

ANÁLISIS DE TIPOLOGIA DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESPUESTA MODULAR DINAMICA DE CAPAS VIALES DE SUELO – CEMENTO, ANTE DIVERSOS CONTENIDOS DE CEMENTO

Becario; Sr. Nicolás de Abajo Freire

LEMaC, Centro de investigaciones viales, Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

nicolasdeabajofreire@gmail.com

Director; Ing. Luciano Brizuela

LEMaC, Centro de investigaciones viales, Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

brizuelaluciano@yahoo.com.ar



Codirector; Mg. Ing. Julián Rivera

LEMaC, Centro de investigaciones viales, Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

jrivera@frlp.utn.edu.ar

Área: Gestión y Diseño Vial. **PID Asociado:** “Análisis para la calibración a las condiciones locales de modelos para el diseño de pavimentos basados en evaluaciones superficiales y estructurales”. Código: UTI3943TC.

Resumen

Es una necesidad local contar con ensayos representativos y consistentes para la evaluación de los materiales de la zona con la finalidad de diseñar paquetes estructurales para pavimentos flexibles mediante técnicas modernas, las que pretenden otorgarnos obras de mayor eficiencia y durabilidad. Actualmente tenemos algunas aproximaciones pero todavía no estamos en condiciones de asegurar resultados certeros que nos permitan llevar a cabo dicha tarea. En esta investigación se intentara correlacionar el ensayo de Módulo Dinámico y el ensayo de Módulo Resiliente para suelos ligados hidráulicamente con cemento, se apunta a definir qué tipología de ensayo es acorde a cada dosificación. Si bien hemos avanzado mucho todavía nos queda un camino por recorrer y los logros obtenidos hasta el momento nos indican que debemos continuar.

Palabras clave: Suelo – Cemento – Modulo – Resiliente – Dinámico

Keywords: Soil – Cement - Modulus – Resilient - Dynamic

1. Introducción

El presente trabajo de investigación surge de la necesidad de contar con metodologías de evaluación modular para materiales granulares locales ligados hidráulicamente con cemento para utilizarlos en capas estructurales de pavimentos flexibles.

Dada una tensión desviante, la presión de confinamiento y el contenido de humedad se supone que el suelo tiene un comportamiento lineal ante determinada cantidad de ciclos de cargas dinámicas. (Fig. 1)

Debido a este fenómeno cuantificable de manera repetitiva el número utilizado en los cálculos basados en métodos empírico-mecanicistas es el asociado a las deformaciones recuperables del material denominado módulo de resiliencia, calculado a partir de la relación entre la tensión desviante y la deformación recuperable.

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

con,

Mr : módulo resiliente

σ_d : tensión desviante

ϵ_r : deformación recuperable

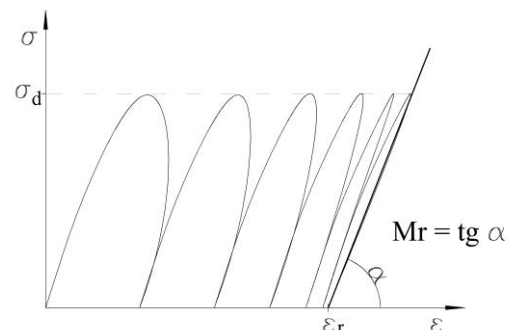


Figura 1. Grafico tensión – deformación de material granular. Los suelos utilizados en estructuras viales se pueden clasificar en ligados y no ligados. Según los antecedentes, estos últimos no poseen un único resultado para el módulo resiliente, el mismo es variable y depende de la tensión de

confinamiento, del tensor desviador y de la humedad, como se puede apreciar en la ecuación constitutiva de Uzan.

$$Mr = k_1 \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_a} \right)^{k_3} \quad (2)$$

donde,

Mr : Modulo Resiliente

σ_d : tensión desviante

θ : invariante de tensiones

p_a : presión atmosférica

k_1, k_2, k_3 : constantes del material

En los suelos ligados hidráulicamente, hasta el momento, se entiende que con elevado contenido de cemento (mayores al 6%) el valor del módulo se mantiene constante para las diferentes frecuencias y cargas de actuación. [1]

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron los procedimientos enunciados en normativas internacionales: “*Determinación del Módulo Resiliente de Suelos y Agregados*” (AASHTO, 2003) [2] y “*Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez*” (UNE-EN, 2012) [3].

En trabajos anteriores [4] realizados en el centro se evaluó la respuesta del material ante ensayos de “*Valor Soporte Relativo*” (DVN, 2010) [5] y “*Resistencia a Compresión Inconfinada*” (LEMaC, 2016) [6] para determinar cuál es el adecuado ante los diferentes contenidos de cemento con el mismo material utilizado en la investigación que nos ocupa, un suelo con clasificación HRB A-4- (0) proveniente de una cantera local.



Figura 3. Vista general de cantera origen de la muestra.



Figura 4. Frente de extracción de la muestra.



Figura 2. Ubicación de cantera origen de la muestra.

En esta investigación se pretende determinar el procedimiento de análisis para utilizar en suelos ligados hidráulicamente con cemento de acuerdo a las características del material y a la dosificación utilizada. A diferencia de lo realizado anteriormente, en los que se realizaron ensayos estructurales para diseño empírico de paquetes abocados al diseño empírico-mecanicista mediante ensayos acordes al mismo que nos entregan resultados de los módulos de rigidez de los materiales, los que forman parte de las variables del método.

Para suelos no ligados químicamente se utiliza el ensayo de *Módulo Resiliente* y para el suelo tratado con alto porcentaje de cemento el ensayo de *Módulo Dinámico*. La primera metodología consiste en aplicar cargas cíclicas axiales a una probeta cilíndrica confinada por medio de aire comprimido. La segunda aplica las cargas en dos generatrices opuestas del espécimen y sin confinamiento. Por lo expuesto, se estima que en lo referente a las tensiones principales el material se comporta de manera similar en todas las direcciones

El objetivo concreto es definir el límite entre ambos métodos en función del porcentaje de cemento utilizado, es decir, hasta donde consideramos el suelo como ligado o no ligado.

2. Metodología

2. 1. Materiales y moldeo de especímenes

El suelo en estudio sin tratamiento se caracteriza con una clasificación HRB (DVN, 2010) [7] y valores de Proctor (DVN, 2010) [8] indicados en la siguiente tabla:

CLASIFICACION	PROCTOR
A-4-(0)	$\sigma_{s. max.} = 1.442 \text{ g/cm}^3$
LL=34	
LP=0	$w_{op.} = 24.2 \%$
IP=0	

Figura 5. Clasificación, densidad seca máxima y humedad optima del suelo.

Para el suelo tratado hidráulicamente se utilizaron los resultados obtenidos en una investigación anterior [4] realizada con el mismo material donde para diferentes porcentajes de cemento se obtuvo la siguiente ecuación con la que se puede determinar la densidad seca máxima en función de la dosificación,

$$\gamma_{s.max.} = -0.0041a + 1.4615 \quad (3)$$

donde,

a : porcentual de cemento en peso,

y, una humedad optima del 26% independiente de las proporciones utilizadas.

El cemento utilizado para la confección de las probetas fue un CPC 40 (Cemento Portland Compuesto de 40 MPa).

Se utilizaron dos tipos de probetas, ambas moldeadas estáticamente a doble pistón con densidad prefijada (LEMaC, 2016) [6] utilizando los resultados del ensayo de compactación antes mencionado.

CEMENTO [%]	DENSIDAD SECA [g/cm ³]	HUMEDAD [%]
0	1.442	24.2
2	1.453	26.0
4	1.445	26.0
6	1.437	26.0
8	1.429	26.0
10	1.421	26.0

Figura 6. Densidades y humedad para cada dosificación.

Las probetas utilizadas para el ensayo de *Modulo Dinámico* son cilíndricas de 101.6 mm de diámetro y 60 mm de alto.



Figura 7. Probeta de Módulo Dinámico.



Figura 7. Probeta de Módulo Dinámico.

Las de *Módulo Resiliente* son de la misma forma pero de esbeltez 2, de 71 mm de diámetro y 147 mm de alto correspondientes a materiales cohesivos.

Todos los especímenes tratados se llevaron a cámara humedad por 28 días para independizarnos de la variable que representa la hidratación del cemento a edades tempranas.

2. 2. Experimental

Al comenzar a realizar los ensayos se tuvo que realizar una puesta a punto de los equipos y algunos accesorios. Se han realizado correcciones técnicas en el funcionamiento del software, calibración de la maquinaria, adquisición de nuevos elementos de medición como LVDT's y una celda de carga. Por otro lado, se desarrolló en el centro un procedimiento para fabricar las membranas de caucho necesarias para confinar las probetas en el ensayo de *Modulo Resiliente*, las que hasta el momento nos producían varios inconvenientes con pérdidas de confinamiento.

En principio, para la parte experimental propiamente dicha, se recorrió un camino de prueba y error para acercarnos a metodologías que nos otorguen resultados representativos del comportamiento del material.

Se ensayaron con el equipo de *Modulo Resiliente* los porcentajes más bajos (0 – 6 %) de cemento y con el de *Modulo Dinámico* los más altos (4 - 10 %).

Para el primer procedimiento se comenzó con la secuencia utilizada en suelos de subrasante y como era de esperar se obtuvo una alta variabilidad de resultados, ya que utiliza un tensor desviador y una presión de confinamiento de bajas magnitudes no acordes a las características del material que estamos utilizando.

Luego, se ejecutaron ensayos correspondientes a suelos de base/subbase y otros con parámetros fundados en correlaciones que puedan hacer comparativas las dos metodologías en estudio.

Con esta primera parte el camino fue un poco más corto, ya que el ensayo de *Módulo Resiliente* viene siendo base de diferentes investigaciones en suelos por lo que el conocimiento sobre el mismo es más profundo. Además, es un ensayo concebido específicamente para el material de interés aunque sin tratamientos estabilizantes.

Para el segundo procedimiento, el de *Módulo Dinámico*, nos enfrentamos a un panorama diferente. Si bien, conceptualmente estamos evaluando los mismos parámetros, el procedimiento difiere en algunas cuestiones.

Aquí, las variables que manejamos son la frecuencia de la carga, su magnitud y la temperatura. La última es utilizada para mezclas asfálticas por lo que no fue de nuestro interés ya que el comportamiento del suelo es independiente de la misma. Para cada dosificación se experimentó variando los parámetros que manejamos y se pudo observar que para cargas mayores a 400 kg es muy probable la rotura del espécimen. Lo mismo concluimos para ensayos sucedidos en cortos lapsos de tiempo con cargas superiores a 300 kg cuando el material se fatiga. También, se evidenció que a menor frecuencia mayor es el deterioro del espécimen.



Figura 7. Probeta de *Módulo Dinámico* llevada hasta rotura.



Figura 8. Probeta de *Módulo Dinámico* llevada hasta rotura.

2. 3. Cálculos

Para compatibilizar los parámetros entre los dos procedimientos es necesario realizar algunas conversiones. Las unidades de cada uno se expresan a continuación:

Módulo Resiliente

- s_d : Tensión Desviante, [psi].
- s_3 : Presión de Confinamiento, [psi].

Módulo Dinámico

- f : Frecuencia, [Hz].
- P : Carga, [kg].

La frecuencia en el ensayo de *Módulo Resiliente* es invariable e igual a 1Hz por lo que se adoptó la misma para el de *Módulo Dinámico*.

Contrariamente, en este último no poseemos confinamiento, por lo que se propone utilizar en el primero una presión nula, es decir que el espécimen se encuentre sometido únicamente a la producida por la atmosfera. La solución más cercana fue utilizar 1 psi, el confinamiento más bajo que permite el equipo de ensayo.

Para la magnitud de la carga en *Módulo Dinámico* se toma como base la secuencia personalizada del ensayo de *Módulo Resiliente* indicada a continuación,

Serie N°	s_3 [psi]	s_d [psi]	Ciclos
1	1	10	100
2	1	10	100
3	1	10	100
4	1	20	100
5	1	20	100
6	1	20	100
7	1	30	100
8	1	30	100
9	1	30	100

Figura 9. Secuencia personalizada de ensayo de *Módulo Resiliente*.

A partir de las tensiones indicadas se calcula la carga que se debe aplicar en las probetas de *Módulo Dinámico*.

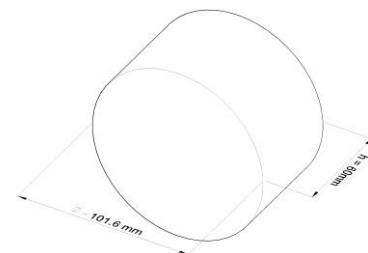


Figura 10. Dimensiones de espécimen para ensayo de *Módulo Dinámico*.

El área considerada para el cálculo del módulo es la correspondiente a la superficie cilíndrica,

$$A = \pi \varnothing h = \pi \times 2.36 \times 4 \text{ in}^2 = 29.68 \text{ in}^2 \quad (3)$$

donde,

A: sección de la probeta
 \varnothing : diámetro de la probeta
h: espesor de la probeta

$$1 \text{ psi} = 1 \frac{\text{lb}f}{\text{in}^2} \frac{0.45 \text{ kg}f}{\text{lb}f} = 0.45 \frac{\text{kg}f}{\text{in}^2} \quad (4)$$

$$P = \sigma_d A = \sigma_d \times 29.68 \text{ in}^2 \times 0.45 \frac{\text{kg}f}{\text{in}^2} \quad (5)$$

con,

σ_d : tensión desviante en psi

P: carga en kgf

A: sección de la probeta

σ_d [psi]	P [kg]
10	67
20	134
30	200

Figura 11. Correlaciones entre Tensión Desviante utilizada para Módulo Resiliente y Carga utilizada en Módulo Dinámico.

3. Resultados (o Resultados y Discusión)

La fórmula utilizada para el cálculo del Módulo Dinámico fue la que se encuentra en la norma UNE-EN 12697-26:2012 [3] para ensayo por compresión diametral.

		% DE CEMENTO			
		4	6	8	10
CARGA [KG]	100	2092	4600	8050	7937
	200	1691	4497		
	250			7573	8047
	300		4208		
	400		3296	7754	7902
	450		2491		

Figura 12. Resultados obtenidos para el ensayo de Módulo Dinámico.

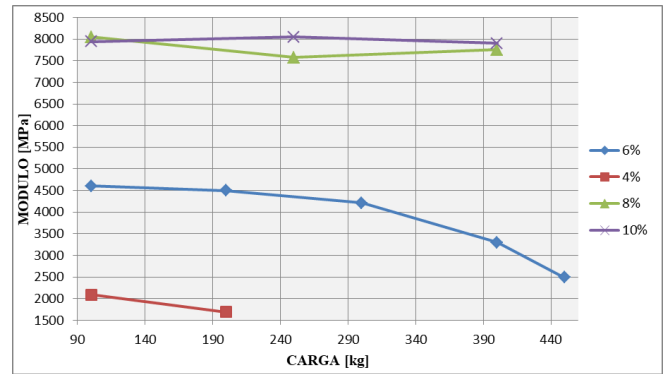


Figura 13. Gráfico Carga-Módulo en base a los resultados de la Fig. 12 para diferentes contenidos de cemento.

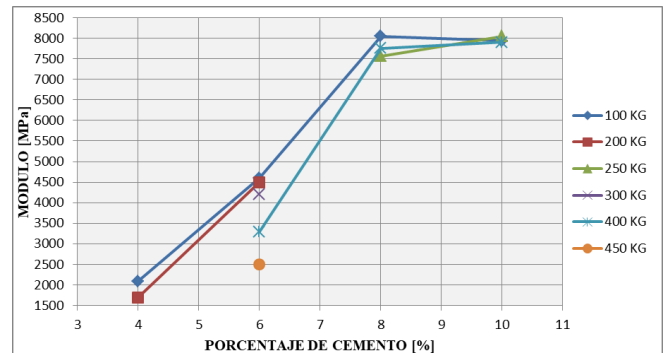


Figura 14. Gráfico Porcentaje de cemento-Módulo en base a los resultados de la Fig. 12 para diferentes magnitudes de sollicitación.

% CEMENTO	MR [Mpa]	σ_3 [psi]	σ_d [psi]
2	60	1	10
	55	1	20
	62	1	30
4	137	1	10
	142	1	20
	164	1	30
6	118	3	10
	133	5	15
	150	10	20
	174	15	30
	177	20	35

Figura 15. Resultados obtenidos para el ensayo de Módulo Resiliente con la secuencia personalizada.

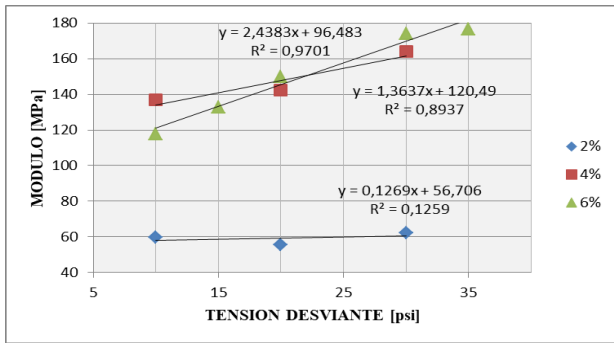


Figura 16. Gráfico *Tensión Desviante-Módulo* en base a los resultados de la Fig. 15 para diferentes contenidos de cemento y curvas de ajuste con sus coeficientes de determinación.

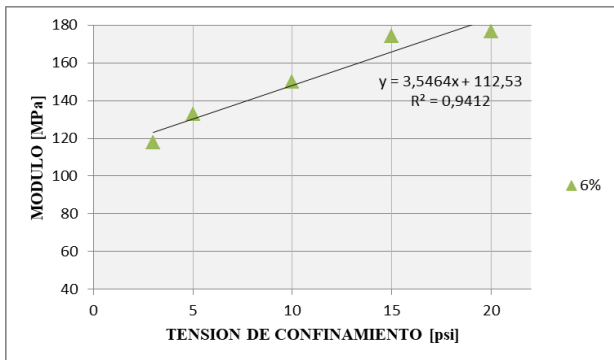


Figura 17. Gráfico *Tensión de Confinamiento-Módulo* en base a los resultados de la Fig. 15 para diferentes contenidos de cemento y curva de ajuste con su coeficiente de determinación.

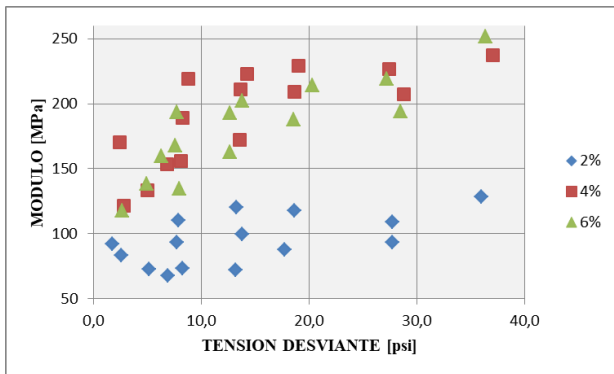


Figura 19. Gráfico *Tensión Desviante-Módulo* en base a los resultados de la Fig. 18 para diferentes contenidos de cemento.

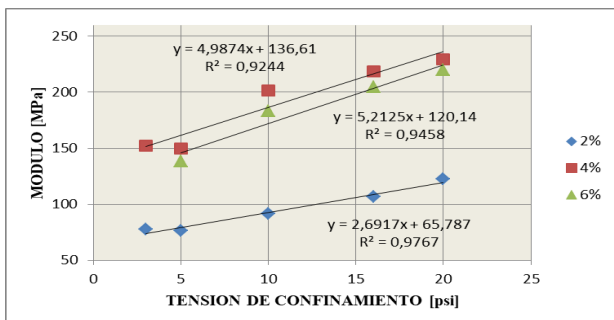


Figura 17. Gráfico *Tensión de Confinamiento-Módulo* en base a los resultados de la Fig. 18 para diferentes contenidos de cemento y curvas de ajuste con sus coeficientes de determinación.

% CEMENTO	MR [Mpa]	s ₃ [psi]	s _d [psi]
2	92	3	1,8
	73	3	5,1
	68	3	6,9
	84	5	2,6
	73	5	8,3
	72	5	13,2
	93	10	7,8
	88	10	17,8
	94	10	27,7
	110	15	7,9
	100	15	13,8
	109	15	27,7
4	120	20	13,3
	118	20	18,6
	129	20	36,0
	170	3	2,4
	133	3	5,0
	154	3	6,8
	121	5	2,8
	156	5	8,1
	172	5	13,5
	189	10	8,3
	209	10	18,6
	207	10	28,8
6	219	15	8,8
	211	15	13,7
	226	15	27,4
	223	20	14,2
	229	20	19,0
	237	20	37,1
	318	3	1,7
	139	3	4,9
	160	3	6,3
	118	5	2,7
	135	5	8,0
	163	5	12,7
168	10	7,6	
188	10	18,6	
194	10	28,5	
193	15	7,7	
202	15	13,8	
219	15	27,2	
193	20	12,7	
214	20	20,3	
252	20	36,3	

Figura 18. Resultados obtenidos para el ensayo de *Módulo Resiliente* con la secuencia de base/subbase.

4. Conclusiones

Se pueden observar las siguientes situaciones fijando la tensión de confinamiento igualándola a la atmosférica para que ambas metodologías de ensayo sean comparativas:

- En el ensayo de *Módulo Dinámico*, a partir de 8% de cemento el modulo tiende a mantenerse constante independientemente de la variación de la carga y de la dosificación. Para porcentajes más bajos se registra que el modulo disminuye al aumentar la carga y que la relación entre el E -% es linealmente proporcional.
- En el ensayo de *Módulo Resiliente*, a mayor porcentaje de cemento y mayor tensión desviante, mayor valor de módulo. Se lograron curvas de ajuste lineal con muy buena aproximación en las dosificaciones de 4-6%. En cambio, con 2% de cemento el coeficiente R^2 logrado no fue satisfactorio.
Por otro lado, variando las condiciones de ensayo fijadas al principio de esta sección, encontramos una relación lineal entre módulo y presión de confinamiento, con valores de modulo que crecen junto con el porcentaje de cemento.

A pesar de lo enunciado, hasta el momento no se puede concluir concretamente sobre que metodología es la apropiada para cada tipo de material. La información adquirida nos hace creer que debemos aumentar el universo de ensayos y reacomodar algunos procedimientos para continuar con la investigación.

Agradecimientos

Se agradece a los integrantes del LEMaC por brindarnos el espacio para la investigación y particularmente al Ing. Enrique Giaccio por su colaboración para el desarrollo y fabricación de las membranas necesarias para el ensayo de *Módulo Resiliente*.

Referencias

- [1] Ing. Hugo E. Poncino, Gabriela Coirini, Rossana Cassan. **Caracterización de materiales tratados con ligantes hidráulicos para su aplicación al dimensionamiento de pavimentos flexibles.**
- [2] AASHTO: T 307-99. **Método de ensayo para la Determinación del Módulo Resiliente en Suelos y Agregados**, (2003).
- [3] UNE-EN 12697-26. *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 26: Rigidez. Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas*, (2006).
- [4] Anael Porro, Gladys Sosa, Martin Villanueva. **Metodologías apropiadas de análisis para estabilizaciones de suelo, cemento y estabilizante químico en forma combinada**, (2016).
- [5] DVN-E6-84. **Determinación del valor soporte e hinchamiento en suelos**, (2010)
- [6] LEMaC, Centro de Investigaciones Viales. *Guía de Metodologías y Procedimientos para Uso Vial desarrolladas en el LEMaC. Resistencia inconfiada de capas de suelo cemento que emplean suelos finos*, 2016.
- [7] DVN-E4-84. **Clasificación de suelos**, (2010).
- [8] DVN-E5-93. **Compactación de suelos**, (2010).