

Título del trabajo: RESPUESTA RESILIENTE DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES. ANÁLISIS DE LA APROXIMACIÓN DE LOTFI.

Autores: *Ings. Silvia ANGELONE y Fernando MARTÍNEZ*

Colaborador: Ing Daniel Gallelli

Dirección: Berutti y Riobamba - 2000 - Rosario - Argentina

Teléfono: 0341-4808538 /4808539 int. 36 Fax:0 341-4808540

e-mail: sangelon@eie.fceia.unr.edu.ar

Entidad u organismo al que pertenece: Laboratorio Vial - Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Universidad Nacional de Rosario

XXXI Reunión Anual del Asfalto, Carlos Paz, noviembre de 2000.

RESUMEN

El módulo resiliente de las bases, sub-bases y subrasantes de suelos es un parámetro fundamental de los nuevos métodos de diseño de pavimentos con bases mecanicistas. Varios protocolos de ensayo para determinar los módulos resilientes en laboratorio han sido propuestos y evaluados por diferentes agencias y consecuentemente, un número significativo de modelos describiendo el comportamiento no lineal de este tipo de materiales han sido desarrollados.

A partir de 1982, cuando un equipo de laboratorio para determinar módulos resilientes fue desarrollado en la Universidad de Rosario, muchos suelos y materiales no ligados han sido ensayados de acuerdo con el procedimiento AASHTO T294-92. Los resultados obtenidos fueron analizados usando diferentes modelos que describen la dependencia tensional del módulo resiliente y por ende, su respuesta no lineal.

En ese sentido, Lotfi y otros [1988] han desarrollado un interesante modelo empírico describiendo el comportamiento no lineal de suelos finos a partir del CBR y el tensor desviador aplicado utilizando métodos de correlación.

El artículo presenta, a modo de estado del arte, distintos modelos que describen la dependencia tensional del comportamiento resiliente de los suelos y realiza un análisis sobre la aplicabilidad de la aproximación de Lotfi a partir de un conjunto de resultados experimentales obtenidos previamente.

1. INTRODUCCION

A partir de la incorporación de los métodos de diseño racionales en nuestro medio surge la necesidad de obtener los datos de ingresos de dichos programas de cálculo, que sean confiables y representativos de las condiciones in situ.

Dentro de los más importantes se encuadran la determinación de las características tenso-deformación y los criterios de fallas de los distintos materiales componentes de la estructura (1).

En ese sentido, el Laboratorio Vial del IMAE, se plantea un programa de investigación sobre la "Caracterización de materiales de uso vial". Dentro del mismo, en 1982, se desarrollaron equipos capaces de medir el módulo resiliente de suelos, materiales no ligados y materiales con ligantes asfálticos o hidráulicos.

Sobre la base de estos avances fue posible estudiar el comportamiento resiliente de suelos y distintos materiales de uso no convencional. Los resultados obtenidos, en forma ininterrumpida durante los últimos 18 años, han sido siempre publicados en las reuniones Anuales del Asfalto y en los Congresos Ibero Latinamericanos del Asfalto, (2) (3).

No obstante, recién en los últimos dos o tres años, otros grupos en la Argentina han empezado a evaluar a través de ensayos directos, el comportamiento resiliente de los suelos y los materiales granulares. Mientras que anteriormente sólo se lo estimaba usando correlaciones empíricas con el valor soporte relativo (CBR), u otra propiedad del suelo.

Este artículo presenta, a modo de estado del arte, distintos modelos que describen la dependencia tensional del comportamiento resiliente de los suelos y realiza un análisis sobre la aplicabilidad de la aproximación de Lotfi a partir de un conjunto de resultados experimentales obtenidos previamente.

2. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS – MODELOS DE COMPORTAMIENTO

Históricamente, la caracterización mecánica de los suelos con referencia al diseño estructural de los pavimentos, se ha efectuado a través del Valor Soporte Relativo CBR. Este valor, determinado a través de un ensayo de corte (punzonamiento) es de carácter empírico y no está vinculado a ninguna propiedad mecánica fundamental de los suelos y los materiales granulares.

A partir de 1962, Seed y otros introducen el concepto de Módulo resiliente (M_r), definiéndolo como la relación entre el tensor desviador dinámico aplicado y la componente de la deformación específica resiliente o recuperable, bajo un pulso dinámico de carga. El valor del M_r , así propuesto, fue rápidamente aceptado por la comunidad vial internacional en función de las muchas evidencias obtenidas

sobre este tipo de comportamiento “pseudo elástico” a través de mediciones de la deflexión recuperable del pavimento con equipos como la regla Benkelman y/o el deflectómetro Lacroix, el cálculo de los módulos de deformación mediante procedimientos de retroajuste y el comportamiento observado en pavimentos en servicio. En la última década el valor del Módulo resiliente ha sido reconocido como una forma adecuada de caracterizar los materiales no ligados. No obstante, aún requiere un mejor conocimiento sobre la forma más apropiada de llevar a cabo los ensayos de laboratorio, los modelos que representan esos resultados experimentales y la implementación de los mismos dentro de las rutinas de cálculo en los programas computacionales de dimensionamiento de pavimentos (4). Inicialmente, los primeros intentos para introducir el Mr en los procedimientos de diseño estructural de pavimentos se han basado en correlaciones empíricas con el CBR u otras propiedades de los suelos y materiales granulares. Algunas de estas relaciones se presentan en la TABLA 1.

$Mr = 10 \text{ CBR} \quad (\text{MPa})$	Método de diseño SHELL (de Heukelomp and Foster – 1960) (5).
$Mr = 38 \text{ CBR}^{0.711} \quad (\text{MPa})$	U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (de Green and Hall – 1975) (4)
$Mr = 21 \text{ CBR}^{0.65} \quad (\text{MPa})$	South African Council on Scientific and Industrial Research (CSIR) (6)
$Mr = 18 \text{ CBR}^{0.64} \quad (\text{MPa})$	Transport and Road Research Laboratory (TRRL) (de Lister –1987)(6)
$Mr = B \cdot \text{CBR} \quad (\text{MPa})$ 5.25 < B < 21 y B = 10.5 para CBR < 10	AASHTO Design Guide (7)
Para suelos cohesivos $Mr = 200 \cdot \text{DN}^{-0.5} \quad (\text{MPa})$ Para materiales granulares $Mr = 400 \cdot \text{DN}^{-0.5} \quad (\text{MPa})$	IMAE (8)

TABLA 1: Relaciones empíricas

Donde:

Mr: módulo resiliente

CBR: Valor soporte relativo

DN: Índice de Penetración del Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) en mm/golpe

Si bien estas relaciones son una aproximación a la caracterización racional de este tipo de materiales, todas ellas tienen como principal limitación que proporcionan un valor único para el módulo resiliente, representativo de un modelo “lineal” (no dependiente del estado de tensiones aplicado). Sin embargo, numerosas evidencias presentadas en la bibliografía indican que los suelos y los materiales granulares muestran un comportamiento que depende del estado de tensiones aplicado, característico de los modelos “no lineales”. Posteriormente, y con el

objeto de incorporar este comportamiento no lineal, distintos investigadores han propuesto otros modelos que pueden ser clasificados como Modelos Bilineal, Semilogarítmico, Hiperbólico y Bi-logarítmico Log-Log. Algunos de estos modelos tenso-dependientes se presentan en la Tabla 2:

<u>Modelo Bilineal</u>	$Mr = K_2 + K_3 (K_1 + \sigma_d) \quad K_1 \geq \sigma_d$ $Mr = K_2 + K_4 (\sigma_d - K_1) \quad K_1 < \sigma_d$	Univ.de Illinois (Thompson and Robert 1979-Thompson 1989) (10)
<u>Modelo Semilogarítmico</u>	$\text{Log } Mr = C_1 + C_2 \cdot \sigma_d$	Universidad de Illinois.(4)
<u>Modelo Hiperbólico</u>	$Mr = (g_1 + g_2 \sigma_d) / \sigma_d$ (cambio de variable $y = Mr \cdot \sigma_d$)	Universidad de Tennessee (Boateng, Poku and Drumm–1989) (4)
<u>Modelos bilogarítmicos Log-log</u>	$Mr = A \sigma_d^{-B}$	Seed y otros, Univ. de California, 1962, para suelos cohesivos(11)
	$Mr = A (\sigma_d / p'_o)^{-B}$	Brown y otros, Univ. de Nottingham, 1975, para suelos cohesivos (12).
	$Mr = A \sigma_3^B$	Monismith y Seed, Univ. de California, 1967, para suelos granulares y por Dunlap en la Univ. de Texas, en 1963.
	$Mr = A (\theta / p_a)^B$	Duncan y Chan, Univ. de California, 1970, para suelos granulares (14).
	$Mr = A \theta^B$	Hicks y Monismith (1971), Kalcheff y Hicks (1973) y Allen y Thompson, Univ. de Illinois, 1974, (15)
	$Mr = A \sigma_d^{-B} \theta^C$	Uzan, 1985 en la Univ. de Maryland (16) (17)
	$Mr = K_2 + K_3 (K_1 + \sigma_d) \cdot \sigma_3^{K_5}$ Para $K_1 > \sigma_d$ $Mr = K_2 + K_4 (\sigma_d - K_1) \cdot \sigma_3^{K_5}$ Para $K_1 < \sigma_d$	Aranovich, COPPE, UFRJ, Univ. Federal de Río de Janeiro, 1985 (18), modelo bilineal, incorporando la dependencia con σ_3
	$Mr = A \sigma_d^{-B} \sigma_3^C$	Laboratorio Vial - Imae (Angelone y Martínez- 1990 – FCEIA-UNR (19))
$Mr = A \tau_{oct}^{-B} \theta^C$	Shackel, Australian Road Research 1973, (17). En 1992, Witczak y otros, Univ.de Maryland	

TABLA 2: Modelos tenso-dependientes

Donde:

σ_d : tensor desviador aplicado, $(\sigma_1 - \sigma_3)$

K_i, C_i y g_i : constantes de ensayo

σ_1 : tensión principal mayor

σ_3 : presión de confinamiento lateral, o la tensión principal menor

p'_o : presión efectiva

θ : primer invariante de tensiones ($\theta = \sigma_d + 3 \cdot \sigma_3$)

p_a : presión atmosférica

A, B, C : constantes de ensayo

τ_{oct} : tensión de corte octaédrica ($\tau_{oct} = 1/3 \sqrt{2} \sigma_d$)

2.1. Aproximación de Lotfi

En 1984-1988, en la Universidad de Maryland, Lotfi desarrolló una relación empírica predictiva del módulo resiliente para suelos finos. El modelo describe el comportamiento “no-lineal” del Mr para suelos finos de subrasante a partir del valor del CBR y el tensor desviador aplicado.

El mismo modelo es reportado, luego, por Witczak (1995) y considerado como un modelo empírico muy interesante para tener en cuenta la respuesta “no-lineal” del Mr.

La ecuación ha sido establecida mediante métodos de correlación para valores del CBR entre 2 y 21 %, para 13 suelos y para distintas condiciones de humedad y densidad. La ecuación final desarrollada es:

$$\text{Log Mr} = 1.0016 + 0.043 (\text{CBR}) - 1.9557 (\log s_d) / (\text{CBR}) - 0.1705 (\log s_d) \quad (i)$$

ó

$$\text{Mr} = \text{Ka} s_d^{\text{Kb}} \quad (ii)$$

$$\text{Ka} = 10^{(1.0016 + 0.043 (\text{CBR}))}$$

$$\text{Kb} = - (1.9557 / (\text{CBR}) + 0.1705)$$

Donde

Mr: está expresado en ksi

s_d : está expresado en psi

Si se trabaja con σ_d y Mr en MPa, la forma de la ecuación de Lotfi resulta:

$$\text{Mr} = \text{Ka} s_d^{\text{Kb}} \quad (iii)$$

$$\text{Ka} = 10^{(1.4793 + 0.043 \text{ CBR} - 4.2143 / (\text{CBR}))}$$

$$\text{Kb} = - \{ (1.9557 / (\text{CBR})) + 0.1705 \}$$

Como puntualiza Witczak, el mayor significado de la aproximación de Lotfi radica en que ésta representa una “transición” entre los modelos empíricos basados en el CBR y los modelos basados en la respuesta no-lineal del Mr para los suelos de subrasante (4).

2.2. Materiales utilizados

Con el fin de establecer si la aproximación de Lotfi se adecua a suelos locales se consideraron 11 suelos finos de los cuales sólo 7 fueron incorporados al estudio comparativo, ya que los CBR de cuatro de ellos superaban el rango de uso y se verificó la no correspondencia de valores del Mr.

Los suelos finalmente seleccionados y sus características se muestran en la Tabla 3.

Suelo	HRB	CBR	Proctor	g_{dmax} gr/cm ³	W_{opt} %	g_d gr/cm ³	W %	LL	IP
1	A 7-6 (12)	13	T99	1.495	26.8	1.496	27.00	54.7	25.7
2	A 7-6 (12)	16	T99 ref	1.506	26.5	1.506	26.53	54.7	25.7
3	A 7-6 (11)	6.5	T99	1.510	25.3	1.526	25.70	44.0	14.5
4	A 4(8)	14	T180	1.840	15.3	10802	15.24	25.3	5.5
5	A 6(9)	5	T99	1.598	22.0	1.631	20.90	36.0	11.0
9	A 4(8)	9	T180	1.538	20.4	1.397	20.60	26.4	NP
11	A 4(8)	12	T99	1.567	22.8	1.552	22.36	31.5	9.8

TABLA 3: Características de los suelos

2.3. Análisis de la Aproximación de Lotfi

Los suelos descriptos en la Tabla 3 han sido ensayados siguiendo el procedimiento de la norma AASHTO T 294-92 “Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils – SHRP Protocol P46”, con el objeto de obtener valores experimentales del Mr.

Los mismos son analizados mediante los modelos correspondientes a suelos cohesivos $Mr = G s_d^H$ y el desarrollado por Lotfi (ecuación (ii)). Ambas aplicaciones se muestran en la Tabla 4.

En la Figura 1 se muestra una comparación entre los valores experimentales y los obtenidos mediante la aproximación de Lotfi, donde se observa que se alinean alrededor de una recta a 45°.

SUELO HRB	CBR	S _d	S _d	Modelo $M_r = G \cdot (S_d)^H$			Aproximación LOTFI		
		psi	MPa	Mr MPa	G	H	Ka	Kb	MR lotfi MPa
1	13	2	0.014	196	108	-0.14	52	-0.32	204
A 7-6 (12)		4	0.028	178					163
		6	0.042	168					143
		8	0.056	162					131
		10	0.070	157					122
2	16	2	0.014	289	244	-0.04	80	-0.29	280
A 7-6 (12)		4	0.028	282					228
		6	0.042	277					203
		8	0.056	274					186
		10	0.070	271					175
3	6.5	2	0.014	103	45	-0.194	13	-0.47	96
A 7-6 (11)		4	0.028	90					70
		6	0.042	83					57
		8	0.056	79					50
		10	0.070	75					45
4	14	2	0.014	197	104	-0.150	60	-0.31	227
A 4(8)		4	0.028	178					183
		6	0.042	167					161
		8	0.056	160					147
		10	0.070	155					138
5	5	2	0.014	92	33	-0.240	7	-0.56	78
A 6(9)		4	0.028	78					53
		6	0.042	71					42
		8	0.056	66					36
		10	0.070	62					32
9	9	2	0.014	89	38	-0.200	25	-0.39	131
A 4(8)		4	0.028	78					100
		6	0.042	72					85
		8	0.056	68					76
		10	0.070	65					70
11	12	2	0.014	92	41	-0.190	44	-0.33	183
A 4(8)		4	0.028	81					145
		6	0.042	75					127
		8	0.056	71					115
		10	0.070	68					107

TABLA 4: Resultados de los modelos empleados

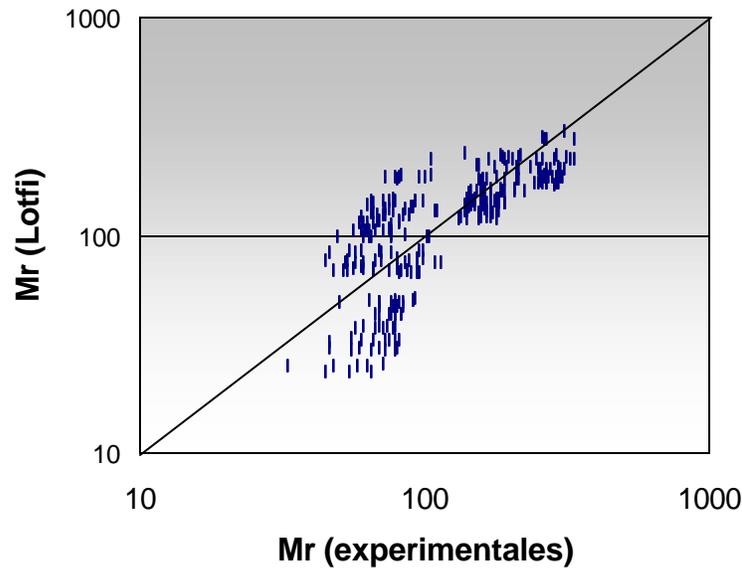


FIGURA 1: Comparación de los módulos experimentales y los obtenidos de la aproximación de Lotfi

Por otra parte, utilizando una ecuación de la misma forma que la planteada por Lotfi:

$$\text{Log Mr} = A + B (\text{CBR}) + C 1/(\text{CBR}) + D (\log s_d)/(\text{CBR}) + E (\log s_d) \quad (\text{iv})$$

y aplicándola a los valores experimentales propios del módulo resiliente de los 7 suelos analizados y el valor soporte relativo correspondiente, se ajustaron por regresión matemática, los coeficientes de la misma, encontrándose la siguientes ecuación modificada:

$$\text{Log Mr} = -0.137 + 0.13 \text{ CBR} + 5.61 / \text{CBR} - 0.722 (\log s_d) / \text{CBR} - 0.0467 (\log s_d)$$

ó

$$\text{Mr} = K'a s_d^{K'b} \quad (\text{v})$$

con:

$$K'a = 10^{(-0.137 + 0.13 \text{ CBR} + 5.61 / (\text{CBR}))}$$

$$K'b = - \{ (0.722 / (\text{CBR})) + 0.0467 \}$$

$$r^2 = 77 \%$$

La Figura 2 indica la relación existente entre la regresión obtenida a partir de los datos experimentales (ecuación (v)) y los módulos obtenidos con la ecuación (iii)

de Lotfi. Se observa que no todos los puntos se ubican sobre la recta a 45°, registrándose tanto valores por encima como por debajo de la recta.

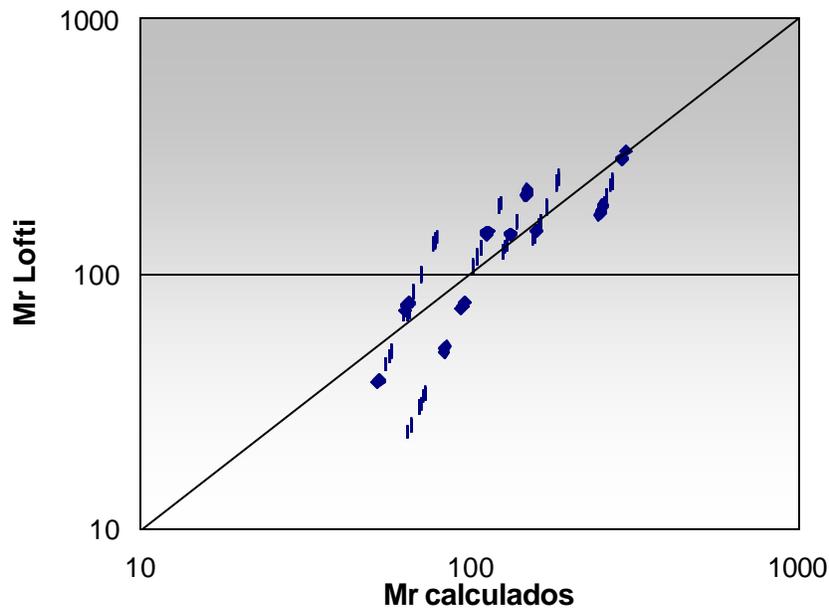


FIGURA 2: Comparación de los Mr obtenidos con la ecuación de Lotfi y los Mr calculados con la ecuación modificada

2.3.1. Análisis de racionalidad de la aproximación de Lotfi

Para facilitar el análisis de la aproximación de Lotfi se expresa la ecuación (iii) como:

$$\log Mr = \log Ka + Kb \log s_d$$

Por lo tanto resulta:

$$\text{Log } Mr = 1.4793 + 0.043 \text{ CBR} - 4.2143 / (\text{CBR}) - \{ (1.9557 / (\text{CBR})) + 0.1705 \} \log s_d$$

El término $\log Ka$ debería crecer con el aumento de CBR, pero aparece la expresión $(1/\text{CBR})$ que carece de significado físico. Lo mismo ocurre en Kb donde éste disminuye con el aumento del CBR.

En principio para suelos cohesivos cabe esperar que ambos parámetros aumenten con el valor soporte relativo.

Si se analiza para un mismo suelo cohesivo distintos estados de consistencia se observa que a medida que aumenta el contenido de humedad el valor del CBR disminuye y lo propio hacen los parámetros Ka y Kb cuando se lo obtiene en forma experimental a través del ensayo triaxial dinámico. Por lo tanto no resulta

representativo del comportamiento resiliente de estos suelos los términos en función de $(1/\text{CBR})$.

Del ajuste de constantes K_a y K_b para la aproximación de Lotfi modificada, ecuación (v), para los 7 suelos estudiados. Resulta que:

- El rango de valores del M_r usados en este estudio es del mismo orden que los empleados por Lotfi
- La correlación obtenida entre datos experimentales y la ecuación obtenida da un $r^2 = 77\%$
- Para su aplicación se debe respetar el rango de los valores experimentales (CBR entre 5-16)
 - Se obtienen valores inconsistentes fuera del rango de estudio, por ejemplo, M_r mayores para CBR igual a 2 que para 5

2.4. Análisis de modelos alternativos

Efectuando un estudio paralelo al de Lotfi, o sea, partiendo de la ecuación

$$M_r = G s_d^H$$

Se propone los siguientes modelos alternativos:

A1 - Los parámetros G y H son una función del valor del CBR, con lo cual se arriba a:

$$M_r = G s_d^H \quad (\text{vi})$$

$$G = 12.54 e^{(0.156 \text{ CBR})} \quad r^2 = 0.73$$

$$H = 0.2767 \text{ Log (CBR)} - 0.4423 \quad r^2 = 0.65$$

A2 - El parámetro G dependiente del CBR y el parámetro H función del CBR y el Límite Líquido.

$$M_r = G s_d^H \quad (\text{vii})$$

$$G = 12.54 e^{(0.156 \text{ CBR})} \quad r^2 = 0.73$$

$$H = -0.372 + 0.0119 \text{ CBR} + 0.002 \text{ LL}(\%) \quad r^2 = 0.88$$

A3 - El módulo resiliente como función potencial combinada del valor soporte relativo y el tensor desviador aplicado

$$Mr = 7.937 \sigma_d^{-0.103} CBR^{0.997} \quad (viii) \quad r^2 = 0.53$$

(Mr y σ_d en Mpa)

2.5. Comparación de modelos

Se establece una comparación para los distintos modelos considerados durante el estudio. Las Figuras 3 y 4 representan la variación del Mr en función del tensor desviador para valores del CBR igual a 14 y 5 respectivamente.

Se observa el modelo de Lotfi no sigue siempre los valores obtenidos a través del ensayo triaxial dinámico. Mientras que las ecuaciones (vi) ó (vii) ajustan mejor el comportamiento resiliente de los suelos ensayados.

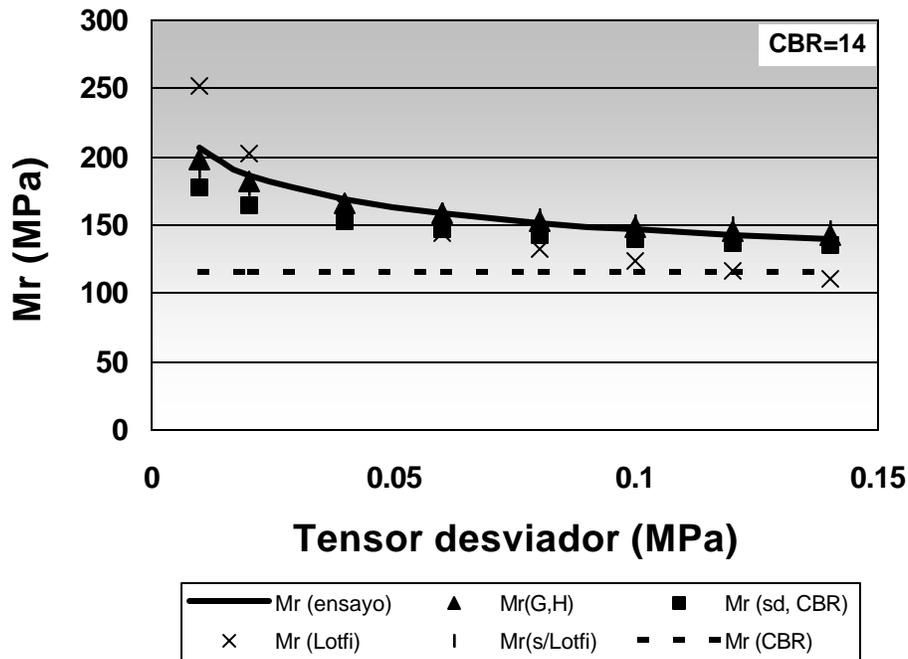


Figura 3: Comparación de modelos para un valor de CBR= 14

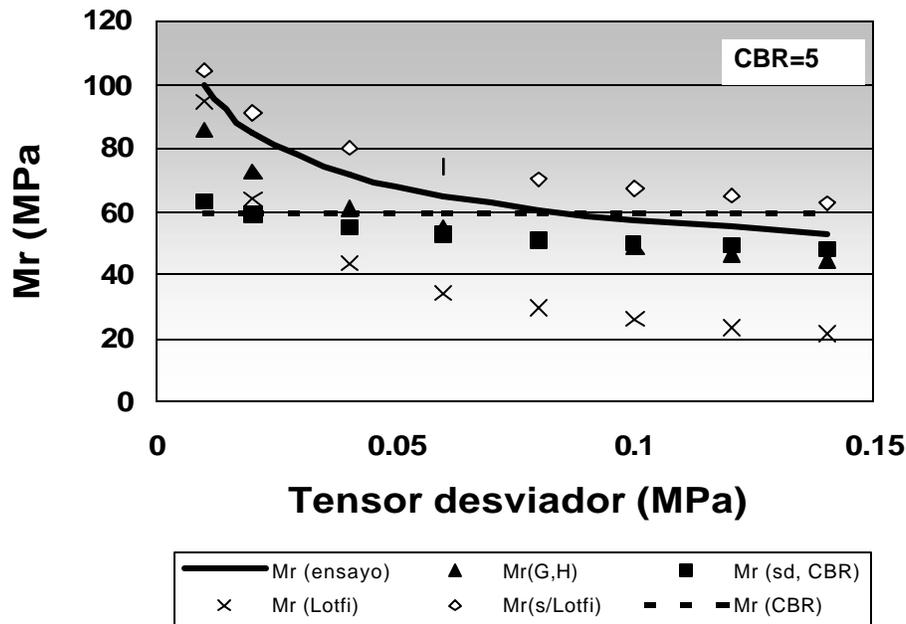


Figura 4: Comparación de modelos para un valor de CBR= 5

3. CONCLUSIONES

1. Como puntualiza el Witczak (Universidad de Maryland), el mayor significado de la aproximación de Lotfi radica en que ésta representa una “transición” entre los modelos empíricos basados en el CBR y los modelos basados en la respuesta no-lineal del Mr para los suelos de subrasante
2. Se debe respetar los rangos de estudios del CBR
3. Las mejores correlaciones se logran con el modelo que tiene en cuenta la variación de los parámetros G y H con el CBR y el LL.
4. Se muestra la no aplicabilidad de los modelos empíricos, ya que no representan el comportamiento no lineal de los suelos

4. BIBLIOGRAFIA

- (1) “Metodología racional de análisis aplicada a la evaluación de pavimentos flexibles y diseño de mejoras”, J. Tosticarelli, H. Poncino, S. Angelone, O. Giovanon, F. Martínez y M. Pagola. XXIX Reunión del Asfalto, Mar del Plata, Argentina, noviembre de 1996.

- (2) "Módulos resilientes de materiales no tratados. Su aplicación al diseño estructural de pavimentos en Argentina", S. Angelone, F. Martínez y J. Tosticarelli, IV Congreso Latino Ibero Americano del Asfalto, México, noviembre de 1987(Tomo I).
- (3) "Módulos resilientes de materiales granulares no tratados. Su aplicación al diseño estructural de pavimentos en Argentina (2da parte)." S. Angelone y F. Martínez. XXV Reunión Anual del Asfalto, Córdoba, Argentina, noviembre de 1988.
- (4) "Use of nonlinear subgrade Modulus in AASHTO design procedure" . M. Witczak, X. Qi and M. W. Mirza. Journal of Transportation Engineering. May/jun 1995. Vol. 121. N° 3. ASCE.
- (5) "Shell Pavement Design Manual", London, 1978 – 1985.
- (6) "Development of a rational probabilistic approach for flexible pavement analysis". M. Ayres Junior. Dissertation of Doctor of philosophy", 1997. University of Maryland.
- (7) "AASHTO Design Procedures for New Pavements" FHWA-1993.
- (8) "El Penetrómetro Dinámico de Cono. Su aplicación al control y diseño estructural de pavimentos". S.Angelone, J.Tosticarelli y F.Martínez. 6° Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Chile, 1991.
- (9) "Aplicación del Penetrómetro Dinámico de Cono en obras viales y controles de compactación. S.Angelone y F.Martínez. 3er Encuentro de Centros del Instituto Panamericano de Carreteras (IPC). San Pablo, Brasil, noviembre 1994.
- (10) "Illi-Pave based full-depth asphalt concrete pav. design procedure". M.R. Thompson. Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor, 1987, Michigan USA.
- (11) "Resilience Characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements" H. Seed, C Chan and C. Lee. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor, 1962, Michigan USA.
- (12) "Back-analyzed elastic stiffnesses: comparison between different evaluation procedures". W Tam and S. Brown. Nondestructive testing of pavements and backcalculation of moduli. ASTM , STP 1026. 1989. Pag.189-200.

- (13) "Prediction of pavement deflection from Laboratory tests", C. Monismith, H. Mitry and C. Chan. Second Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor, 1967, Michigan USA.
- (14) "FWD backcalculated moduli compared with pavement pressurement moduli and cyclic triaxial moduli". P. Cosentino and J.L. Briaud. Nondestructive testing of pavements and backcalculation of moduli. ASTM , STP 1026. 1989. Pags. 323-340.
- (15) "Proceedings of the Workshop on resilient modulus testing" Publication N° FHWA-TS-90-031 march 1990. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration.
- (16) "Characterization of granular material", J. Uzan , T. R. R. 537, 1985, pp 49-58.
- (17) "Resilient Modulus of granular materials under repeated loading" A. Nataatmadja. 7th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. ISAP. 1992.
- (18) "Design of asphalt pavement using lateritic soils in Brazil" , J. Medina and L. Motta. 6th Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor, 1987, Michigan USA.
- (19) "Validación in situ de modelos de comportamiento de diferentes materiales viales" F. Martínez, S. Angelone y O. Giovanon, presentado en la XXVI Reunión Anual del Asfalto en Buenos Aires, Argentina, diciembre de 1990.