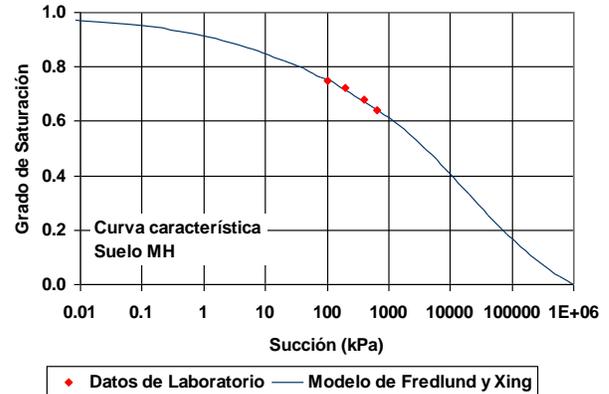


Figura 4. Curva característica del limo MH

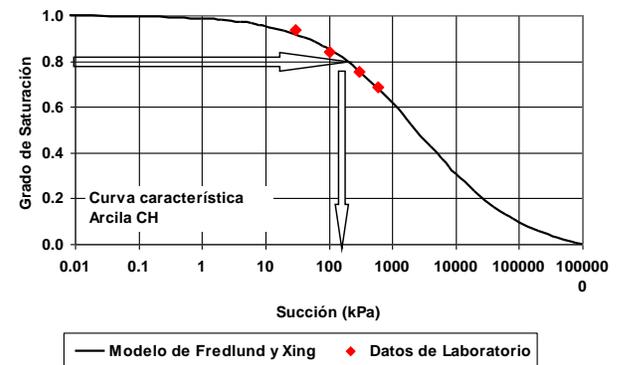


Figura 5. Curva característica de la arcilla CH

5 RESULTADOS

Como se observó en los espacios de compactación (Figuras 2 y 3), las pruebas de módulo de resiliencia se obtuvieron en distintas condiciones de contenido de agua y peso volumétrico seco. Los valores de M_r utilizados en el análisis corresponden al promedio de dos o tres especímenes compactados bajo las mismas condiciones.

Los resultados de cada una de las pruebas de módulo de resiliencia son 16 valores que corresponden a cada una de las combinaciones de σ_d y σ_3 . Las gráficas que se presentan en esta sección corresponden sólo a $\sigma_3 = 14$ kPa y $\sigma_d = 89$ kPa.

Para el caso de la arcilla CH se realizaron pruebas en 15 puntos. La Tabla 3 muestra el resumen tanto de las características de humedad y peso volumétrico seco así como los valores de succión que se obtuvieron de la curva característica y los valores de módulo de resiliencia para $\sigma_3 = 14$ kPa y $\sigma_d = 89$ kPa.

Tabla 3. Características de los especímenes ensayados en módulo de resiliencia para la arcilla CH.

Punto No.	w (%)	γ_d (kN/m ³)	θ (%)	Succión (kPa)	M_r (kPa)
1	31.64	12.70	41.0	160	57
2	26.23	12.81	34.3	550	94
3	33.60	12.50	42.8	120	45
4	35.73	12.53	45.6	50	48
5	31.80	12.39	40.2	250	54
6	27.70	12.49	35.3	550	74
7	24.10	12.46	30.6	1150	95
8	36.30	12.38	45.8	60	31
9	29.45	12.12	36.4	500	49
10	25.50	12.09	31.4	1150	65
11	23.10	11.65	27.4	2300	49
12	31.60	11.85	38.2	450	25
13	26.86	11.90	32.6	1100	34
14	27.10	11.75	32.5	1150	33
15	35.75	11.98	45.7	140	19

Si se grafican los datos de succión contra módulo de resiliencia se puede observar que los datos se agrupan en tres curvas de acuerdo a un cierto rangos de pesos volumétricos secos como lo indica la Figura 6. De acuerdo con esta figura, el módulo de resiliencia se incrementa a medida que la succión mátrica lo hace. Por otro lado, también se observa que el módulo de resiliencia (de acuerdo con las dos curvas superiores) para un mismo valor de succión se incrementa a medida que se incrementa el peso volumétrico.

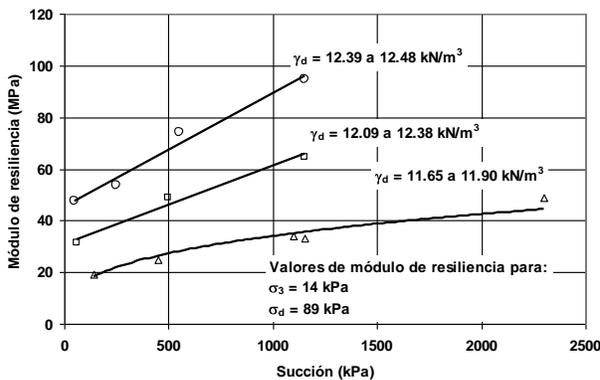


Figura 6. Relación entre módulo de resiliencia y succión

La succión del suelo en conjunto con las curvas característica es el medio para determinar los grados de saturación del suelo en la nueva guía de diseño AASHTO empírico-mecanicista. Estos valores posteriormente se relacionan en un modelo de grado de saturación contra M_r , sin embargo, habría que preguntarse si la succión es el parámetro más adecuado para caracterizar el suelo en cuanto a condiciones de humedad se refiere ya que pareciera que existen otros parámetros como el grado de saturación, contenido de agua gravimétrico o contenido de agua volumétrico que también muestran una buena correlación con el módulo de resiliencia (Figura 7, 8 y 9). No obstante, los tres últimos parámetros son más fáciles de medir. De hecho, de las Figura 7, 8 y 9 se puede observar que la relación entre módulo de resiliencia y contenido de agua volumétrico o gravimétrico o grado de saturación parece ser una relación lineal para los pesos volumétricos secos más altos; para los pesos volumétricos más bajos, la relación es de tipo potencial.

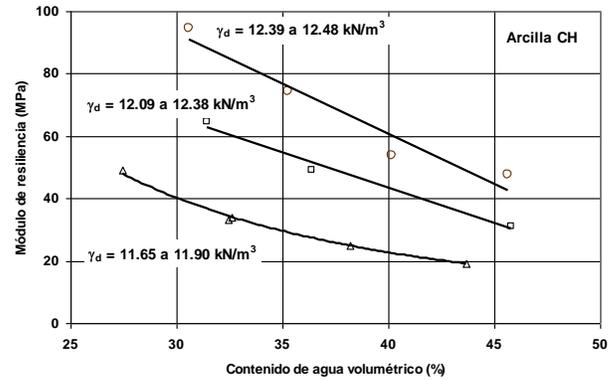


Figura 7. Relación entre módulo de resiliencia y contenido de agua volumétrico

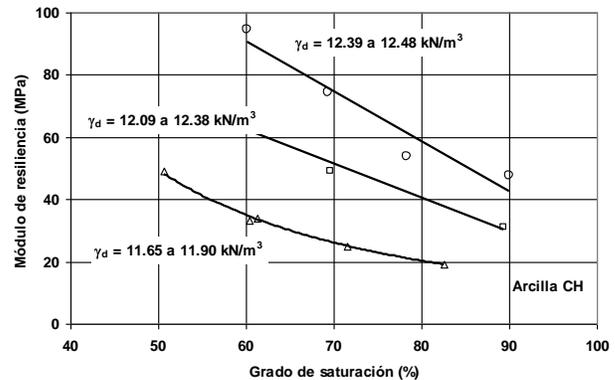


Figura 8. Relación entre módulo de resiliencia y grado de saturación

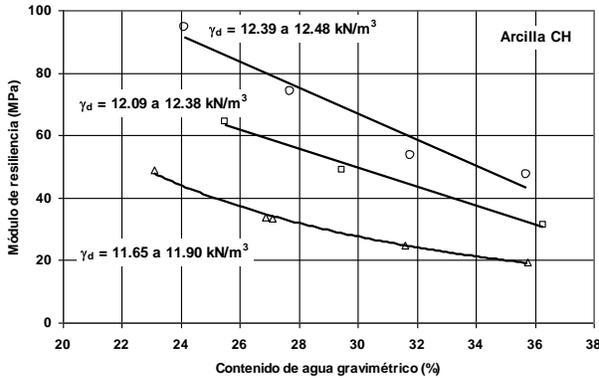


Figura 9. Relación entre módulo de resiliencia y contenido de agua gravimétrico

Con respecto al limo (al igual que en la arcilla), el M_r se incrementa a medida que se incrementa el valor de la succión mátrica, sin embargo, en este caso no se observa un incremento indefinido, al contrario, para valores para succiones mayores a 300 kPa los módulos de resiliencia parecen reducirse, sin embargo, hay que notar que después de 300 kPa sólo se tiene una prueba en ambas curvas (Figura 10). Por otro lado, es notable que al igual que en el caso de la arcilla, a mayor peso volumétrico seco y para un mismo valor de succión, el M_r se incrementa. Los datos indicados en la Figura 10 se ajustan a un modelo tipo polinomial.

Finalmente, como ya se había mencionado en el caso de la arcilla, el módulo de resiliencia y el grado de saturación o contenido de agua gravimétrico tienen una buena correlación del tipo exponencial, con coeficientes de correlación, R^2 de 0.9. Teniendo en cuenta esto, habría que reevaluar la posibilidad de que la variación que se presente en módulo de resiliencia se realice ya sea con parámetros como contenido de agua volumétrico o gravimétrico o con grados de saturación.

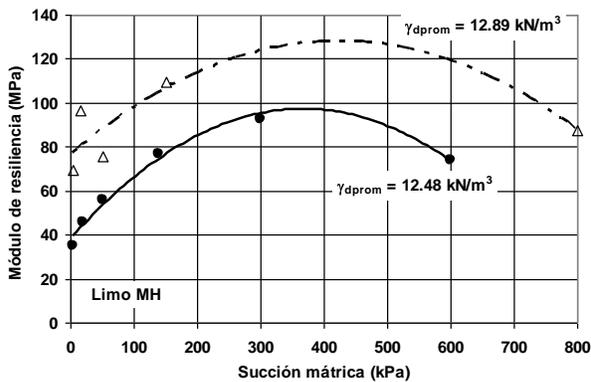


Figura 10. Relación entre módulo de resiliencia y succión mátrica para el limo de alta compresibilidad

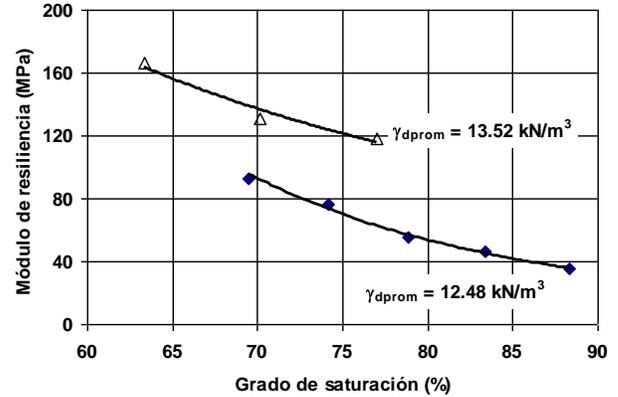


Figura 11. Relación entre módulo de resiliencia y grado de saturación para el limo de alta compresibilidad

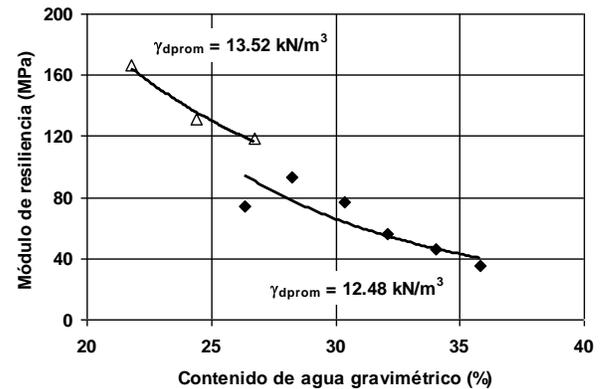


Figura 12. Relación entre módulo de resiliencia y contenido de agua gravimétrico para el limo de alta compresibilidad

6 CONCLUSIONES

De lo presentado en este artículo se pueden mencionar como conclusiones preliminares que la determinación del módulo de resiliencia es de primordial importancia para el diseño de pavimentos, ya sea que se use la nueva de guía de diseño AASHTO empírico-mecanicista o alguna otra metodología, como por ejemplo, la desarrollada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Las relaciones mostradas entre succión mátrica del suelo y módulo de resiliencia muestran (al menos para los dos suelos estudiados) que el módulo de resiliencia se incrementa a medida que la succión mátrica lo hace, sin embargo, para el caso de la arcilla, el incremento se observa permanente hasta los valores de succión mátrica estudiados. Por otro lado, para el caso del limo, el incremento no es indefinido, pareciera que a partir de valores de succión mayores a 300 kPa se observa una reducción.

Por otro lado, en la nueva guía de diseño AASHTO empírico-mecanicista se promueve el uso de la succión

del suelo como medio para determinar los grados de saturación del suelo y posteriormente relacionarlo a módulos de resiliencia, sin embargo, existen otros parámetros como el contenido de agua volumétrico o gravimétrico o el grado de saturación que también presentan una buena correlación con el módulo de resiliencia, la ventaja de éstos últimos es que su determinación en laboratorio es más expedita.

7 REFERENCES

- NCHRP, Final document. Appendix DD-1. Resilient Modulus as a function of soil moisture-summary of predictive models. June 2000.
- Witczak, M.W., Zapata, C.E. and Houston, W.N. 2006. Models incorporated into the current enhanced integrated climatic model. *NCHRP 1-40D Final Report*.
- Pérez, G. N., Garnica, A. P. y Nute, V. H. 2010. Evaluación de la relación módulo de resiliencia succión para suelos finos compactados. *XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*. Acapulco, Guerrero. México. 3:1209-1214.
- Nute, V. H. 2010. Evaluación de la relación-módulo de resiliencia en suelos finos compactados. *Tesis de Maestría*. Universidad Autónoma de Chihuahua.