

MODELO LEMaC-B05/16 DE ESTIMACION DE CONSTANTES DE LAS ECUACIONES CONSTITUTIVAS DE MATERIALES GRANULARES DEL ME-PDG, A PARTIR DE ANALISIS CONVENCIONALES

Julián Rivera, Luciano Brizuela, Constanza Verdú, Mauro Domínguez, Martín Villanueva,
Gladys Sosa

LEMaC Centro de Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional Facultad
Regional La Plata, Calle 60 y 124, (1900) La Plata, Bs. As., Argentina
+54-221-4890413, jrivera@frlp.utn.edu.ar

RESUMEN

La consideración de un material granular en un modelo de diseño estructural de pavimentos con componente mecanicista, ya sea que ese material intervenga constituyendo alguna de las capas del paquete estructural o participe como subrasante, se realiza en forma directa mediante la definición de su ecuación constitutiva, tal cual sucede en el Nivel 1 de entrada de datos del modelo ME-PDG de la estadounidense NCHRP. Debido a que los coeficientes de esta ecuación para cada caso en particular surgen de la implementación de un ensayo que aun hoy en día no resulta de uso difundido a nivel general, como es el caso del ensayo de Módulo Resiliente, el modelo admite la consideración de estos materiales en forma indirecta, implementando internamente modelos de correlación para su Nivel 2 y 3 de entrada de datos. Estos modelos de correlación son de base empírica, siendo por lo tanto desarrollados a partir de materiales que no necesariamente reflejan nuestras condiciones locales, y se emplean mayoritariamente a partir de parámetros discretos (Valor Soporte Relativo, Penetración con Penetrómetro Dinámico de Cono, etc.), lo cual desvirtúa la capacidad de representar en forma continua el comportamiento del material analizado.

Atentos a esta situación se ha encarado un trabajo de investigación, encuadrado en el Proyecto I+D “Análisis para la calibración a las condiciones locales de modelos para el diseño de pavimentos basados en evaluaciones superficiales y estructurales”, que permita arribar a modelos de correlación para la ecuación constitutiva del ME-PDG, obtenidos a partir de materiales locales y considerando parámetros múltiples, como una forma de elevar su confiabilidad. Los avances registrados en la obtención de dichos modelos preliminares se presentan en este trabajo, bajo su codificación LEMaC-B05/16 de la “Guía de metodologías y procedimientos para uso vial desarrolladas en el LEMaC”.

INTRODUCCION

El Módulo Resiliente (M_r) se ha constituido en un parámetro fundamental para caracterizar a los suelos y materiales granulares, ya sea que los mismos conformen la subrasante y/o sean material constituyente de bases y subbases sin tratar del paquete estructural de un pavimento flexible (Kim y Ryeol, 2007). Como es sabido, este parámetro puede ser representado en forma continua mediante una ecuación, mediante la cual ante valores puntuales de tensor desviador y confinamiento se puede estimar el módulo de respuesta obtenible por el material, al aplicar modelos modernos de análisis estructural mecanicista de pavimentos (Rada et al, 2003). Este aspecto resulta así superador del clásico análisis de

esos mismos materiales a partir de parámetros acotados, como puede ser el caso del Valor Soporte Relativo (*VSR*) de un material, que en el mejor de los casos, lo cual no resulta habitual, puede ser definido para una Densidad, Humedad de Compactación, Sobrecarga y Grado de Saturación dados (Dominguez y Verdú, 2015). En otros casos incluso se utilizan resultados de penetración promedio con el Penetrómetro Dinámico de Cono (*DCP*) que puede tener asociada una menor precisión aún.

Una de las formas de expresión de esta ecuación la constituye la Ecuación Universal (EU) desarrollada por Uzan, empleada para materiales granulares, ya sea que se trate de materiales friccionales o cohesivos (Alderete, 2011). Dicha ecuación se aplica en la “Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures” originada por el National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) de la estadounidense Transportation Research Board (TRB), conocida comúnmente como ME-PDG, de la manera que puede observarse en la Ecuación 1 (NCHRP, 2004).

$$Mr = k_1 \cdot 0,1 \cdot \left(\frac{\theta}{0,1} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{octa}}{0,1} + 1 \right)^{k_3} \quad (1)$$

Donde:

$$\theta = \text{Invariante de Tensiones} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_d + 3 \cdot \sigma$$

$$\tau_{octa} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_d$$

k_1, k_2, k_3 = Constantes de calibración del material

Correspondiendo σ_3 a la tensión de confinamiento y σ_d al tensor desviador, ambos en MPa

En su aplicación rigurosa, las constantes de calibración k_1, k_2, k_3 se obtienen por regresión a partir de los resultados obtenidos al realizar la determinación del Módulo Resiliente mediante el ensayo establecido por la norma AASHTO T307-99 (2003). Con la aplicación de dicha norma se obtienen 15 combinaciones de Mr , σ_3 y σ_d que conforman una descripción discreta del material analizado (Dominguez y Verdú, 2015). En la Figura 1 se observa la cámara triaxial y parte de las instalaciones que permiten la aplicación y medición de los esfuerzos y deformaciones en forma dinámica para la determinación del Mr con los que cuenta el LEMaC.



Figura 1. Parte del equipamiento necesario para determinaciones de M_r

No obstante estos conceptos y la normativa existente llevan varios años desde su desarrollo, en el medio local no han logrado insertarse de la forma que sería esperable, dado el significativo avance conceptual que implican. Como prueba de esto basta decir que, al menos en el conocimiento de los autores, sólo existen en el país 2 equipos que permitirían efectuar el ensayo, contándose con datos de que en muchos de los restantes países latinoamericanos no se cuenta con ningún equipo en funcionamiento.

Este aspecto puede salvarse en el ME-PDG, a costa de rigurosidad en la obtención de resultados, mediante el empleo de datos con menores niveles de complejidad. Para ello la guía establece tres niveles en tal sentido, denominándose como Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3, que van desde la máxima complejidad en los datos hacia la mínima, en ese orden (NCHRP, 2004). Particularmente a lo que hace a la consideración de los materiales que aborda este trabajo, el Nivel 1 de datos se alcanza al definir las constantes k_1, k_2, k_3 según ya se adelantara. La implementación de un Nivel 2 ya implica la obtención del M_r por correlación con un único parámetro de referencia (*VSR*, penetración con DCP, etc.). De esta forma se pierde notoriamente la potencialidad de empleo que la guía suministra. En la Figura 2 se observa el ensayo de una probeta de *VSR* en las instalaciones del LEMaC, dejando a las claras la enorme diferencia de complejidad de equipamiento existente con el de determinación de M_r mostrado en la Figura 1.



Figura 2. Ensayo de VSR

Una de las formas de evitar tal pérdida es la de instrumentar modelos que permitan arribar con cierta confiabilidad, mediante la aplicación de ensayos convencionales más al alcance de la ingeniería vial a nivel regional, a las constantes k_1, k_2, k_3 siendo este el motivo principal que llevó a los profesionales del LEMaC al desarrollo de las tareas que se presentan en este trabajo técnico, constituyendo una primera comunicación en tal sentido.

MATERIALES Y METODOS

La metodología de análisis a ser aplicada se basa en la determinación para diversos materiales de las constantes k_1, k_2, k_3 mediante la aplicación de la norma AASHTO T307-99 (2003) y el consecuente análisis por regresión ya citado (Groeger et al, 2003; Tutumluer, 2001).

Luego sobre esos mismos materiales se efectúan determinaciones de los parámetros clásicos de identificación de los mismos (DNV, 1998), obtenidos mediante su Clasificación HRB, el Ensayo Proctor, el Ensayo de VSR, etc.

Finalmente mediante la aplicación de técnicas de regresión se analiza la posibilidad de obtención de modelos confiables que relacionen las constantes de calibración con uno o más de estos parámetros clásicos.

Para llevar a cabo la primera parte de la investigación, se decide analizar los suelos Tipo 2 según la Norma AASTHO T 307 (2003). En tal sentido la norma establece que los materiales se pueden clasificar como (AASHTO, 2003; Brizuela et al, 2013):

- Material Tipo 1: Incluye muestras de sub-base, base y subrasante (sin tratar) que tengan menos del 70 % pasante del tamiz N°10, menos del 20 % pasante del tamiz N°200 y un Índice de Plasticidad de 10 o inferior.
- Material Tipo 2: incluye muestras de sub-base, base y subrasante (sin tratar) que no cumplan con los requisitos mencionados para el material Tipo 1.

Habitualmente los suelos que cumplen con las características citadas para los Tipo 2 se encuentran comprendidos a su vez entre las categorías A-4 y A-7 de la Clasificación HRB (es decir son suelos tipo A-4, A-5, A-6, A-7-5 y A-7-6). De este modo se individualizaron siete suelos diferentes que cumplen con estas características, a los cuales se le realizaron los ensayos viales clásicos citados, obteniéndose los resultados que se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Algunos de los parámetros obtenidos mediante la caracterización clásica de los suelos utilizados

Suelo N°	Clasificación	Proctor	VSR
1	A4 (0)	$\gamma_s \text{ max} = 1,457$	23%
	LL = 34		
	LP = 0	H op = 23,4 %	
	IP = 0		
2	A4 (3)	$\gamma_s \text{ max} = 1,499$	8,6%
	LL = 34		
	LP = 26	H op = 23,7 %	
	IP = 8		
3	A5 (12)	$\gamma_s \text{ max} = 1,516$	3,0%
	LL = 42		
	LP = 33	H op = 22,5 %	
	IP = 9		
4	A6 (12)	$\gamma_s \text{ max} = 1,558$	2,6%
	LL = 38		
	LP = 25	H op = 20,5 %	
	IP = 13		
5	A7-5 (7)	$\gamma_s \text{ max} = 1,388$	13,6%
	LL = 44		
	LP = 33	H op = 29,8 %	
	IP = 11		
6	A7-5 (42)	$\gamma_s \text{ max} = 1,395$	0,3%
	LL = 67		
	LP = 31	H op = 26,6 %	
	IP = 36		
7	A7-6 (31)	$\gamma_s \text{ max} = 1,536$	2,3%
	LL = 54		
	LP = 26	H op = 21,9 %	
	IP = 28		

Paralelamente se realiza la caracterización dinámica de estos siete suelos, elaborando al menos 3 probetas por cada uno de ellos, siguiendo los lineamientos del Apéndice C de la norma. Una vez completado el moldeo se procedió al ensayo de M_r , obteniéndose para cada suelo los 15 grupos de valores a ser utilizados en las regresiones para la obtención de

las constantes de calibración. A manera de ejemplo puede observarse en la Tabla 2 los resultados obtenidos con una de las probetas ensayadas perteneciente al Suelo 1.

Tabla 2. Resultados de M_r en Suelo 1

Serie	M_r [MPa]	σ_d [MPa]	σ_3 [MPa]
1	92	0,041	0,009
2	81	0,041	0,023
3	76	0,04	0,027
4	69	0,04	0,04
5	65	0,04	0,063
6	69	0,026	0,017
7	79	0,026	0,019
8	58	0,026	0,024
9	66	0,027	0,042
10	59	0,026	0,054
11	59	0,012	0,005
12	52	0,013	0,023
13	53	0,012	0,028
14	56	0,013	0,046
15	58	0,012	0,065

En la Tabla 3 se vuelcan los resultados obtenidos de k_1, k_2, k_3 para los 7 suelos analizados, junto con el Coeficiente de Determinación (R^2) de las regresiones efectuadas. Los valores que se muestran son para cada suelo los de aquella probeta que permite arribar al mayor R^2 , utilizado como criterio de selección en tal sentido.

Tabla 3. Valores de k_1, k_2, k_3 obtenidos en los suelos

Suelo	k_1	k_2	k_3	R^2
1	37,882	0,316	-0,385	0,88
2	449,584	0,192	0,234	0,64
3	265,354	0,195	0,054	0,57
4	78,475	0,096	-0,141	0,71
5	81,611	0,309	-0,134	0,63
6	34,004	-0,055	-0,158	0,74
7	165,696	-0,173	0,153	0,54

ANALISIS DE RESULTADOS

Con los valores obtenidos volcados en el apartado anterior, se procede al desarrollo de los modelos por regresión para la estimación mediante los parámetros obtenidos mediante ensayos tradicionales de las constantes de calibración k_1, k_2, k_3 .

En forma genérica se realiza inicialmente un análisis de correlación entre los diversos parámetros clásicos, considerados en este caso como variables independientes. Es dable aceptar en tal sentido, como un indicador empírico, que valores de correlación por fuera de $[-0,5, 0,5]$ pueden considerarse significativos, resultando en una evidencia de multicolinealidad en el desarrollo de modelos de regresión múltiples (Vilar Fernández, 2003; Spiegel, 1988). Se observa que dichos valores se alcanzan al cotejar el Límite Plástico (*LP*) con otros parámetros tales como la Humedad Óptima (*Hop*) y el Índice de Plasticidad (*IP*). Esto resulta obvio por otro lado al ser analizado conceptualmente, ya que es sabido que el *LP* se ubica habitualmente algunos puntos por encima de la *Hop*, y que el *IP* se correlaciona con el *LP* al contarse también con el Límite Líquido (*LL*), ya que se calcula como la diferencia entre ambos parámetros. Por lo aquí expresado se deja de lado la consideración del *LP* en las regresiones, evitando la correlación hallada.

Desarrollo del modelo para k_1

Para la obtención del modelo de correlación de dicha constante se efectúan inicialmente análisis de regresión lineal múltiple. El primer análisis se efectúa relacionando esta constante con todas las variables independientes restantes. Se obtiene de este modo variables de baja significancia, de acuerdo al criterio de las probabilidades asociadas a los estadísticos de *t student* correspondientes a cada variable independiente. Al ir dejando de lado estas variables independientes en regresiones subsiguientes, se arriba en todos los casos a coeficientes R^2 ajustado por debajo del límite empírico impuesto para el análisis de 0,7. De esta forma se deduce que no es posible conducir un análisis de regresión lineal múltiple para esta constante.

Se recurre entonces a correlacionar mediante regresión lineal simple a la constante con cada una de las variables independientes, obteniéndose los mejores resultados para la variable *VSR*.

Al analizar más detalladamente la relación entre ambos parámetros se observa que dos de los datos de entrada estarían presentando respecto del modelo resultante residuos estandarizados muy por encima de $[2,0]$, valor que empíricamente indica que dichos datos pueden considerarse atípicos. Si bien los datos con los que se cuenta al momento resultan escasos, se ha podido observar hasta *VSR* de 10, una tendencia lineal entre ambos. Resta claramente ampliar la base de datos para la regresión, sobre todo con valores confiables relacionables con suelos que presenten un *VSR* superior a 10. Por lo expresado, hasta el momento el mejor modelo alcanzado para la estimación de la constante k_1 es el que se observa en la Ecuación 2.

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 49,699 \times VSR + 31,634 \quad (R^2 = 0,87) && \text{cuando } 0 < VSR < 10 \\
 k_1 &= 450 && \text{cuando } VSR > 10
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Desarrollo del modelo para k_2

Para esta constante se condujo un análisis de regresión lineal múltiple análogo al utilizado con k_1 mediante el cual se fueron dejando de lado en subsecuentes regresiones diversas variables independientes en función de su significancia. Finalmente se arriba a una

expresión en donde se consideran como variables independientes a la Densidad Seca Máxima (D_{sm}) obtenida mediante el Ensayo Proctor y al Índice de Grupo (IG) calculado en función de las Constantes Físicas y Granulometría de los suelos, presentando una probabilidad asociada para el estadístico de *t student* de 0,029 y 0,002 respectivamente. Al encontrarse ambos valores ubicados por debajo de 0,050 puede deducirse que estas variables son estadísticamente significativas para un intervalo de confianza del 95 %. La función de regresión obtenida es la que se observa en la Ecuación 3.

$$k_2 = 1,986 - 1,144 \times D_{sm} - 0,011 \times IG \quad (R^2 = 0,94) \quad (3)$$

Desarrollo del modelo para k_3

Para esta constante el análisis resulta por el momento infructífero, sin arribarse aún a modelos confiables. Cabe señalar la incidencia de dicha constante en la estimación del M_r , entendiendo que la misma oscila entre valores extremos de 1 y -1, y que además el tensor desviador presenta siempre valores menores a la unidad, lo cual indica una combinación extremadamente sensible al modelo, por lo que se debe estudiar en detalle. Lo señalado puede observarse en la Figura 3.

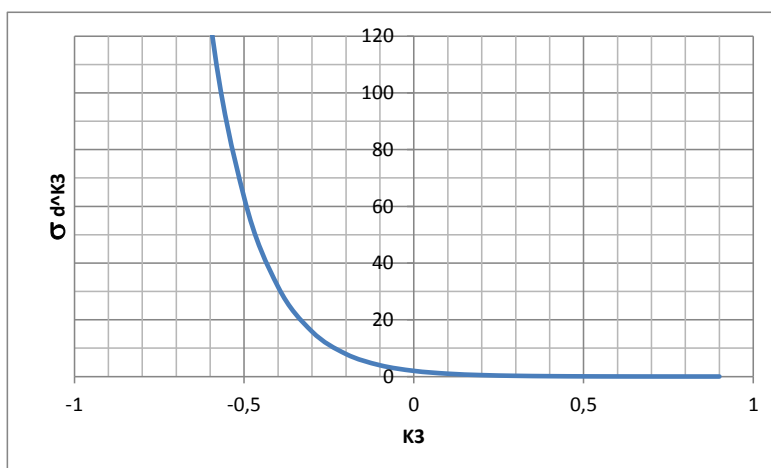


Figura 3. Análisis numérico de la variación de $\sigma_d^{k_3}$ vs k_3 .

CONCLUSIONES

Se pueden desprender como conclusiones del presente trabajo que:

- El diseño estructural de pavimentos flexibles basados en análisis mecanicistas implican una evolución en la consideración de los materiales granulares por medio de su respuesta modular dinámica.
- El aprovechamiento de dicha evolución se logra en análisis con ME-PDG utilizando datos Nivel 1, relacionados con la ecuación constitutiva de cada material.

- Ante la ausencia de dichos datos el empleo de un Nivel 2 hace que lo ganado en complejidad del modelo se pierda en la utilización de correlaciones sencillas entre ensayos clásicos y la respuesta modular dinámica.
- Es posible desarrollar por lo tanto modelos adaptados a los materiales locales que no correlacionen los resultados obtenidos mediante ensayos clásicos con la respuesta modular, sino con las constantes de calibración de la ecuación constitutiva del material.
- La obtención de estos modelos puede lograrse mediante técnicas de regresión, restando aumentar en esta aplicación el número de suelos analizados y los esfuerzos en la obtención de los modelos para cada una de las constantes de calibración.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AASHTO, "AASHTO T 307-99(2003): Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials", American Association of State Highway and Transportation Officials, EEUU, 2003.

ALDERETE N, "Fundamentos Teóricos y Desarrollo del Procedimiento de ensayo de Modulo Resiliente", Tesis de Becarios de Investigación LEMaC 2010, ISSN 2250-7221, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 2011.

BRIZUELA L, ALDERETE N, RIVERA J, "Procedimientos de moldeo para suelos granulares complementario a la Norma AASTHO T-307 para el ensayo de módulo resiliente de suelos viales", Revista Construyendo Caminos, Año 2, Edición 8, Perú, 2013.

DNV, "Normas de Ensayos de la Dirección Nacional de Vialidad", Argentina, 1998.

DOMINGUEZ M, VERDU C, "Correlación de ensayos viales clásicos y los parámetros de la ecuación de Uzan para Módulo Resiliente en suelos Tipo 2", Tesis de Becarios de Investigación LEMaC 2014, ISSN 2250-7221, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 2015.

GROEGER J, RADA G, LOPEZ A, "AASHTO T307 – Background and Discussion," Resilient Modulus Testing for Pavement Components, ASTM STP 1437, EEUU, 2003.

KIM D, RYEOL K, "Resilient behavior of compacted subgrade soils under the repeated triaxial test", Construction and Building Materials, N° 21, EEUU, 2007.

NCHRP, "Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures", National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, EEUU, 2004.

RADA G, GROEGER J, SCHMALZER P, LOPEZ A, "Resilient Modulus Testing of Unbound Materials: LTPP's Learning Experience," Resilient Modulus Testing for Pavement Components, ASTM STP 1437, EEUU, 2003.

SPIEGEL M, "Estadística", Mc Graw Hill, EEUU, 1988.

TUTUMLUER E, "Testing of Unbound Aggregates and Subgrade Soils at the University of Illinois", MC-250, University of Illinois at Urbana-Champaign, EEUU, 2001.

VILAR FERNÁNDEZ J, "Modelos Estadísticos aplicados", Universidade da Coruña, España, 2003.