

Análisis de correlaciones existentes entre ensayos de laboratorio y el contenido de humedad en las características mecánicas de suelos

Alejandro Quiñonez Samaniego

Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, rquinonez@ing.una.py

Eduardo Bittar Marín

Profesor Investigador Asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, ebittar@ing.una.py

Miguel Enrique Paats Nicora

Candidato a Master en Ciencias de la Ingeniería Civil, Facultad, de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, mpaats@fiuna.edu.py

Adriana Coronel Genes

Ingeniera Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, adriana.coronel@fiuna.edu.py

Akemi Ozaki Valiente

Ingeniera Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, aozaki@fiuna.edu.py

RESUMEN: El propósito de la investigación es determinar la relación entre el Módulo Resiliente y los valores obtenidos de los ensayos CBR, DCP y LWD respectivamente todos en laboratorio, para suelos del grupo A-2 utilizados como subrasante en carreteras de nuestro país. Los suelos a ensayar se clasificaron y caracterizaron a través de ensayos de granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica y Proctor normal. Estos materiales se compactaron de forma estática a diferentes humedades y densidades según la prueba de compactación Proctor normal de laboratorio. Luego se determinaron sus características a través de los siguientes ensayos: DCP que es un método de prueba efectivo, rápido y confiable para determinar las propiedades de rigidez/resistencia de las capas granulares y subrasante. El CBR que es uno de los ensayos más conocidos y utilizados a nivel mundial. LWD consiste en un ensayo no destructivo nos brinda el módulo elástico del suelo para una humedad y densidad controlada. Finalmente, el ensayo Triaxial Dinámico que determina el módulo resiliente en laboratorio para condiciones determinadas. Con los resultados de todos los ensayos realizados se procedió a determinar las correlaciones para obtener el valor del módulo de resiliencia por medio de la ejecución de los demás ensayos.

PALABRAS-CLAVES: CBR, DCP, LWD, MR, Subrasante.

ABSTRACT: The purpose of the research is to determine the relationship between the Resilient Modulus and the values obtained from the CBR, DCP and LWD tests, respectively, all in the laboratory, for soils of group A-2 used as subgrade in roads in our country. The soils to be tested were classified and characterized through granulometry, Atterberg limits, specific gravity and normal Proctor tests. These materials were statically compacted at different humidities and densities according to the laboratory normal Proctor compaction test. Then their characteristics were determined through the following tests: DCP which is an effective, fast and reliable test method to determine the stiffness/strength properties of granular and subgrade layers. CBR, which is one of the best known and most widely used tests worldwide. LWD is a non-destructive test that gives us the elastic modulus of the soil for a controlled moisture and density. Finally, the Triaxial Dynamic test

determines the resilient modulus in the laboratory for given conditions. With the results of all the tests performed, we proceeded to determine the correlations to obtain the value of the resilient modulus by means of the execution of the other tests.

KEYWORDS: CBR, DCP, LWD, MR, Subgrade.

1 INTRODUCCION

El Módulo Resiliente es la capacidad de los materiales para almacenar o absorber energía sin presentar una deformación permanente, es decir, es una propiedad dentro del límite proporcional del material (P.Popov, 1990), se determina mediante el ensayo triaxial dinámico, basado en la deformación recuperable bajo cargas repetidas, la muestra se somete a un esfuerzo cíclico de manera dinámica y esfuerzo de confinamiento de forma estática proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial.

El Módulo Resiliente se utiliza para el análisis elástico multicapa, junto con el módulo de Poisson, es una variable que ayuda a predecir la respuesta mecánica de los materiales como los esfuerzos, deformaciones y deflexiones dentro de un pavimento (Jiménez, 2009).

Al ser un ensayo costoso debido a los equipos que implica y la necesidad de contar con personal calificado para realizarlo, en nuestro país no se realiza este ensayo, es por eso que en la mayoría de los casos se opta por el uso de correlaciones o nomogramas para determinar el valor aproximado del módulo resiliente.

El objetivo principal de esta investigación es lograr la estimación del módulo resiliente de suelos areno-arcillosos a partir de ensayos más rápidos y económicos utilizados actualmente en nuestro país.

Los ensayos seleccionados son el Deflectómetro de peso Liviano (LWD), el Penetrómetro Dinámico Ligero (DCP) y el ensayo de Relación de Soporte de California (CBR).

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y Equipos utilizados.

Los materiales a ser utilizados son suelos areno-arcillosos del grupo A-2 según la clasificación AASHTO M-145 y los equipos a ser utilizados son: El equipo triaxial dinámico GDS 5Hz 5k ELDyn para el ensayo triaxial, el equipo Dynatest Light Weight Deflectometer para el LWD, el equipo Controls Group para el ensayo de CBR y el Cono Dinámico de Penetración para la obtención del Índice de DCP.

Tabla 1. Resultados de Ensayos de Caracterización. Fuente: Elaboración propia

Muestra de Suelo	Suelo de Caacupe	Suelo de Caapucu
Clasificación AASHTO	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)
Constituyentes Principales	Grava y arena arcillosa o limosa	Grava y arena arcillosa o limosa
Clasificación SUCS	SC	SC-SM
Nombre Típico	Arena Arcillosa	Arena limo-arcillosa
Límite Líquido	23	23
Límite Plástico	13	18
Índice de Plasticidad	10	5
Uso en Obra	Subrasante	Subrasante

2.2 Metodología

La metodología propuesta consta de tres fases a seguir para la ejecución del estudio: La primera fase consiste en la recolección de muestras, se obtuvo el suelo de Limpio apto para ser usado como subrasante en la obra de la Costanera, el suelo de Caacupé apto para ser usado como subrasante en la obra de la Ruta 2 y el suelo de Caapucú apto para ser usado como subrasante en la obra CREMA Quindy - San Juan Bautista.

La segunda fase abarca los siguientes trabajos de laboratorio ensayos de Granulometría, Gravedad específica, Límites de Atterberg, Compactación Proctor, Índice de soporte de california (CBR), Triaxial dinámico (RLT), ensayo de succión, Deflectómetro de Peso Ligero (LWD) y Penetrómetro Dinámico Ligero (DCP) para todos los suelos.

Luego de realizar todos los ensayos a los suelos se procede a la tercera fase, el análisis en gabinete, consiste en analizar e interpretar los resultados obtenidos de la realización de ensayos para presentar en forma gráfica y descriptiva los resultados del estudio. Se revisará la relación existente entre las variables utilizando las ecuaciones de correlación con el CBR, LWD, DCP y el valor de MR.

2.3 Consideraciones

2.3.1 Consideraciones respecto a la energía de compactación - Ensayos Proctor Normal

Para tener un mejor control de las humedades y densidades de las probetas a ser ensayadas se decide compactarlas estáticamente a la energía del Proctor Normal.

Tabla 2. Resultado de ensayos de Proctor Normal. Fuente: Elaboración propia

Muestra de Suelo	Unidad de Medida	Suelo de Caacupe	Suelo de Caapucu
Densidad seca maxima	kg/cm ³	1896	1814
Densidad optima	kg/cm ³	1937	1917
Humedad optima	%	10,60	11,60

2.3.2 Consideraciones respecto a la humedad

Se consideraron las humedades y densidades indicadas en la tabla 3.

Tabla 3. Resumen de humedades y densidades para los ensayos. Fuente: Elaboración propia

Muestra de Suelo	Suelo de Caacupe		Suelo de Caapucu		
	Nombre	Humedad (%)	Densidad (kg/m ³)	Humedad (%)	Densidad (kg/m ³)
W+1	W+1	11,6	1960	12,2	1935
W-1	W-1	9,6	1958	10,2	1935
W+2	W+2	12,6	1922	13,2	1880
W-2	W-2	8,6	1896	9,2	1850
OPT 2	OPT 2	10,6	1922	11,2	1880
OPT 1	OPT 1	10,6	1960	11,2	1935

2.4 Resultados de ensayos

2.4.1 Ensayos – DCP

Observamos que a medida que aumentamos el peso de caída libre el índice de penetración DCP aumenta. En las gráficas podemos apreciar que mientras mayor es el contenido de humedad en la que se encuentre el cuerpo de prueba mayor es el valor del índice de DCP (I_{DPI}), este comportamiento es similar para ambos suelos ensayados, esto se debe a que, a mayor contenido de humedad, menor es la resistencia a la penetración que presenta el suelo. Esto concuerda con la bibliografía estudiada.

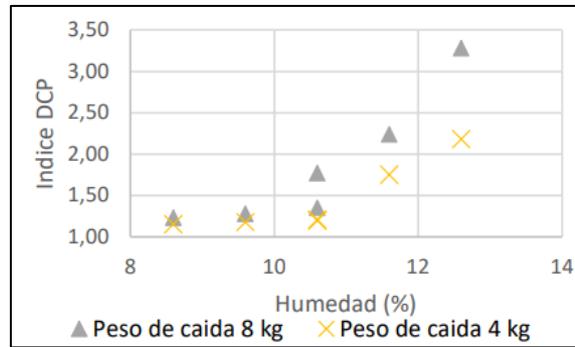


Figura 1. Índice de DCP (I_{DPI}) vs Umidade. Solo de Caacupé. Fonte: Elaboração Propria.

2.4.2 Ensayos – CBR

Como se puede observar en la figura presentada los valores de CBR para el suelo de Caacupé se encuentra en el rango de 5,54 % y 12,59 % y en el caso del suelo de Caapucu se encuentra en el rango de 6,80 % y 14,26 %.

También se observa que ambos gráficos presentan comportamientos similares teniendo del lado seco de la curva de compactación valores elevados de CBR mientras que del lado húmedo se presentan valores menores, y para una misma humedad observamos que el valor de CBR es directamente proporcional a la densidad del suelo, es decir para una densidad mayor se tiene un valor de CBR mayor.

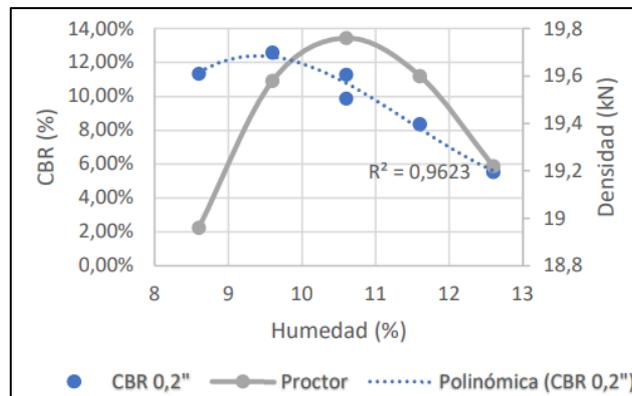


Figura 2. CBR vs Umidade. Solo de Caacupé. Fonte: Elaboração Propria.

2.4.3 Ensayos – LWD

Se ensayaron las probetas bajo las siguientes variables:

- Diámetro del molde: 100 mm y 150 mm
- Peso de caída: 10 kg y 15 kg
- Altura de caída: 4", 8,25" y 16,5"

Observamos un comportamiento similar en ambos suelos cuando usamos el molde de 100 mm, peso de caída de 10 kg y altura de 4" así como para la altura de 8,25"

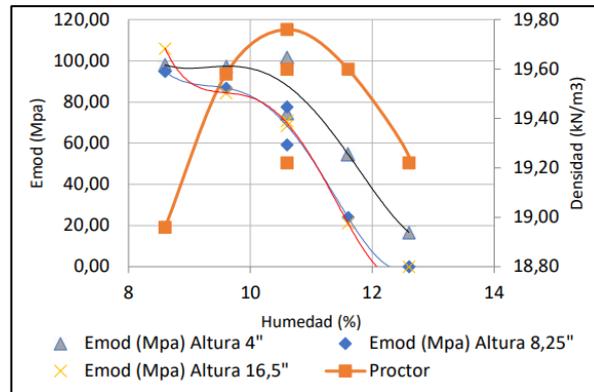


Figura 3. Resultado LWD. Peso de caída 10 kg. Suelo de Caacupé. Fuente: Elaboración Propia.

Observamos que las densidad y humedades obtenidos por el ensayo de compactación Proctor Estándar no necesariamente son los valores óptimos en los que se refiere a modulo elástico obtenido por el LWD.

Debido al gran número de variables utilizadas en este ensayo en particular, se realizó un análisis estadístico con el software Minitab para determinar cuál de todas las variables tiene mayor incidencia en el valor del Módulo Elástico del suelo. La altura de caída del peso de 10kg, la cual varía entre 4" y 8.25" es el factor más influyente, seguido por la combinación del efecto generado por la variación de la densidad y la humedad. Por lo que se concluye que la variación del diámetro de los moldes de las probetas no es un parámetro de alta influencia en el ensayo.

2.4.4 Ensayos – Modulo Resiliente y succión

EL módulo de resiliencia aumenta con el aumento de la tensión desviadora, y dentro de un mismo nivel de tensión confinante, una tensión desviadora mayor causa una desviación resiliente mayor.

Ambos suelos presentan la misma tendencia de succión con relación a distintos porcentajes de humedad.

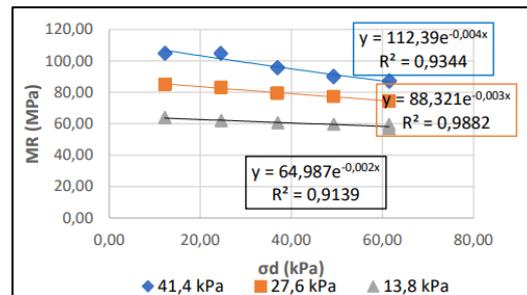


Figura 4. Comportamiento resiliente del suelo de Caacupé en función al esfuerzo. Fuente: Elaboración Propia.

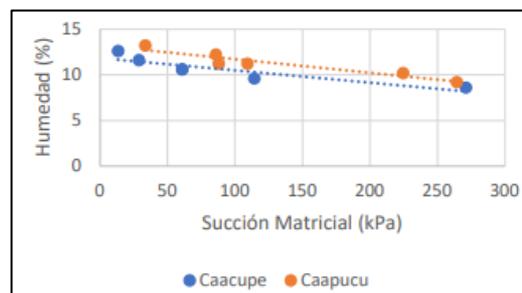


Figura 5. Curva de succión de los suelos estudiados. Fuente: Elaboración Propia.

3 ANALISIS Y DISCUSION Y RESULTADOS

3.1 Relación CBR – DCP

Se observa que las dos variables son inversamente proporcionales entre sí, esto indica que se obtienen valores bajos de I_{DPI} cuando el suelo tiene mayor resistencia a la penetración, mientras que los valores del CBR aumentan.

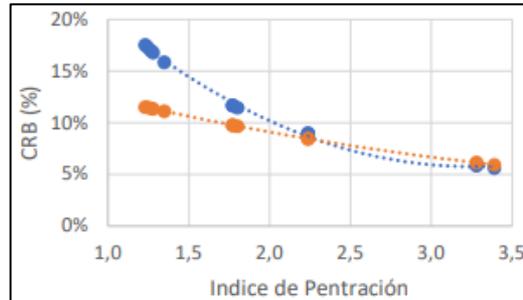


Figura 6. Curva CBR (En azul Caapucu y En naranja Caacupé) vs Índice DCP.
 Fuente: Elaboración Propia.

3.2 Relación MR-LWD

Analizamos los resultados para cada suelo por separado. Utilizamos los valores de módulo de resiliencia para una tensión de confinamiento de 41,4 kPa y una tensión desviadora de 69 kPa.

Para el suelo de Caacupé, podemos afirmar que la correlación que mejor se aproxima a los valores obtenidos corresponde a los valores de E_{lwd} ensayados con el molde de 100 mm, peso de caída de 15 kg y una altura de caída de 4" por medio de ensayos en laboratorio es la correlación con la siguiente ecuación:

$$Mr(MPa) = LWD (MPa) * 0.015 * e^{0.431*w} \quad (1) \text{ Suelo de Caacupé}$$

Donde:

Mr = Modulo de Resiliencia (MPa)

LWD = Modulo elástico en (MPa)

w = Humedad (%)

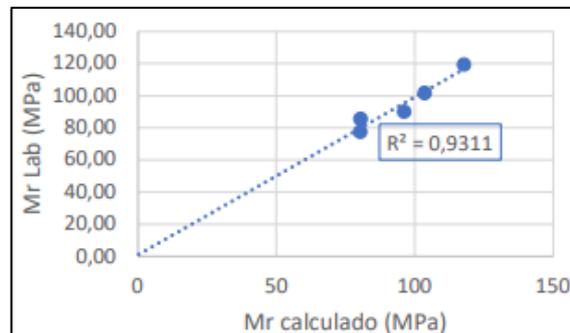


Figura 7. Mr Laboratorio vs Mr calculado de la ecuación (1). Fuente: Elaboración Propia.

3.3 Relación MR-CBR

Analizamos los resultados para cada suelo por separado. Utilizamos los valores de módulo de resiliencia para una tensión de confinamiento de 41,4 kPa y una tensión desviadora de 69 kPa.

Para el suelo de Caacupé, la correlación (2) es la que mejor se aproxima a los valores obtenidos por medio de ensayos en laboratorio

$$Mr(\text{MPa}) = \text{CBR} * 419.09 * e^{0.079*w} \quad (2) - \text{Suelo de Caacupé}$$

Donde:

Mr= Módulo de Resiliencia (MPa)
 CBR= California Bearing Ratio (%)
 w= Humedad (%)

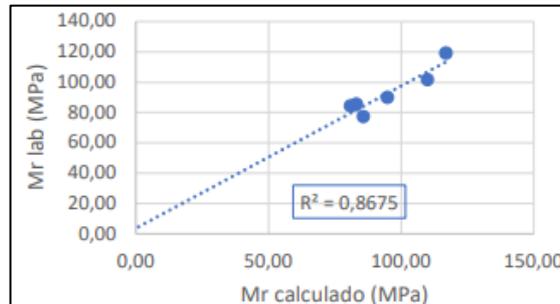


Figura 8. Mr Laboratorio vs Mr calculado de la ecuación (2). Fuente: Elaboración Propia.

3.4 Relación MR-DCP

En la figura se presenta la correlación entre el Módulo de Resiliencia (Mr) y el Índice de penetración para un peso de caída de 8 kg, con una línea de tendencia exponencial.

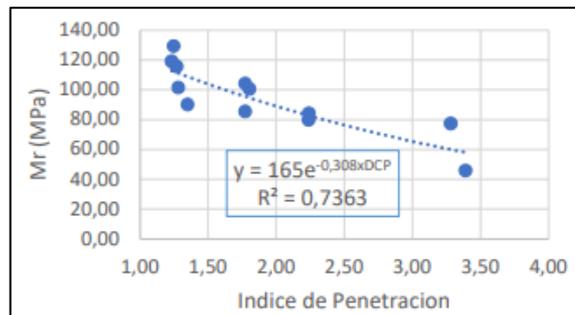


Figura 9. Relación Mr vs Índice de Penetración (I_{DPI}) Fuente: Elaboración Propia.

Según lo observado en la literatura la mayoría de las relaciones encontradas entre el MR y el I_{DPI} presentan una función exponencial decreciente (Uz, 2015).

Mediante esta ecuación se puede obtener valores aproximados de Mr al conocer los valores de índice de penetración. Se observa que las dos variables son inversamente proporcionales entre sí, esto indica que se obtienen valores bajos de I_{DPI} cuando el suelo tiene una mayor capacidad resiliente, los valores de Mr disminuyen a medida que el I_{DPI} aumenta.

4 CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el módulo de resiliencia se incrementa a medida que la succión matricial lo hace, en ambos suelos estudiados, por otro lado, cabe destacar que a mayor densidad y para un mismo valor de succión matricial el módulo de resiliencia se incrementa. Lo cual se condice con otros trabajos similares y la bibliografía utilizada.

Fue posible hallar una correlación en laboratorio entre el MR y el módulo obtenido del LWD con un grado de confiabilidad mayor al 90% para ambos suelos, utilizando las condiciones mencionadas en este artículo.

Fue posible hallar una correlación en laboratorio entre el MR y el I_{DPI} con un grado de confiabilidad mayor al 70% para ambos suelos, utilizando las condiciones mencionadas en este artículo.

Fue posible hallar una correlación en laboratorio entre el CBR y el I_{DPI} con un grado de confiabilidad mayor al 70% para ambos suelos, utilizando las condiciones mencionadas en este artículo.

El costo del ensayo triaxial es bastante elevado en comparación a los demás ensayos, por lo que resulta rentable la utilización de las ecuaciones de correlación encontrados a modo de obtener el valor del módulo resiliente de manera aproximada, recomendándose siempre realizar el ensayo para proyectos cuya envergadura lo requiera.

Se observa que el ensayo de mayor duración es el CBR, con un total de 96hs según norma. Siendo el ensayo del módulo resiliente el segundo con mayor duración. Por lo que de nuevo resulta eficiente la utilización de las correlaciones para obtener los valores tanto del módulo resiliente como del CBR, siempre y cuando estas puedan ser verificadas o en todo caso ajustadas o corregidas a condiciones locales.

Cabe destacar que los ensayos de ejecución más rápida son el LWD y el DCP que favorecen optimización de tiempo y recursos para el control de compactación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción por el apoyo técnico y científico para concluir el trabajo final de grado en la carrera de Ingeniería Civil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baeck, F. H., & González, J. F. M. (2019). *Comportamiento mecánico de un suelo estabilizado con altos contenidos de aditivos a base de calcio en términos de resistencia y modulo resiliente*. 158.
- Bagnarello, F. (2010). *Análisis del efecto del esfuerzo de succión en la capacidad soportante de cimentaciones profundas*.
- Berrocal, C. (2019). *Comparación del control de grado de compactación In Situ, utilizando el deflectómetro de peso liviano (LWD) comparado a los resultados del método nuclear y método del cono de arena para un tramo del proyecto Tocache-Juanjuí, en la región San Martín*.
- Chandler, R. J., & Gutierrez, C. I. (1986). The filter-paper method of suction measurement. *Géotechnique*, 36(2), 265-268. <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.2.265>
- Chaves Hurtado, S. (2017). *Comparación de valores de módulo resiliente en suelos de subrasante obtenidos por ensayos de campo y laboratorio*.
- Elgueta, J. C. C., Esper, O. N., Schüler, R. G., & Gormaz, C. C. (2017). *Implementación de ensayos de succión en suelos parcialmente saturados y análisis de resultados en suelos residuales*. 84.
- García, N. P., & Anguas, P. G. (2011). *Evaluación de la relación entre módulo de resiliencia y succión*. 6.
- Garnica, P., Perez, N., & Gomez, J. (2000). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*.
- Irineu Verson, G. (2015). *Modulo de resiliencia e vida de fadiga de areia artificialmente cimentada*.
- Jiménez, M. (2009). *Implementación del ensayo de módulo resiliente en bases granulares para pavimentos*. San José: Lannamme UCR. 136.
- Mousavi, D. S. H., Gabr, D. M., & Borden, D. R. (2016). Subgrade resilient modulus prediction from light weight deflectometer. 34.
- Musharraf, Z., Dar-Hao, C., & Joakim, L. (2021). Resilient Moduli of Granular Materials (Vol. 120). *Journal of Transportation Engineering*.
- Pérez, N., Garnica, P., González, J., Curiel, N., & Ruiz, M. (2016). *Modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación*.
- P. Popov, E. (1990). *Engineering mechanics of solids*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Uz, V. E. (2015). *Comparison of DCP, CBR, and RLT Test Results for Granular Pavement Materials and Subgrade with Structural Perspective*.