

Evaluación Dinámica de los Suelos Calcáreos de la Provincia de Entre Ríos

Ing. Mariano Cabrera
Facultad Regional Paraná – Universidad Tecnológica Nacional
Almafuerte 1033 - (3100) – Paraná - Argentina
Teléfono 0343-4232190
Correo electrónico: mariano.jesus.alexis.cabrera@gmail.com

Ing. Nicolás Meichtry
Facultad Regional Paraná – Universidad Tecnológica Nacional
Almafuerte 1033 - (3100) – Paraná - Argentina
Teléfono 0343-4232190
Correo electrónico: nicomeichtry@gmail.com

Ing. Edgardo Rivas
Facultad Regional Paraná – Universidad Tecnológica Nacional
Almafuerte 1033 - (3100) – Paraná - Argentina
Teléfono 0343-4232190
Correo electrónico: riedex@gmail.com

MSc. Ing. Gustavo Bolla
Facultad Regional Paraná – Universidad Tecnológica Nacional
Almafuerte 1033 - (3100) – Paraná - Argentina
Teléfono 0343-4232190
Correo electrónico: bollagustavo@arnet.com.ar

MSc. Ing. Marina Cauhapé Casaux
Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras I.M.A.E
Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad de Rosario
Riobamba y Berutti - (2000) – Rosario – Argentina
Teléfono 0341-4808538 Interno 136 - Fax: 0341-04808540
Correo Electrónico: mccasaux@fceia.unr.edu.ar

Dr. Ing. Fernando Martínez
Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras I.M.A.E
Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad de Rosario
Riobamba y Berutti - (2000) – Rosario – Argentina
Teléfono 0341-4808538 Interno 136 - Fax: 0341-04808540
Correo Electrónico: fermar@fceia.unr.edu.ar

Dr. Ing. Silvia Angelone
Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras I.M.A.E
Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad de Rosario
Riobamba y Berutti - (2000) – Rosario – Argentina
Teléfono 0341-4808538 Interno 136 - Fax: 0341-04808540
Correo Electrónico: sangelon@fceia.unr.edu.ar

Resumen

Los métodos de diseño empírico mecanicistas actuales necesitan como información la caracterización dinámica de los materiales que forman parte de la estructura de un camino. En la provincia de Entre Ríos es muy frecuente el uso, en sub-bases y bases granulares, de suelos calcáreos localmente denominados "Broza". Este material posee propiedades particulares que son necesarias estudiar.

El presente proyecto se enmarca dentro de un Convenio de Investigación y Colaboración entre la Facultad Regional Paraná de la UTN y la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la UNR. En el mismo se plantea el estudio de dos materiales calcáreos de diferentes zonas de la provincia, uno correspondiente a una cantera adyacente a la costa del Río Paraná, y otra cercana al Río Uruguay. Se analizan sus propiedades físicas, la degradación de la granulometría debido al esfuerzo de compactación aplicado y su caracterización mecánica mediante los ensayos de Valor Soporte Relativo y Módulo Resiliente con carga dinámica. Se muestra un análisis de los resultados y se efectúan consideraciones y recomendaciones para la continuidad de la investigación.

Introducción

Los actuales métodos de diseño de pavimentos de base analítica, los empírico-mecanicistas (Guía de Diseño de Pavimentos - Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG, 2002, [1]), o los programas de cálculo basados en elementos finitos, requieren para su aplicación que se introduzcan como datos básicos de entrada las características y propiedades mecánicas de cada uno de los materiales que componen la estructura del pavimento. 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 de manera confiable y representativa.

Dentro de los más importantes, se encuadran la determinación de las características tenso-deformación y los criterios de falla de los distintos materiales componentes de la estructura. El módulo resiliente se incluye dentro de estas características y cumple un papel fundamental en el cálculo de paquetes estructurales.

En este trabajo se realiza un estudio de la degradación debida al proceso de compactación de dos materiales calcáreos de la provincia de Entre Ríos y se evalúa su comportamiento resiliente bajo carga dinámica.

Caracterización geológica de la broza

En la provincia de Entre Ríos es muy común la utilización de la "broza" para la construcción de sub bases y bases granulares, de suelos calcáreos. Este material calcáreo es muy heterogéneo, no siempre cumple con las especificaciones y posee propiedades particulares que son necesarias estudiar para ajustar su caracterización.

Existen en la provincia tres tipos de materiales calcáreos:

- Los calcáreos organógenos: Originados a partir de la acumulación de restos de material calcáreo proveniente de la actividad de organismos con conchillas.
- Los calcáreos químicos: Formados por precipitación del carbonato de calcio sin influencia clara de la actividad de organismos o como resultado de la actividad de los mismos.
- Los calcáreos clásticos: Formados por calcáreos de los grupos anteriores, retransportados y a veces modificados por diagénesis. [2]

Los calcáreos químicos están ampliamente distribuidos en la provincia, conocidos bajo la denominación de tosca, tosquilla o broza y se presentan en forma de calcretes.

Según Watts [3], los calcretes son el resultado de la introducción predominantemente de carbonatos de calcio por procesos de reemplazo en cantidades más o menos grandes de suelos, roca o sedimentos de un perfil de meteorización.

Los calcretes que se observan a lo largo de la barranca del río Paraná, se deben no solamente a soluciones carbonatadas descendentes sino también ascendentes, pues aparecen a distancias considerables del nivel del río, superando la capa freática por efecto de la capilaridad.

Otra manifestación del calcrete incipiente se da en la zona adyacente al río Uruguay, encontrándose infiltraciones e incrustaciones calcáreas en areniscas entre Concordia y Concepción del Uruguay.

Se emplearon materiales provenientes de una Cantera ubicada en las cercanías de la ciudad de Paraná (Zona Paraná) situada al oeste de la provincia sobre el Río Paraná y otra cantera aledaña a la ciudad de Concepción de Uruguay (Zona Concepción) ubicada al este sobre el Río Uruguay. En la Figura 1 se detalla la ubicación en la Provincia de Entre Ríos de las canteras donde se obtuvieron los suelos para ser estudiados.



Figura 1. Detalle de la ubicación las canteras estudiadas. [4].

Además, a partir de investigaciones realizadas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) puede agregarse la siguiente información respecto a la edafología de la zona de ambas canteras. [5]

Geología Zona Paraná

En algunas lomas y pendientes el proceso erosivo natural ha dejado expuesto el material calcáreo consolidado (tosca) el cual, afectado por el agua de escorrentía, es transportado pendiente abajo (rodados calcáreos de arrastre). Este banco calcáreo aparece en el perfil a profundidades variables y, en muchos casos, aflora en superficie; la génesis de este material

geológico (edad pliocena-pleistocena) parece estar asociada a la formación (elevación) de la peniplanicie entrerriana, manteniendo un nivel uniforme sobre el nivel del mar (aprox. 37 a 43 metros). Este estrato es de una textura muy variable entre franco-arenosa a arcillosa, fosilífero en su parte inferior -marina- y con aspecto loessiforme en sus formaciones superiores. Este material ha sido interpretado por algunos autores como un antiguo horizonte petrocálcico que pertenecería a un antiguo perfil, truncado, sobre el cual el manto de loess se habría depositado.

El suelo orgánico tiene una profundidad efectiva de aproximadamente 70-80 cm hasta alcanzar el material calcáreo consolidado, aunque en algunos perfiles éste puede aparecer a los 30 cm. Superando los 70 cm se encuentra un banco de tosca, semi-consolidado, gris pardo claro en húmedo, de matriz franco-limosa y abundante cantidad de dendritas de manganeso.

Pertenece a la familia "fina, mixta, térmica" de los Argiudolesrendólicos. Son suelos poco profundos, moderadamente bien drenados, con un epipedón oscuro, franco-limoso, y un horizonte argílico somero y levemente desarrollado, franco-limoso a arcillo-limoso, de color pardo grisáceo oscuro.

Presenta concreciones de carbonatos y calcáreo libre en la masa prácticamente en todo el perfil. Son suelos desarrollados en materiales loessoides muy heterogéneos en corta distancia, que se han depositado sobre materiales calcáreos consolidados muy antiguos (bancos de tosca de edad pliocena/pleistocena).

El color de este suelo es blanco, como es de preverse en los materiales calcáreos, debido a la presencia de calizas (Figura 2).

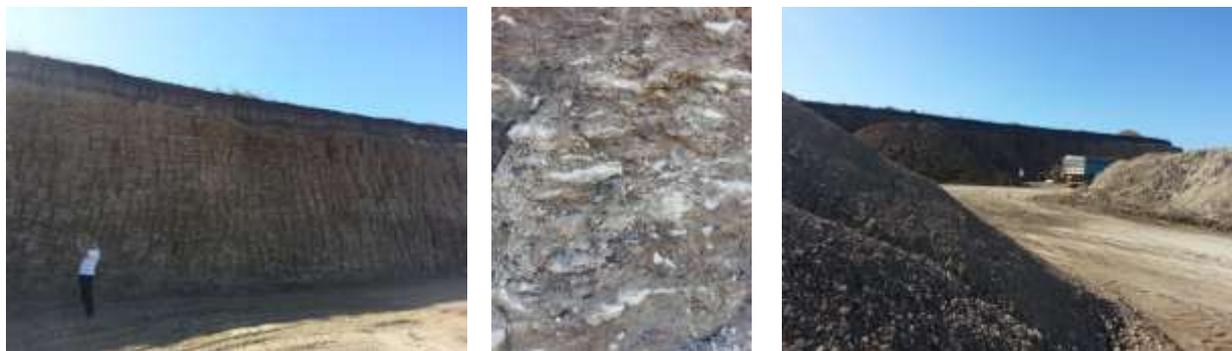


Figura 2. Detalle cantera Zona Paraná

Geología Zona Concepción

Son suelos oscuros, con un manto orgánico de 35 a 45 cm de espesor, de textura franca, seguido por sedimentos franco-arcillosos de origen fluvial y de colores pardos, que pueden tener hasta un 10 % de inclusiones de materiales amarillentos con abundantes concreciones de hierro-manganeso y con cantos rodados finos.

Consisten en una mezcla de materiales arcillo-arenosos con materiales arenosos. Los materiales areno-arcillosos tienen 40-60% de arena fina y media y 35-43% de arcilla. Muchas veces también tienen gravas y en algunos casos, éstas últimas constituyen la mayor parte del horizonte (variante pedregoso). Presenta un color bermellón, en sus diferentes tonalidades, como consecuencia de la meteorización de basaltos en zonas cercanas, el cual es rico en silicatos de magnesio y hierro. Además, este suelo posee una cantidad importante

de arcilla en las partículas finas, lo que le otorga plasticidad, la cual es poco característica en los suelos calcáreos. En síntesis, tiene influencia de basaltos, arcillas y calizas (Figura 3).



Figura 3. Detalle cantera Zona Concepción

Análisis de la degradación de la broza debido al proceso de compactación

A continuación se presenta un estudio de estos dos materiales, donde se evalúa su degradación debido a distintas metodologías de compactación empleadas en ensayos de caracterización de materiales no ligados. Se analiza la granulometría de la muestra original, la compactación en camino y posterior a cada uno de ellos.

La caracterización física y mecánica de estos suelos calcáreos es dificultosa, debido a que los esfuerzos de compactación durante la construcción de las capas y después por la acción del tránsito durante su período de servicio, pueden alterar su estructura mediante efectos de degradación granulométrica. Esto puede modificar su comportamiento mecánico original con respecto a los parámetros de diseño adoptados en el cálculo del paquete estructural.

Para evaluar la degradación de la broza se analizaron las granulometrías de los materiales provenientes del acopio de cantera, compactados in situ, en probetas ejecutadas para el ensayo Próctor, y para el ensayo de módulo resiliente. A continuación se presenta el análisis para cada una de ellas.

Caracterización del material natural sin compactar

En la Figura 4 se muestran los materiales de estudio y en la



Figura 4. Suelos canteras Zona Concepción (izq) y Zona Paraná (der)
Tabla 1 se indican las clasificaciones de los suelos calcáreos en su estado natural (acopio cantera) junto con la densidad seca máxima y humedad óptima del ensayo Próctor de referencia y los valores soporte e hinchamiento de ambas muestras.



Figura 4. Suelos canteras Zona Concepción (izq) y Zona Paraná (der)

Tabla 1: Caracterización del material natural (acopio cantera)

Cantera	Clasificación AASHTO (HRB)	Límites de Atterberg			Ensayo de Compactación Próctor T180		Valor Soporte Relativo	
		LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	W_{opt} (%)	VSR (%) (56 golpes)	Hinch. (%)
Zona Paraná	A – 1 – b (0)	No Plástico			1.500	24.60	76.14	0.30
Zona Concepción	A – 2 – 4 (0)	30.97	21.57	9.40	1.840	12.50	22.90	1.23

Caracterización del material después de la compactación

Luego de haber caracterizado el material en estado natural (acopio), se tomó el material resultante de cada uno de los ensayos y se trabajó sobre los mismos para verificar cambios en su composición granulométrica por vía húmeda.

Se destaca que la compactación de las probetas confeccionadas para el ensayo de Módulo Resiliente (que se presenta más adelante en el trabajo), se realizó mediante un compactador vibratorio a densidad prefijada. Además, es importante destacar que el material del ensayo de compactación (Próctor) presenta compensación del material retenido en el tamiz Iram de 19 mm de acuerdo a la norma VN E 5-93 Compactación de suelos (molienda del retenido del tamiz Iram de 19 mm y retenido del tamiz Iram N°4), mientras que para las probetas del Módulo resiliente sólo se emplea el material pasante por el tamiz Iram de 19 mm con compensación para Zona Paraná y sin compensación para Zona Concepción.

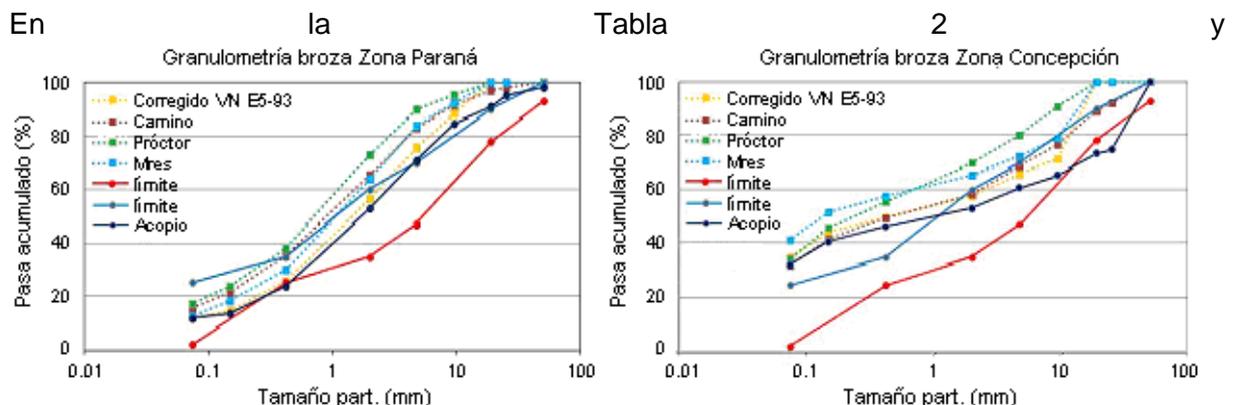


Figura 5 se presentan las granulometrías del material en estado natural (acopio), del camino (compactación in situ) y las resultantes de los procesos de compactación Próctor y módulo

resiliente. Se presentan además los usos granulométricos exigidos a estos materiales calcáreos en las especificaciones establecidas por la DPV de la provincia de Entre Ríos.

Se observa que la broza proveniente de Zona Concepción es mucho más fina que la de la cantera Zona Paraná, y además, contiene una fracción de suelo fino- cohesivo que le atribuye plasticidad al agregado.

Tabla 2: Granulometría de los suelos antes y luego de la degradación del material.

Tam.	Cantera Zona Paraná					Cantera Zona Concepción				
	% pasante					% pasante				
	Acopio	Camino	Corregido VN E5-93	Próctor	Mres	Acopio	Camino	Corregido VN E5-93	Próctor	Mres
2"	98.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1"	95.2	98.0	100.0	100.0	100.0	74.4	92.3	100.0	100.0	100.0
3/4 "	91.0	96.7	100.0	100.0	100.0	73.1	88.9	100.0	100.0	100.0
3/8 "	84.6	91.3	88.3	95.4	92.3	65.4	76.2	71.0	90.7	78.7
4	71.0	83.4	75.9	89.8	83.9	60.8	68.7	65.9	80.0	72.1
10	52.7	65.3	56.3	73.0	63.7	53.3	58.3	57.7	69.7	65.3
40	23.8	35.3	25.4	38.2	30.0	46.2	49.5	50.1	55.7	57.6
100	13.4	21.4	14.3	23.5	18.2	40.5	41.7	43.9	45.8	51.6
200	11.7	15.6	11.9	16.9	12.5	29.0	32.2	31.4	34.2	41.3

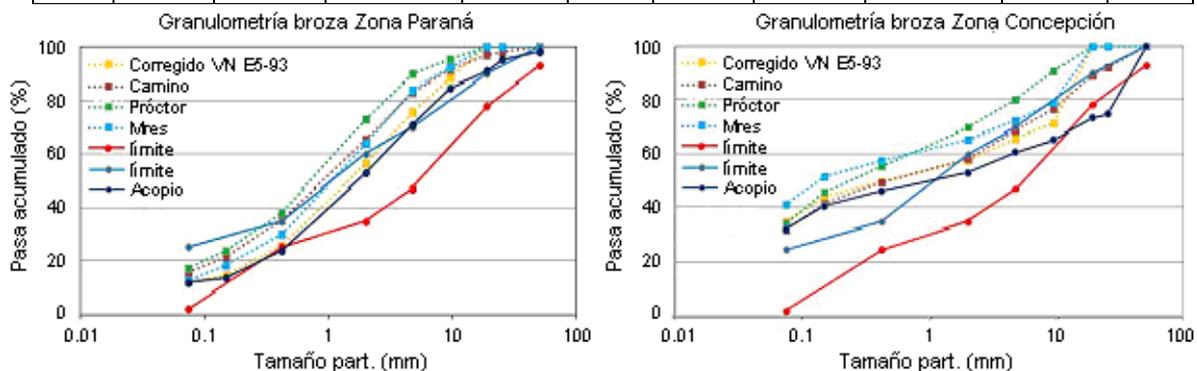


Figura 5. Proceso de degradación granulométrica por efecto de la compactación.

A partir de los valores de las nuevas granulometrías se establecieron las nuevas clasificaciones. En la Tabla 3 se indican las clasificaciones de los suelos calcáreos degradados por la compactación en el camino y luego de la confección de las probetas para los ensayos Próctor y Módulo Resiliente.

Tabla 3: clasificación de los suelos luego de la degradación del material.

Material	Clasificación			
	Acopio en cantera	Post compactación Camino	Post Compactación Ensayo Próctor	Post compactación Ensayo de Módulo Resiliente
Zona Paraná	A – 1 – b (0)	A – 1 – b (0)	A – 1 – b (0)	A – 1 – b (0)
Zona Concepción	A – 2 – 4 (0)	A – 2 – 4 (0)	A – 2 – 4 (0)	A – 4 (0)

Se observa que ambos materiales sufren una degradación granulométrica para todos los procesos de compactación.

La compactación para el ensayo Próctor es la que produce la mayor degradación, siguiendo la del camino, y por último la compactación vibratoria, salvo en el caso en que no se hizo la compensación por lo retenido en el tamiz Iram de 19 mm.

También se observa que los materiales en estudio no se inscriben totalmente dentro de los usos granulométricos especificados.

Para el caso de Zona Paraná el material no cambia su clasificación pero aumenta notablemente el porcentaje de material fino. No ocurre lo mismo para el caso de Zona Concepción, en este caso, donde luego de la compactación para el ensayo de MR, el valor del pasa Tamiz Iram N°200 supera el 35% y material pasa a considerarse como suelo fino.

De acuerdo a los ensayos efectuados se establece que el material “broza” se degrada fácilmente durante los procesos de compactación aumentando el porcentaje de finos, siendo para ambas Canteras la granulometría del camino similar a la compactación vibratoria.

Caracterización Dinámica: Evaluación del Módulo Resiliente.

Para la determinación de los parámetros necesarios para obtener la ecuación constitutiva del módulo resiliente, se lleva a cabo el ensayo triaxial con carga dinámica de acuerdo a la Norma AASHTO T 307-99: MÉTODO STANDARD DE ENSAYO DEL MODULO RESILIENTE [6]. El mismo consiste en someter a una probeta cilíndrica de suelo a diferentes estados de carga (distintas presiones de confinamiento y distintos tensores desviadores) de acuerdo a un protocolo establecido, que difiere según el tipo de suelo que sea, como se muestra en la Figura 4.

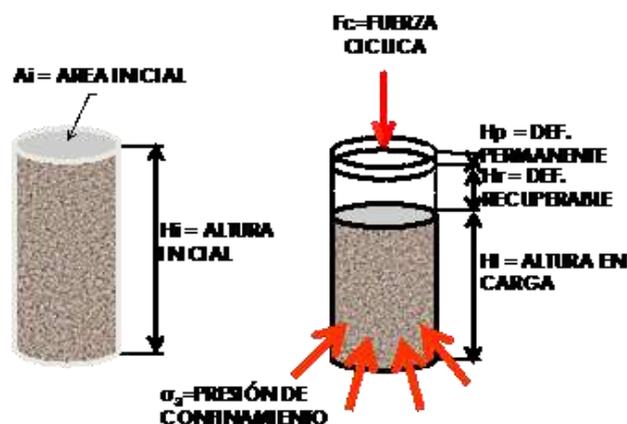


Figura 4: Ensayo de Módulo Resiliente [7]

La norma define dos tipos de materiales:

- *Tipo 1*: menos del 70 % debe pasar por el tamiz N° 10 (2 mm), menos del 20 % por el N° 200 (0.075 mm) y un índice de plasticidad menor o igual a 10.

- *Tipo 2*: no cumple con alguno de los criterios anteriores.

En base a esto se clasifica al material de Zona Paraná como Tipo 1 y Zona Concepción como Tipo 2.

Durante el ensayo se mide, para cada ciclo de carga, el nivel de sollicitación aplicado y la deformación resultante, en forma automática a través de un equipo de adquisición de datos [7]. En la Figura 5, Figura 6 y Figura 7, se observa la preparación de las probetas para el ensayo y el equipo utilizado en el Laboratorio Vial del IMAE-FCEIA-UNR.



Figura 5: Compactación vibratoria



Figura 6: Probeta compactada y encabezada



Figura 7. Probeta preparada para el ensayo

Se evaluaron diferentes modelos de ecuaciones constitutivas de Módulo Resiliente, ecuaciones 1 y 2. [7, 8, 9]:

$$\frac{M_r}{P_a} = A \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^B \cdot \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^C \quad \text{Ec. 1}$$

$$\frac{M_r}{P_a} = A \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^B \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^C \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

M_r , es el módulo resiliente en MPa

P_a , la presión atmosférica en MPa

σ_3 , es la presión de confinamiento de la cámara triaxial, en MPa.

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d$$

σ_d , es el tensor desviador aplicado, definido como la Fuerza cíclica dividido por el área de la probeta, en MPa.

θ , es el primer invariante de tensiones, $\sigma_d + 3\sigma_3$

A, B y C son coeficientes de ajuste de la regresión

En la

Tabla 4 se informan los parámetros de las ecuaciones constitutivas (Ec.1 y 2) obtenidos a partir de los resultados de ensayos triaxiales dinámicos, y en Figuras 10 y 11 se muestra la variación del Módulo resiliente en función del primer invariante de tensiones.

Tabla 4: Parámetros de Ecuaciones Constitutivas.

Cantera	Probeta	ω (%)	ρ seca máx (gr/cm ³)	Grado de compactación (%)	Ec	A	B	C	r^2
Zona Paraná	P1	24.20	1.430	95.3	1	881	-0.50	0.56	0.87
					2	1551	-0.05	0.46	0.94
Zona	P3	12.94	1.808	98.3	1	6055	-2.84	0.27	0.94

Concepción					2	2869	-0.30	0.17	0.96
------------	--	--	--	--	---	------	-------	------	------

En la Figura 10 se aprecia el comportamiento de la broza, proveniente de Zona Paraná, como un material netamente granular, mientras que el proveniente de Zona Concepción, (Figura 11), presenta el comportamiento resiliente de un suelo con fricción y cohesión, es decir intermedio.

Se debe hacer notar que los valores de Mr de la broza de Zona Concepción son muy elevados para este tipo de material y esto ocurre debido a que el contenido de humedad de las probetas es muy bajo. Es de esperar que para contenidos de humedades superiores el Mr descienda significativamente tendiendo a un comportamiento netamente cohesivo.

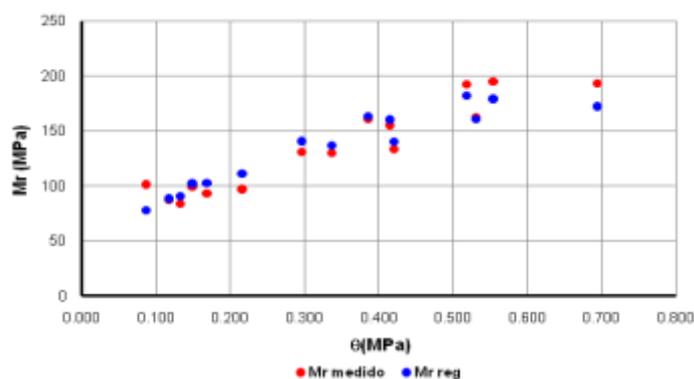


Figura 8: Variación de Mr, Zona Paraná, en función del 1er Invariante de tensiones

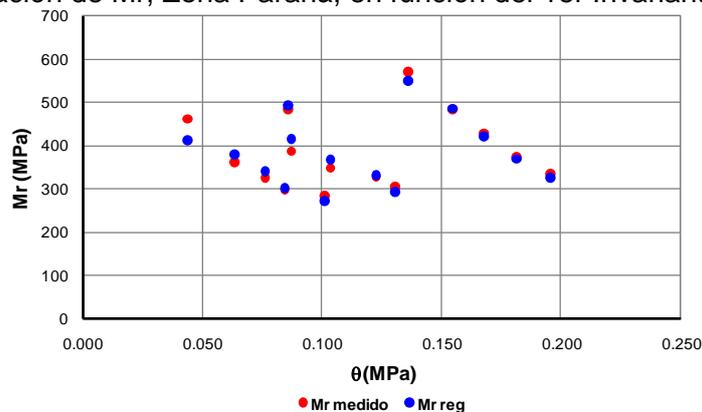


Figura 9: Variación de Mr, Zona Concepción, en función del 1er Invariante de tensiones.

En la Tabla 5 se comparan los valores de Mr obtenidos en el ensayo triaxial dinámico con los que calculados a través de la correlación entre Mr y el Valor soporte Relativo (VSR), Ec. 3. Se observa que los Mr estimados difieren de los medidos, sobreestimando valores para la Zona Paraná y subestimándolos para la Zona Concepción. No obstante para el tipo de suelo de esta última zona es esperable, ya que se trata de un suelo cohesivo que ha estado sometido a un proceso de inmersión e hinchamiento.

$$Mr = 18 \cdot VSR^{0.64}$$

Ec. 3

Tabla 5: Mr estimado a partir del ensayo de VSR

Cantera	VSR Embebido -56 golpes- (%)	Hinchamiento (%)	Mr (MPa)
Zona Paraná	76.1	0.29	287

Zona Concepción	22.9	1.11	134
-----------------	------	------	-----

Conclusiones

- ✓ El presente trabajo contempla una iniciativa a los métodos de caracterización dinámica de los materiales de uso vial de la provincia de Entre Ríos para que se dispongan de parámetros de ingreso a los métodos de diseño de pavimentos mecanicistas.
- ✓ Se observa que las propiedades de los materiales de las canteras en estudio, de Zona Paraná y de Zona Concepción son diferentes. A pesar de que ambos están constituidos por material calcáreo “broza”, difieren en función de su origen edafológico, con una marcada presencia de arcillas en la composición de la cantera de la Zona Concepción, por lo tanto no se pueden generalizar los resultados obtenidos como representativos de la broza como un único material.
- ✓ Las muestras extraídas “in situ” muestran un efecto de degradación de post compactación, incluso los indicadores y/o parámetros de caracterización pueden variar en una misma cantera, lo que implica cambios en la respuesta estructural del material.
- ✓ Todos los métodos de compactación utilizados producen degradación en la muestra, siendo el más agresivo el correspondiente al ensayo de compactación Próctor T-180. En general se mantienen las formas de las curvas granulométricas para ambos sistemas de compactación.
- ✓ Se han determinado ecuaciones constitutivas que caracterizan el comportamiento de los materiales estudiados; los mismos no pueden generalizarse y están acotados a los materiales estudiados.
- ✓ La continuidad de este estudio es muy amplia, restando evaluar los materiales de otras zonas de explotación en la provincia.

Bibliografía

- [1] National Cooperative Highway Research Program, (NCHRP) 1-37A Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), 2002.
- [2] Cordini R. Contribución al Conocimiento de la Geología Económica de Entre Ríos. Ministerio de Industria y Comercio de la Nación. Anales – II (Nº87-M.I.C.). Buenos Aires, 1949.
- [3] Lorenz W. Evaluación del Potencial Minero no Metalífero de la Provincia de Entre Ríos, República Argentina. Dirección de Promoción Minera e Hidrogeológica, Paraná. Ministerio de Economía, Obras y Servicios Públicos. Paraná, Entre Ríos, 1994.
- [4] <https://www.google.com.ar/maps>.
- [5] <http://geointa.inta.gov.ar/geoparana>.
- [6] Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials, AASHTO 2007.
- [7] Angelone S, Martínez F, Cauhapé Casaux M. Caracterización Dinámica de Suelos Granulares. XXXV Reunión Anual del Asfalto, organizado por la CPA y la FCEIA – UNR. Rosario. Argentina, Noviembre 2008.
- [8] Jiménez Acuña M. Implementación del Ensayo de Módulo Resiliente en Bases Granulares para Pavimentos. Laboratorio de Ensayos Dinámicos (LED). Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, San José. Costa Rica, 2009.

[9] Angelone S, Martínez F, Cauhapé Casaux M, Ballestrini G. Evaluación de Modelos para la Predicción del Módulo Resiliente de Suelos de Subrasante. Revista Carreteras. Año LV - N°197. Abril 2010.

[10] Cordo O. Curso de Módulo Resiliente. Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña Agrimensor Alfonso de la Torre. Instituto de Materiales y Suelos. Universidad Nacional de San Juan. Argentina, 2011.