

# MODELO DE PREDICCIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE PARA SUELOS NO SATURADOS<sup>1</sup>

Carlos E. Cary<sup>2</sup> y Claudia E. Zapata<sup>3</sup>

Resumen: Un número limitado de ecuaciones han sido postuladas para la incorporación de los efectos del cambio de humedad en el módulo resiliente de los suelos. Sin embargo, los modelos disponibles están basados en correlaciones empíricas y no en un análisis fundamental del estado de esfuerzos. Una serie de modificaciones en el estado de esfuerzos aplicados durante la prueba de módulo resiliente, conforme al protocolo NCHRP 1-28A: “Metodos Armonizados de Ensayo para la Determinación en Laboratorio del Módulo Resiliente para el Diseño de Pavimentos Flexibles”, son necesarias para la medición de la succión matricial mediante la ejecución de la técnica de traslación de ejes. La factibilidad en la aplicación de los protocolos de prueba vigentes para determinar el módulo resiliente en suelos no saturados es analizada. Este estudio presenta los resultados de una investigación preliminar, en la cual se evalúa la respuesta resiliente del suelo sujeto a un estado de esfuerzos cuando está parcialmente saturado. Fueron empleados un material para base granular y un material de subrasante. El material para base granular fue ensayado con la succión matricial bajo el modo de “control” (condición drenada) y bajo el modo de “medición” (condición no drenada). El material de subrasante fue ensayado solamente con la succión matricial bajo el modo de “control”. Los resultados fueron utilizados para mejorar el Modelo Universal para la predicción del módulo resiliente. Esta mejora se llevó a cabo incorporando la succión matricial como una variable fundamental e independiente dentro del estado de esfuerzos. La versión mejorada del modelo es capaz de predecir la respuesta resiliente de los suelos bajo diferentes niveles de esfuerzo externo y succión matricial. Como consecuencia, se hace posible obtener un conjunto único de constantes de regresión, independientes de los cambios en contenidos de humedad.

**Palabras clave:** materiales sueltos, predicción del módulo resiliente, protocolo NCHRP 1-28A, succión matricial, suelos no saturados,

## PREDICTION MODEL FOR THE RESILIENT MODULUS OF UNSATURATED SOILS

Abstract: A limited number of equations have been proposed to incorporate moisture variation effects on resilient modulus; however, the models available are in general based on empirical correlations and not on a fundamental stress state analysis. The suitability of the currently available resilient modulus test protocol for its application on unsaturated soils was assessed. Several modifications in the stress state conditions of the “Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design” NCHRP 1-28A protocol are necessary when measuring matric suction due to the axis-translation needed during the test. This study presents the results of a preliminary exploration into the response of the resilient modulus of unbound materials subjected to a full stress state for unsaturated soil conditions. Two different materials were tested, one granular base and one subgrade material. The granular base material was tested under both, measured (drained conditions) and controlled (undrained conditions) matric suction modes. The subgrade material was tested under measured matric suction mode. The results were used to enhance the widely known Universal Model for resilient modulus prediction by incorporating matric suction as a fundamental variable within the stress state for unsaturated soils. This model predicts the resilient response of unbound materials at different stress states and matric suction levels. Thus, a unique set of regression constants independent of moisture variation can be obtained for any material.

**Keywords:** matric suction, NCHRP 1-28A protocol, resilient modulus, unbound materials, unsaturated soils

<sup>1</sup> Artículo recibido el 28 de setiembre de 2011 como parte del 2do Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

<sup>2</sup> Candidato a Doctorado en Filosofía, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Estatal de Arizona, P.O. Box 875306, Tempe, AZ 85287-5306, USA. E-mail: ccary@asu.edu

<sup>3</sup> Profesora, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Estatal de Arizona, P.O. Box 875306, Tempe, AZ 85287-5306, USA. E-mail: czapata@asu.edu

## INTRODUCCIÓN

El módulo resiliente ( $M_R$ ) utilizado para la caracterización de los materiales sueltos es un parámetro fundamental en el diseño de pavimentos flexibles. Dicho módulo no es constante y depende de diferentes factores como el estado de esfuerzos, contenido de humedad, densidad seca, número de repeticiones de carga, energía de compactación y la tixotropía del suelo (Seed et al., 1962). La implementación de la nueva Guía Empírico-Mecánistica para el Diseño de Pavimentos (M-EPDG) de AASHTO en 2011, ha demostrado enfáticamente el rol fundamental que tienen los factores climáticos en el desempeño del pavimento (Zapata et al., 2007; Zapata et al., 2009; Zapata y Houston, 2009; Zapata y Cary, 2009), y en particular, los efectos del contenido de humedad. Estos hallazgos han suscitado el interés de los investigadores por determinar los efectos que las variaciones en el contenido de humedad producen en el  $M_R$  de los materiales sueltos a lo largo de la vida útil del pavimento. Aún cuando el entendimiento de los aspectos fundamentales en la mecánica de los suelos no saturados ha evolucionado, la complejidad de los ensayos requeridos para estos suelos hace que su implementación en la práctica sea un gran reto. Varios modelos han sido propuestos para incorporar los efectos que las variaciones en el contenido de humedad tienen sobre la respuesta resiliente de los suelos (Fredlund et al., 1977; Parreira and Golcalves, 2000; Witczak et al., 2000; Yang et al., 2005). Sin embargo, la mayoría son de naturaleza empírica y se basan en la teoría de esfuerzos totales. Para introducir los efectos de la variación del contenido de humedad dentro de un modelo racional para la predicción del  $M_R$ , se hace imprescindible estudiar la relación entre las presiones de poro de agua (positivas o negativas) y la respuesta resiliente de los materiales sueltos incorporando los principios que rigen la mecánica de suelos no saturados.

La presión de poro de agua es generada bajo la carga dinámica impartida por el tráfico vehicular. Dicha presión se genera de forma continua y con poca o ninguna disipación de por medio. A este mecanismo se le conoce como fase de generación de presión de poro y usualmente es considerado como una condición transitoria. La fase de disipación de la presión de poro ocurre en el período intermedio a los ciclos de carga, y su efectividad es principalmente función de la conductividad hidráulica del material (Gucunzki y Brill, 1994) y de la frecuencia de tráfico vehicular. Cuando el tiempo de reposo entre ciclos de carga es suficientemente prolongado (i.e., bajo tránsito vehicular), se desarrolla poco o ningún aumento en la presión de poro de agua debido a que hay tiempo suficiente para su disipación. Dicha condición se puede reproducir en el laboratorio mediante un ensayo drenado de  $M_R$ . Por otro lado, cuando el tiempo de reposo entre ciclos de carga es corto (i.e., alto tránsito vehicular), o la conductividad hidráulica del suelo es baja, entonces el suelo experimenta un aumento en la presión de poro de agua. Esta última condición es simulada en el laboratorio mediante un ensayo no drenado de  $M_R$ .

Se ha determinado que los efectos de los cambios ambientales en el estado de esfuerzos deben ser relacionados no solamente con el contenido de humedad del suelo, sino con los cambios en la succión matricial como variable fundamental en el estado de esfuerzos para los suelos no saturados. El flujo hidráulico es gobernado por los gradientes de la succión matricial en los suelos no saturados o la presión de poro de agua positiva en suelos saturados. Como fue propuesto por Fredlund y Rahardjo (1987), el  $M_R$  de los suelos no saturados puede ser descrito como una función de tres variables de esfuerzos, tal y como se muestra en la ecuación (1).

$$M_R = f[(\sigma_3 - u_a), (u_a - u_w), (\sigma_1 - \sigma_3)] \quad (1)$$

donde  $u_a$  es la presión de poro de aire,  $u_w$  es la presión de poro de agua,  $(\sigma_3 - u_a)$  es el esfuerzo de confinamiento neto,  $(u_a - u_w) = \psi_m$  es la succión matricial, y  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  es el esfuerzo desviador.

Estas variables de esfuerzo, a excepción de  $\psi_m$ , son consideradas en el Modelo Universal propuesto por Uzan y Witczak (1988), mediante el uso de las invariantes del tensor de esfuerzos: esfuerzo bulk ( $\theta$ ) y esfuerzo octahédrico ( $\tau_{oct}$ ). En el presente estudio se sugiere una versión mejorada de dicho Modelo Universal, basada en la incorporación de la succión matricial como una variable fundamental del estado de esfuerzos.

Los objetivos de este estudio son:

- Evaluar críticamente la aplicabilidad del protocolo NCHRP 1-28A (Métodos Armonizados de Ensayo para la Determinación en Laboratorio del Modulo Resiliente para el Diseño de Pavimentos Flexibles) (NCHRP, 2004) para la medición del  $M_R$  utilizando un equipo triaxial especialmente diseñado para ensayos en suelos no saturados.
- Evaluar el Modelo Universal mediante la medición del  $M_R$  bajo diferentes niveles de succión y esfuerzos externos.
- Incorporar la succión matricial en el Modelo Universal.
- Investigar la conveniencia del modelo propuesto para condiciones drenadas y no drenadas.

## ANTECEDENTES

Es de amplio conocimiento que cualquier incremento en el contenido de humedad del suelo provoca la reducción del  $M_R$  y viceversa. El contenido de humedad del suelo está íntimamente relacionado con la succión matricial, y dicha relación es caracterizada mediante la curva de retención de agua (SWCC – "Soil-Water Characteristic Curve").

Un estudio exhaustivo de la literatura reveló la existencia de al menos tres corrientes de pensamiento diferentes en el intento por incorporar los efectos de la succión matricial en el comportamiento resiliente de los materiales sueltos. La primera corriente define al módulo como una función de la succión matricial trasladando el concepto de los esfuerzos efectivos para suelos saturados al campo de los suelos no saturados (Bishop, 1959). La segunda corriente se basa en el concepto del  $M_R$  como función de tres variables de esfuerzo, siendo una de ellas la succión matricial tal y como se muestra en la ecuación (1) (Fredlund y Rahardjo, 1987). En este caso, la succión matricial es uno de los componentes del tensor de esfuerzos. La tercera corriente hace empleo de un factor que toma en cuenta la contribución de la succión matricial en forma independiente a la contribución de los esfuerzos externos aplicados al suelo. Estas corrientes son reflejadas en los modelos presentados a continuación.

Fredlund et al. (1977) intentó relacionar el módulo de un material de subsanante con las variables del estado de esfuerzo para suelos no saturados propuestas por Fredlund y Began (1977). El módulo es relacionado con dos variables de esfuerzo: el esfuerzo desviador y la succión matricial. La ecuación (2) presenta dicho modelo:

$$\log M_R = c_{ld} - m_{ld}(\sigma_I - \sigma_3) \quad (2)$$

donde  $c_{ld}$  y  $m_{ld}$  son función de la succión matricial, y  $\sigma_I$  y  $\sigma_3$  son los esfuerzos principales. Aunque no fue completamente validado con datos de laboratorio, este modelo incorpora la succión matricial como una variable de esfuerzo fundamental.

Parreira y Goncalves (2000) presentaron un modelo describiendo la influencia de la succión matricial sobre el  $M_R$  en una laterita en Brasil. Diferentes correlaciones estadísticas entre el  $M_R$ , la succión matricial y los esfuerzos externos aplicados fueron analizadas. La correlación propuesta por dichos autores se presenta en la ecuación (3):

$$M_R = 14.10 \sigma_d^{0.782} \psi_m^{0.076} \quad (3)$$

donde  $\sigma_d$  es el esfuerzo desviador y  $\psi_m$  es la succión matricial.

Witeczak et al. (2000) propuso un modelo que incorpora un factor ambiental que representa la contribución de los cambios en el contenido de humedad sobre el  $M_R$  evaluado para condiciones particulares de esfuerzos externos aplicados. Este modelo ha sido incorporado en la nueva AASHTO M-EPDG y es presentado a continuación:

$$M_R = 10^{\frac{a + \frac{b-a}{1+EXP(\beta+k_s(S-S_{opt}))}}{k_1 \cdot p_a \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \cdot \left( \frac{\tau_{oct}}{p_a} + I \right)^{k_3}}} \quad (4)$$

donde  $S$  es el grado de saturación,  $S_{opt}$  es el grado de saturación bajo condiciones óptimas,  $\theta$  es el esfuerzo bulk,  $\tau_{oct}$  es el esfuerzo octahédrico,  $p_a$  es la presión atmosférica, y  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $k_s$  son parámetros de regresión. El parámetro  $\beta$  es igual a  $\ln(-b/a)$ .

Yang et al. (2005) propusieron un modelo que incorpora explícitamente los efectos tanto de los esfuerzos externos aplicados como de la succión matricial, sobre la predicción del  $M_R$  mediante el uso de la teoría de esfuerzos efectivos para suelos no saturados. Dicho modelo se basa en la relación propuesta por Moossazadeh y Witeczak (1981), donde el parámetro de Bishop representa el contenido de humedad del suelo:

$$M_R = k_1 (\sigma_d + \chi_m \psi_m)^{k_2} \quad (5)$$

donde  $\chi_m$  es el parámetro de esfuerzos efectivos de Bishop y  $k_1$ ,  $k_2$  son parámetros de regresión.

Liang et al. (2008) propuso un modelo similar basado en la teoría de esfuerzos efectivos para suelos no saturados. Dicho modelo es una variación del Modelo Universal (Witeczak and Uzan, 1988) y es presentado en la ecuación (6):

$$M_R = k_1 p_a \left[ \frac{(\theta + \chi_m \psi_m)}{p_a} \right]^{k_2} \left[ \frac{\tau_{oct}}{p_a} + I \right]^{k_3} \quad (6)$$

donde,  $\theta$  es el esfuerzo bulk,  $\tau_{oct}$  es el esfuerzo octahédrico,  $p_a$  es la presión atmosférica, y  $k_1, k_2, k_3$  son parámetros de regresión.

Algunos autores han demostrado una fuerte correlación entre el  $M_R$  y la succión matricial, incluyendo Khoury y Zaman (2004) y Sawangsuriya et al. (2009); lo que confirma el hecho que la succión matricial, siendo una variable del estado de esfuerzos fundamental, es mejor predictor que el contenido de humedad. Sin embargo, ninguno de estos autores ha intentado un modelo de predicción donde se incluya la succión como estado de esfuerzo responsable de la variación del contenido de humedad.

## CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

El laboratorio de geotecnia de la Universidad Estatal de Arizona (ASU) está equipado con sistemas triaxiales para el ensayo de suelos no saturados. Dichos sistemas permiten el control completo y capacidad de medición de las presiones de poro tanto de agua como de aire, lo cual hace posible simular tanto condiciones drenadas como no drenadas (Cary, 2008). Bajo condiciones drenadas, se permite el drenaje de fluidos durante la aplicación de la carga dinámica y por lo tanto cualquier aumento de presión puede ser disipado (presiones controladas). Bajo condiciones no drenadas, no se permite el drenaje de los fluidos, y por lo tanto se desarrollarán aumentos en las presiones de poro de agua y de aire, los cuales pueden ser medidos. En este estudio, ambas condiciones de drenaje fueron exploradas y se evaluaron el  $M_R$  para un material de base granular y una subrasante.

### Propiedades del material

Un material de base granular típicamente usado en el estado de Arizona (denominado ABGB) y un material de subrasante comúnmente encontrado en el valle de Phoenix (denominado IOSG) fueron escogidos para llevar a cabo el programa de laboratorio (Cary, 2008). Se ejecutaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, curvas de compactación y curva característica (SWCC).

De acuerdo con el criterio AASHTO, el material ABGB fue clasificado como A-1-a y el material de subrasante IOSG como una arena arcillosa A-4. La Tabla 1 presenta un resumen de las propiedades índice de los materiales evaluados.

**Tabla 1: Resumen de las propiedades índice de los materiales.**

Propiedad	ABGB	IOSG
Límite Líquido (%)	-	22
Límite Plástico (%)	-	18
Índice Plástico	NP	5
% que pasa Malla No.4	43	97
% que pasa Malla No.10	36	96
% que pasa Malla No.40	21	87
% que pasa Malla No.200	7	47
Gravedad Específica	2.71	2.71
Contenido de Humedad Óptimo (%)	7.2	12.1
Máxima Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	2.26	1.91
Clasificación AASHTO	A-1-a	A-4
Clasificación USCS	GP-GM	SC

### Curva característica de suelo-agua

El equipo utilizado para evaluar el material granular fue un extractor a presión con membrana de 30.5 cm en diámetro y 8.9 cm en altura. Este equipo es comúnmente utilizado para obtener la curva característica (SWCC) mediante el ensayo simultáneo de múltiples especímenes de 5.1 cm en diámetro por 2.5 cm de altura. Las características particulares de este extractor permiten realizar ensayos en especímenes con diámetros de hasta 10.2 cm en diámetro y 5.1 cm de altura. El equipo utilizado para el material de subrasante fue una celda de presurización de 7.6 cm en diámetro y 8.9 cm de altura.

Para obtener la curva de desaturación de la SWCC, los especímenes fueron sometidos a diferentes niveles de presión de aire. Una vez se obtuvieron los contenidos de humedad en equilibrio, correspondientes a diferentes niveles de succión, se procedió a ajustar los resultados utilizando el modelo de Fredlund y Xing (Cary, 2008; Fredlund y Xing, 1994). La Figura 1

muestra las curvas características (SWCCs) resultantes. Posteriormente, los niveles de succión correspondientes a los contenidos de humedad deseados para llevar a cabo los ensayos de  $M_R$  fueron estimados utilizando las SWCCs resultantes.

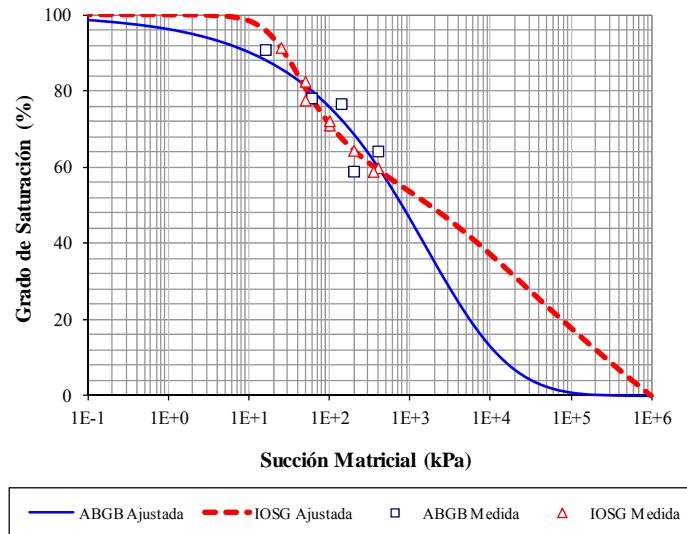


Figura 1: Curva característica suelo-agua para los dos materiales.

### ENSAYO DE $M_R$ PARA SUELOS NO SATURADOS

Para este estudio se utilizó un Sistema Triaxial Integrado para Suelos no Saturados (USTS), el cual es capaz de aplicar ciclos repetitivos de pulso en forma de una función “haversine”. Este equipo cuenta con un sistema cerrado hidráulico de control digital. Con este equipo se puede controlar o medir directamente las presiones de poro de agua tanto en la cara superior como en la cara inferior del espécimen y la presión de poro de aire en la cara superior del espécimen (NCHRP, 2004; Cary, 2008). El USTS cuenta con dos componentes especiales que son considerados fundamentales para llevar a cabo ensayos en suelos no saturados: los controladores de presión/volumen de alta precisión (PVC) y el mecanismo de medición de succión. La succión matricial es medida mediante el uso de un disco cerámico de baja porosidad el cual está instalado en el pedestal. Esto permite que los cambios en succión matricial sean medidos cuando las válvulas de drenaje están cerradas o controlados cuando las válvulas de drenaje están abiertas.

Los procedimientos para el ensayo de  $M_R$  convencional están basados en la teoría de los esfuerzos totales. De acuerdo con esta teoría, el equipo triaxial mide la respuesta mecánica del material que es sometido a diferentes combinaciones de esfuerzo desviador cíclico ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ) y la presión de confinamiento total ( $\sigma_3$ ). Desde la perspectiva utilizada en suelos no saturados, los esfuerzos totales son reemplazados por los esfuerzos normales netos, que se obtienen de la diferencia entre los esfuerzos totales y la presión de poro de aire ( $\sigma - u_a$ ). Esta teoría no afecta la definición del esfuerzo desviador puesto que la presión de aire aplicada influye en la misma medida en los esfuerzos principales. Sin embargo, el efecto de la presión de poro de aire aplicada al espécimen debe ser compensado mediante el aumento de los esfuerzos totales (vertical y de confinamiento) en proporción equivalente a la presión de poro de aire aplicada. Esta serie de ajustes en el estado de esfuerzos es comúnmente conocida como la técnica de traslación de ejes. Mediante la aplicación de esta técnica, el esfuerzo de confinamiento como es originalmente presentado en las secuencias de carga del protocolo NCHRP 1-28A, se convierte en el esfuerzo de confinamiento neto ( $\sigma_3 - u_a$ ) y el esfuerzo principal vertical se convierte en el esfuerzo vertical neto ( $\sigma_1 - u_a$ ). Por lo tanto, para obtener el esfuerzo de confinamiento total a aplicarse durante el ensayo, el esfuerzo neto de confinamiento fue incrementado en proporción equivalente a la presión de poro de aire aplicada al espécimen para generar la succión deseada.

Un esfuerzo de contacto es aplicado al espécimen para mantener un contacto positivo entre el pistón de carga y la placa superior. El protocolo NCHRP 1-28A estipula que el esfuerzo de contacto debe ser igual al 20% de la magnitud del esfuerzo de confinamiento total aplicado en cada secuencia de carga. Para suelos no saturados, los autores concluyeron que aplicar un esfuerzo de contacto igual al 20% del esfuerzo de confinamiento neto sería más apropiado debido a la traslación de ejes necesario durante el ensayo.

### Preparación de espécímenes y procedimiento para el ensayo de $M_R$

Los espécímenes fueron preparados bajo condiciones óptimas de humedad y máxima densidad seca constante de acuerdo con el protocolo NCHRP 1-28A (NCHRP, 2004). El diámetro y altura de los espécímenes fueron 15.2 cm por 30.5

cm respectivamente para el material granular, y 10.2 cm por 20.3 cm para el material de subrasante. Los materiales fueron preparados, acondicionados y ensayados a tres contenidos de humedad diferentes: condición de contenido óptimo (OPT), condición seca (-OPT) y condición humeda (+OPT). Dos réplicas fueron preparadas y ensayadas bajo condiciones drenadas para cada combinación. El número total de ensayos drenados fue 18. Adicionalmente, 6 especímenes de material granular fueron ensayadas bajo condiciones no drenadas. Las deformaciones fueron medidas mediante transductores diferenciales variables lineales (LVDTs), los cuales fueron montados directamente en el espécimen.

Luego de ser colocado en la unidad USTS, se le aplicó al espécimen una succión matricial. Luego se permitió que el espécimen alcanzara un estado de equilibrio bajo el nivel de succión aplicado. A lo largo de este período de acondicionamiento se observó difusión del aire confinante a través de la membrana de latex hacia el interior del espécimen. Esto generó inestabilidad en la succión inicial de acondicionamiento y como consecuencia, hizo complicado alcanzar el equilibrio en un período razonable de tiempo. Por consiguiente, es necesario explorar el uso de mejores materiales para la fabricación de membranas así como evaluar el uso de agua en lugar de aire como fluido confinante para el ensayo de módulo resiliente. Debido a estas dificultades, se optó por pre-equilibrar los especímenes fuera de la celda triaxial a un contenido de humedad correspondiente al nivel de succión deseado siguiendo la metodología sugerida por Andrei (2003). Dicho contenido de humedad fue directamente obtenido de la curva característica y corresponde al nivel inicial de succión de equilibrio deseado. Este procedimiento fue aplicado exitosamente y redujo considerablemente los tiempos para alcanzar el equilibrio inicial deseado. La Tabla 2 muestra los niveles iniciales de succión matricial ( $\psi_{mo}$ ) para todos los materiales con sus correspondientes contenidos de humedad (w%) y grados de saturación (S%).

**Tabla 2: Succión matricial obtenida para el ensayo de módulo resiliente.**

ABGB - Granular			IOSG - Subgrade		
	DRY	OPT	WET	DRY	OPT
w (%)	5.0	7.0	7.5	10.1	12.1
S (%)	67	93	100	65	78
$\psi_{mo}$ (kPa)	235	4	0	188	81
					26

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El Modelo Universal original adoptado por la M-EPDG fue utilizado para ajustar las mediciones de  $M_R$  y así obtener las constantes de regresión para cada condición de ensayo. El Modelo Universal se presenta a continuación:

$$M_R = k_1 \cdot p_a \cdot \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \cdot \left( \frac{\tau_{oct}}{p_a} + I \right)^{k_3} \quad (7)$$

donde  $M_R$  es el módulo resiliente,  $p_a$  es la presión atmosférica,  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  son constantes de regresión,  $\theta$  es el esfuerzo bulk y  $\tau_{oct}$  es el esfuerzo octahédrico.

Un estado de esfuerzos típico para las carreteras en Arizona fue utilizado para calcular los valores de  $M_R$  (Andrei, 2003). Estos valores fueron  $\theta = 303$  kPa y  $\tau_{oct} = 110$  kPa para bases granulares; y  $\theta = 90$  kPa y  $\tau_{oct} = 34$  kPa para el suelo de subrasante. Los valores promedio de  $M_R$  obtenidos para muestras a óptimo contenido de humedad fueron 255 y 114 MPa para los materiales ABGB y IOSG, respectivamente.

### Modelo dependiente de la succión matricial

Una de los objetivos principales de este estudio es introducir en una manera fundamental los efectos que los cambios de humedad, debido a fluctuaciones en el clima, tienen sobre la succión y a su vez sobre el módulo resiliente de los suelos. Se asume que cualquier cambio de humedad del suelo se verá reflejado en el estado de esfuerzos a través de las variaciones en la succión del material. De esta forma, en lugar de usar el contenido de humedad o el grado de saturación como indicador de los cambios estacionales, se utiliza la succión del suelo como variable fundamental en el estado de esfuerzos. El modelo propuesto permite una transición armónica entre condiciones saturadas a condiciones no saturadas. La variación propuesta por los autores al Modelo Universal se presenta a continuación:

$$M_R = k'_1 \cdot p_a \cdot \left( \frac{\theta_{net} - 3 \cdot \Delta u_{w-sat}}{p_a} \right)^{k'_2} \cdot \left( \frac{\tau_{oct}}{p_a} + I \right)^{k'_3} \cdot \left( \frac{(\psi_{m_0} - \Delta \psi_m)}{p_a} + I \right)^{k'_4} \quad (8)$$

donde,

$p_a$  = presión atmosférica

$k'_1 \geq 0$ ,  $k'_2 \geq 0$ ,  $k'_3 \leq 0$  y  $k'_4 \geq 0$  son constantes de regresión

$\theta_{net} = \theta - 3u_a$ , esfuerzo bulk neto, donde  $u_a$  es la presión de poro de aire

$\Delta u_{w-sat}$  = aumento de la presión de poro de agua bajo condiciones saturadas; en este caso  $\Delta \psi_m = 0$

$\tau_{oct}$  = esfuerzo octahédrico

$\psi_{mo}$  = succión matricial inicial del suelo

$\Delta \psi_m$  = cambio relativo de la succión del suelo con respecto de  $\psi_{mo}$  debido al aumento de la presión de poro de agua bajo condiciones no saturadas; en este caso  $\Delta u_{w-sat} = 0$

Se debe tener en cuenta que el uso del esfuerzo bulk neto ( $\theta_{net}$ ) en lugar del esfuerzo bulk total ( $\theta$ ) en el primer factor del modelo, se debe al empleo de la técnica de traslación de los ejes. Cuando la condición del suelo cambia de estado no saturado a estado saturado,  $u_a$  se aproxima a cero y el  $\theta_{net}$  se convierte en  $\theta$ . El último factor en la ecuación (8) refleja la contribución de la succión matricial del suelo a la respuesta resiliente del material bajo condiciones no saturadas. Cabe señalar que el uso del cambio relativo de succión ( $\Delta \psi_m$ ) refleja la variación de la succión que se presenta bajo condiciones no drenadas. Las condiciones drenadas se hacen efectivas en el modelo cuando el valor de  $\Delta \psi_m$  se aproxima a cero. De esta manera, se modela la respuesta resiliente del material bajo succión constante o, en otras palabras, cuando se permite la disipación del aumento transitorio en la presión de poros debido a la carga de tráfico. Finalmente, los términos en la ecuación son normalizados mediante la presión atmosférica para procurar mantener constantes de regresión adimensionales.

Nótese que el modelo propuesto no considera de manera explícita los efectos de la densidad seca. Sin embargo, el uso de la succión en el modelo toma en cuenta el efecto de la densidad de forma indirecta cuando la curva característica es definida en términos del grado de saturación o del contenido de humedad volumétrico.

## Validación del modelo

Para validar el modelo propuesto, se llevaron a cabo regresiones utilizando los  $M_R$  medidos de las cuales se obtuvieron juegos de constantes de regresión ( $k'_1$ ,  $k'_2$ ,  $k'_3$ , y  $k'_4$ ) para todos los materiales como se muestra en las Figuras 2 y 3. La ecuación (4), actualmente usada en la AASHTO M-EPDG para estimar los efectos climáticos estacionales en el  $M_R$ , fue utilizada para comparar las predicciones obtenidas utilizando el modelo propuesto.

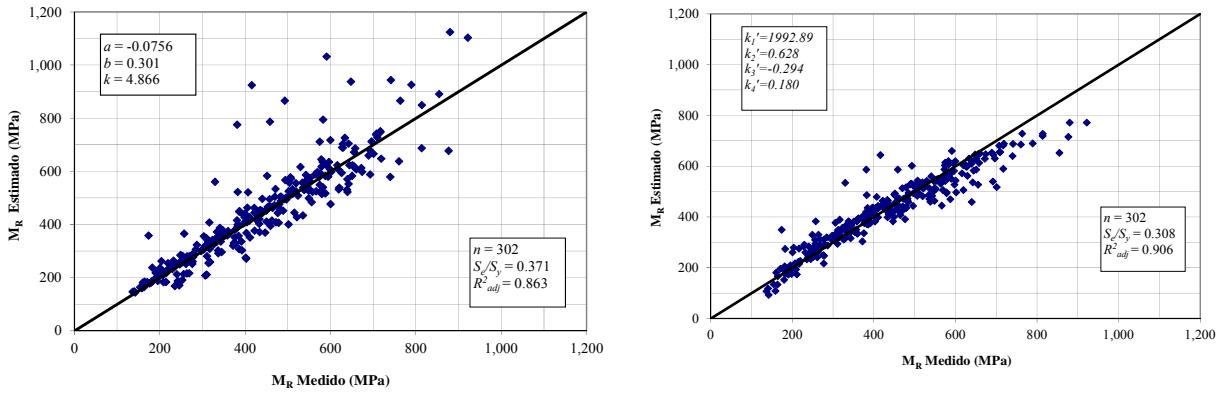
La Figura 2(a) muestra la bondad de ajuste para todos los resultados tanto de ensayos de  $M_R$  drenados como no drenados, en el material ABGB, cuando el modelo AASHTO M-EPDG, ecuación (4), es usado en la regresión. La Figura 2(b) muestra el resultado obtenido cuando el modelo propuesto por los autores, i.e. ecuación (8), es utilizado. La tasa de error estándar o precisión relativa ( $S_e/S_y$ ) y el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ) fueron utilizados para determinar la bondad del ajuste. Se puede observar una disminución en el  $S_e/S_y$  de 0.37 a 0.31, así como un incremento del  $R^2_{adj}$  de 0.86 a 0.91 cuando se utiliza el modelo propuesto. La misma comparación es presentada para el suelo IOSG en las Figuras 3(a) y 3(b). En este caso, los datos se ajustaron bien al Modelo Universal arrojando valores de  $R^2_{adj}$  en un rango de 0.82 a 0.98. Cuando los datos fueron ajustados al modelo propuesto por los autores, las predicciones mejoraron en comparación con aquellas obtenidas al usar el modelo AASHTO M-EPDG. El  $R^2_{adj}$  aumentó de 0.83 a 0.92; mientras que el  $S_e/S_y$  disminuyó de 0.42 a 0.29. Estos indicadores estadísticos ilustran una mejora importante en las predicciones.

## Efecto de las condiciones de drenaje

Se debe reconocer que bajo carga dinámica, con poco tiempo de recuperación entre ciclos de carga, el aumento de presión de poros genera pérdida en la respuesta resiliente de los materiales sueltos debido a la disminución de la succión transitoria para condiciones no saturadas, o a la disminución del esfuerzo efectivo para condiciones saturadas.

Para evaluar los efectos de la condición de drenaje sobre el  $M_R$ , el material granular ABGB fue ensayado tanto bajo condiciones drenadas como no drenadas. Los resultados revelaron una disminución consistente en  $M_R$  bajo condiciones no drenadas. El  $M_R$  disminuyó hasta un 20% en los especímenes con grados de saturación por encima del 70%. Para grados de saturación entre 60% y 70%, las pruebas bajo condiciones no drenadas resultaron en una disminución del  $M_R$  aproximada de 5% al ser comparadas con pruebas bajo condiciones drenadas. Para grados de saturación menores al 60%, no se observaron diferencias significativas entre resultados bajo condiciones drenadas y no drenadas.

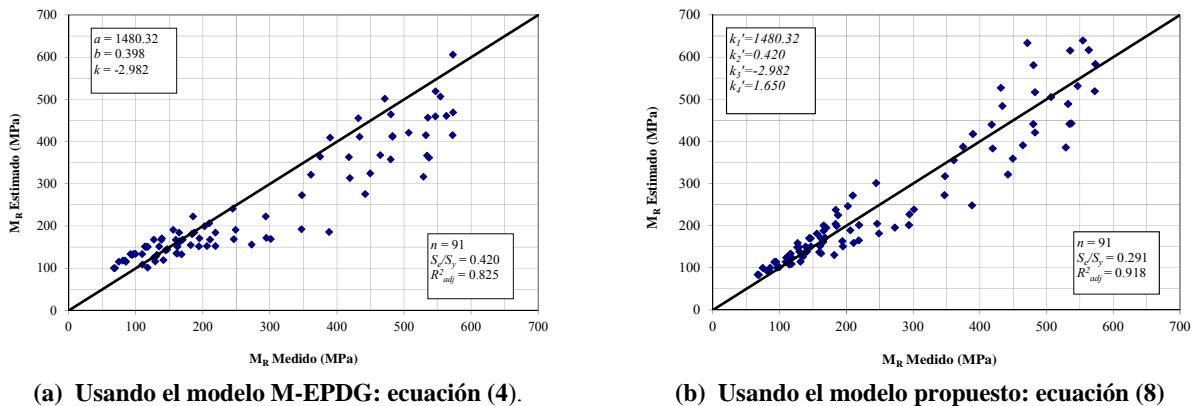
Para ilustrar el efecto de las condiciones de drenaje en los resultados del  $M_R$ , graficaron la mediciones de módulos correspondientes a las últimas cinco secuencias del procedimiento de carga del protocolo NCHRP 1-28A para bases granulares, como se muestra en la Figura 4. Las mediciones corresponden a niveles crecientes para ambos: esfuerzo de confinamiento y esfuerzo desviador.



(a) Usando el modelo M-EPDG: ecuación (4).

(b) Usando el modelo propuesto: ecuación (8)

Figura 2: Bondad de ajuste para todos los datos del ABGB.



(a) Usando el modelo M-EPDG: ecuación (4).

(b) Usando el modelo propuesto: ecuación (8)

Figura 3: Bondad de ajuste para todos los datos del IOSG.

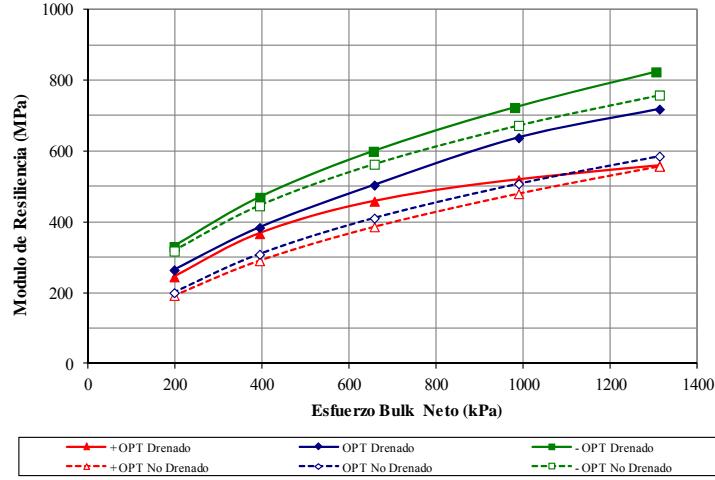


Figura 4: Efecto de la condición de drenaje en la resiliencia del material ABGB.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los cambios dinámicos en la succión o el desarrollo de presiones positivas de poro internas en el suelo (para suelos no saturados y saturados respectivamente) fueron identificados como factores determinantes para los cambios estacionales en

el módulo resiliente de los suelos. Por lo tanto, la succión del suelo debe ser considerada como una variable independiente en el estado de esfuerzos para la determinación del  $M_R$  en los materiales sueltos (tanto suelos como mezclas para base o sub-base granular).

El ensayo de laboratorio para módulo resiliente en suelos no saturados requiere condiciones particulares tanto para el procedimiento de cargas a ser aplicado en los especímenes, como para el equipo triaxial a ser utilizado para el ensayo. Estas condiciones particulares no han sido contempladas e incorporadas en el último protocolo vigente NCHRP 1-28A. El uso de la técnica de traslación de ejes requiere cambios en los procedimientos de carga especificados en el protocolo. En el presente documento se presentó un resumen de las modificaciones recomendadas para el protocolo. En resumen, se debe considerar el uso de agua como fluido confinante o el empleo de nuevos materiales en la fabricación de membranas aislantes, para evitar la difusión de aire a través de las membranas de latex durante la fase de equilibrio en la succión del espécimen. Una solución temporal para acortar las etapas de acondicionamiento de especímenes es aproximarse al nivel inicial de succión deseado, antes de que el espécimen sea montado en la celda triaxial.

Se ha presentado un Modelo Universal modificado para predecir el módulo resiliente considerando los cambios en la succión del suelo. El modelo propuesto es válido tanto para condiciones de suelo no saturado como para condiciones de suelo saturado, permitiendo una transición sin problemas. Además, el modelo mejora las predicciones obtenidas con el modelo utilizado en la AASHTO MEPDG, el cual se basa solamente en el contenido de humedad o grado de saturación como indicadores indirectos del nivel de succión. Se ha demostrado que el modelo propuesto puede ser utilizado tanto para materiales granulares como para suelos naturales. Basado en estudios preliminares para material granular, el modelo propuesto incorpora el efecto de la condición de drenaje sobre el módulo resiliente. Es necesario completar estudios adicionales para establecer la respuesta de materiales finos cohesivos a las diferentes condiciones de drenaje.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Transportación del Condado de Maricopa (Maricopa County, Arizona) por el financiamiento de la presente investigación como parte del proyecto titulado: “*Estudio de Implementación de la Guía Empírico-Mecánica para el Diseño de Pavimentos en el Condado de Maricopa*”.

## REFERENCIAS

- Andrei, D. (2003). “Development of a Predictive Model for the Resilient Modulus of Unbound Materials”, Doctoral Dissertation, Arizona State University, Tempe, Arizona.
- Bishop, A. W. (1959). “The principle of effective stress”, *Tecknisk Ukeflad*, No. 39, pp. 859-863.
- Cary, C. E. (2008). “Resilient Modulus Testing for Unsaturated Unbound Materials”, Master of Science thesis, Arizona State University, Tempe, Arizona.
- Fredlund, D.G., Began, A.T. y Wong, P.K. (1977). “Relation between resilient modulus and stress conditions for cohesive subgrade soils”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 642, pp. 73-81.
- Fredlund, D.G. y Xing, A. (1994). “Equations for the soil-water characteristic curve”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 3, pp. 521-532.
- Fredlund, D.G. y N.R. Began, (1977). “Stress state variables for unsaturated soils”, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 103, No. 5, pp. 447-466.
- Fredlund, D.G. y Rahardjo, H. (1987). “Soil mechanics principles for highway engineering in arid regions”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1137, pp. 1-11.
- Gucunzki, N. y Brill, D.R. (1994). “A numerical model for pore pressure buildup in airport pavement subgrades”, *Conference Proceedings: The 4<sup>th</sup> International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Minnesota, USA, Vol. 2, pp.1429-1442.
- Khoury, N.N. y Zaman, M. (2004). “Correlation among resilient modulus, moisture variation and soil suction for subgrade soils”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1874, pp. 99-107.
- Liang, R.Y., Rabab’ah, S. y Khasawneh, M. (2008). “Predicting moisture-dependent resilient modulus of cohesive soils using soil suction concept”, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol. 134, No. 1, pp. 34-40.
- Moossaazadeh, J. y Witczak, M.W. (1981). “Prediction of subgrade moduli for soil that exhibits nonlinear behavior”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 810, pp. 9-17.

- National Cooperative Highway Research Program (2004). "Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design", *Research Results Digest*, No. 285, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 52.
- Parreira, A. B. y Goncalves, R.F. (2000). "The influence of moisture content and soil suction on the resilient modulus of a lateritic subgrade soil", *GeoEng - An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, Melbourne, Australia.
- Sawangsuriya, A., Edil, T. y Benson, C. (2009). "Effect of suction on resilient modulus of compacted fine-grained subgrade soils", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2101, pp. 82-87.
- Seed, H.B., Chan, C.K. y Lee, C.E. (1962). "Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements", *Conference Proceedings: International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, USA, Vol. 1, pp. 611-636.
- Witczak, M.W. y Uzan, J. (1988). "The Universal Airport Design System, Report I of IV: Granular Material Characterization", Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park, Maryland.
- Witczak, M.W. Andrei, D. y Houston, W.N. (2000). "Resilient Modulus as Function of Soil Moisture – Summary of Predictive Models", Development of the 2002 Guide for the Development of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37 A, Inter Team Technical Report (Seasonal 1), Arizona State University, Tempe, Arizona.
- Yang, R.R., Huang, W.H. y Tai, Y.T. (2005). "Variation of resilient modulus with soil suction for compacted subgrade soils", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1913, pp. 99-106.
- Zapata, C.E. y Cary, C.E. (2009). "A new generation of resilient modulus characterization of unbound materials", en: *Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support, Geotechnical Special Publication No. 187*, Selected papers from the 2009 International Foundations Congress and Equipment Expo, ASCE, Orlando, Florida, pp. 377-384.
- Zapata, C.E. y Houston, W.N. (2009). "Calibration and Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model for Pavement Design", NCHRP Report 602, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, 62 p.
- Zapata, C.E., Andrei, D., Witczak, M.W. y Houston, W.N. (2007). "Incorporation of environmental effects in pavement design", *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 8, No. 4, pp. 667-693.
- Zapata, C.E., Perera, Y.Y. y Houston, W.N. (2009). "Matric suction prediction model in new AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2101, Geology and Properties of Earth Materials, pp. 53-62.