

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/683

Evaluación de la Calidad de Compactación en Terraplenes Mediante Diferentes Métodos de Control

Pedro Manuel Cañete Ott

Candidato a Máster en Ciencias de la Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay, pmcott@fiuna.edu.py

Rubén Alejandro Quiñonez Samaniego

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

Eduardo Bittar Marin

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

Vivian Pamela Torres Olivera

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

Ariel Portillo González

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

RESUMO: Para el control de la calidad de compactación de terraplenes, el ensayo de cono de arena es el método comúnmente utilizado en el Paraguay. A fin de determinar la viabilidad del LWD y DCP para el control de compactación, la investigación se centró en la evaluación de la compactación utilizando como referencia, los resultados del ensayo del cono de arena. Se estudiaron, en laboratorio y campo, la influencia de las variaciones de densidad, humedad y presión en las mediciones con los diferentes equipos. Se configuró un diseño experimental que implicó la elaboración de probetas con densidades y humedades específicas. Sobre estas probetas, se efectuaron los ensayos con los equipos LWD y DCP. Posteriormente, en campo, se dispusieron de pistas con diferentes grados de compactación, sobre las cuales se realizaron las mediciones. Se establecieron correlaciones, tanto en laboratorio como en campo, entre el índice DCP, la densidad seca y la humedad. En general, se observó que el método con el DCP exhibió un mejor comportamiento para el control de compactación que el método con el LWD.

PALABRAS-CLAVE: Compactación, Control de Calidad (QC), Light Weight Deflectometer (LWD), Dynamic Cone Penetrometer (DCP), Cono de Arena.

ABSTRACT: For quality control of embankment compaction, the sand cone test is the method commonly used in Paraguay. In order to determine the feasibility of LWD and DCP for compaction control, the research focused on the evaluation of compaction using the results of the sand cone test as a reference. The influence of density, moisture and pressure variations on the measurements with the different equipment was studied in the laboratory and in the field. An experimental design was set up that involved the elaboration of specimens with specific densities and moistures. Tests with LWD and DCP equipment were carried out on these specimens. Subsequently, in the field, tracks with different levels of compaction were available, on which the measurements were carried out. Finally, were established correlations both in the laboratory and in the field between the DCP index, dry density and moisture. In general, it was observed that the DCP method performed better for compaction control than the LWD method.

KEYWORDS: Compaction, Quality control (QC), Light Weight Deflectometer (LWD), Dynamic Cone Penetrometer (DCP), Sand Cone.

1 INTRODUCCIÓN

Algunos métodos convencionales para el control de la compactación, como el ensayo de cono de arena o el ensayo de balón de caucho, pueden presentar ventajas económicas en términos de adquisición y operación, así como precisión; sin embargo, estos métodos requieren una labor intensiva que, en el avance de la obra, podría repercutir en una recolección limitada de muestras, las cuales pueden no ser lo suficientemente representativas en términos de homogeneidad de la unidad constructiva. Ernest S. Berney et al. (2013), citado por Parada (2018), elaboró un resumen de las alternativas de dispositivos de medición existentes involucradas en las metodologías de control de compactación para determinar la humedad, rigidez y densidad de los suelos en el campo.

Las nuevas tecnologías como el Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) y el Densímetro Nuclear pueden representar una mayor inversión en la adquisición de los equipos y capacitación, pero presentan mayor rapidez de operación ofreciendo la posibilidad de aumentar el número de muestras sin comprometer la precisión, lo que equivale a una mayor calidad de información. El Maryland Department of Transportation State Highway Administration (2017), llevó a cabo un estudio sobre el uso del LWD para medir el módulo y su integración en métodos de control de calidad de compactación. Salamanca (2019) empleó el equipo LWD para evaluar capas de suelo granular terminados comparando los valores obtenidos con los obtenidos en el ensayo de cono de arena.

En lo que respecta al Cono Dinámico de Penetración (DCP), Frateschi et al. (2001) evaluaron la aplicación potencial del DCP en la determinación de densidades y humedades en suelos limosos compactados. Guevara & Canaza (2023), proponen un enfoque alternativo para el control de calidad de compactación utilizando el DCP. Finalmente, Benavides & Cevallos, (2017) evidenciaron que el control de compactación mediante el DCP constituye una alternativa viable y confiable para evaluar el grado de compactación.

En este trabajo de investigación se busca evaluar los métodos de control de compactación empleando el Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) y el Cono Dinámico de Penetración (DCP), en comparación con los resultados del ensayo tradicional de cono de arena. El propósito es determinar la viabilidad de su inclusión potencial en la fiscalización de control de compactación de terraplenes en el Paraguay.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y equipos utilizados

El material utilizado para los ensayos fue un suelo utilizado para la construcción de terraplenes en el proyecto vial del acceso al Puente de la Integración, como pista de prueba. Este suelo es comúnmente utilizado en la construcción de caminos vecinales en la región.

Los equipos seleccionados para la ejecución de los ensayos comprenden: El Deflectómetro de Impacto Ligero de la marca Dynatest destinado a la determinación del módulo E_{LWD} , y el Cono Dinámico de Penetración (DCP) para la obtención del índice DCP. Estos instrumentos serán empleados tanto en las pruebas de campo como en las de laboratorio. Además, se empleará el equipo de Cono de Arena para la obtención de la densidad en campo.

2.2 Consideraciones y variables para los ensayos

Las variables consideradas en los ensayos con el DCP fueron el índice DCP, la humedad y la densidad seca. Las variables consideradas en los ensayos con el LWD fueron el módulo de rigidez, la humedad, la densidad seca y la presión de carga. Para ambos ensayos se confeccionaron probetas con humedades y densidades secas controladas mediante compactaciones estáticas.

2.3 Consideraciones y variables para los ensayos de campo

Para la investigación se plantearon un total de 3 pistas para la realización de las pruebas, cuyas dimensiones fueron de 6 metros de ancho, 60 metros de largo, y 20cm de espesor de capa.

La cantidad de pasadas requeridas para alcanzar la densidad máxima de compactación se estableció en 6 pasadas de la compactadora, según especificaciones manejadas en obra por personales de supervisión.

Por lo tanto, cada pista fue configurada de la siguiente manera:

P1: Pista con Compactación Parcial (2 Pasadas de la compactadora)

P2: Pista con Compactación Parcial (4 Pasadas de la compactadora)

P3: Pista con Compactación Total (6 Pasadas de la compactadora)

Sobre cada pista, se realizaron los ensayos con el Cono de arena, LWD y DCP, siguiendo rigurosamente el esquema mostrado en la Figura 1.

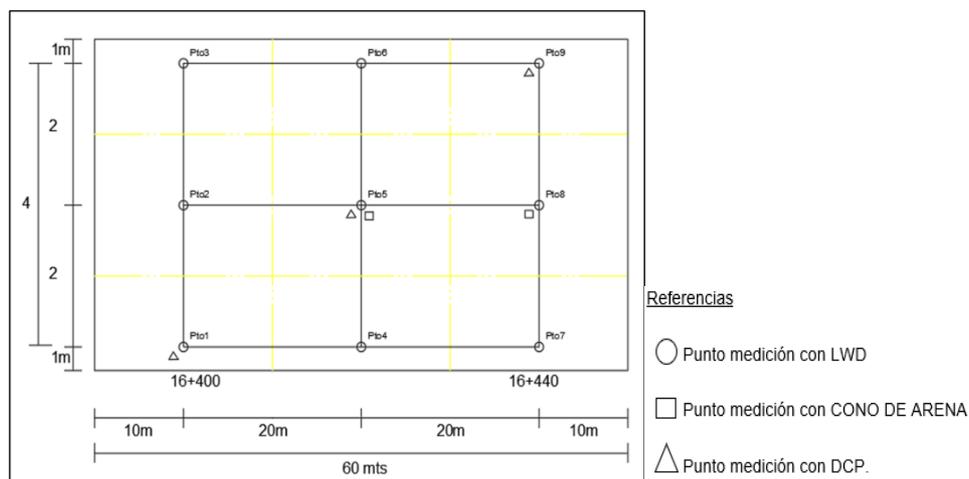


Figura 1. Ubicación de puntos del muestreo para las 3 pistas.

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Ensayos de Laboratorio

3.1.1 Ensayos de clasificación de suelo y humedad óptima

Se procedió a la clasificación del suelo recolectados obteniéndose los valores mostrados en la Tabla 1. Para la aprobación de probetas, se estableció una tolerancia de $\pm 0,5$ % para el contenido de humedad y de ± 1 % para la densidad seca.

Tabla 1. Clasificación de Suelos

	Parámetro	Resultado	Norma
Análisis granulométrico	Pasante del Tamiz N° 200	71 %	ASTM D6913
	Límite Líquido	57 %	
Límites de Atterberg	Límite Plástico	30 %	ASTM D4318-17
	Índice de Plasticidad	27 %	
	Grupo	A-7-5	
	Materiales significativos constituyentes	Arcilla	
Clasificación AASHTO	Denominación	CH	Arcilla de Alta Plasticidad
	Nombre del grupo	Arcilla de Alta Plasticidad	
	Densidad seca máxima	1 509 kg/m ³	
Ensayo Proctor	Humedad óptima	29.58 %	ASTM D698

3.2 Ensayos con el Cono Dinámico de Penetración – DCP

Los ensayos fueron realizados utilizando la norma ASTM D6951 que especifica como medir la tasa de penetración del cono dinámico de penetración en suelos no perturbados, materiales compactados, o ambos.

3.2.1 Sensibilidad del índice DCP a la humedad y densidad seca

Se procedió a realizar el análisis de diseño de experimentos factoriales. El análisis entregó un coeficiente de determinación R^2 de 93,39% para el modelo de ajuste. En la Figura 2, se aprecia el resultado del análisis que indicó que la humedad es el factor más influyente en el índice DCP, pero también que la densidad tiene una influencia significativa.

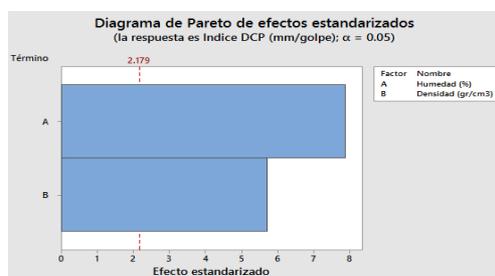


Figura 2. Influencia de los factores en el índice DCP

En la Figura 3, se visualiza la dispersión de puntos que relaciona el índice DCP con la densidad seca para cada nivel de contenido de humedad. En ella, se aprecia que el valor del índice DCP, alcanza sus máximas variaciones en la rama húmeda y cuando el suelo esta menos denso, y mínimas variaciones en la rama seca y cuando el suelo se encuentra más compacto. Es así que, la región más adecuada para la detección de densidades con el DCP es la rama seca. Sin embargo, es poco sensible por encima del 95% de compactación, es decir, ante una gran variación de densidad, se observan mínimas variaciones en el índice DCP.

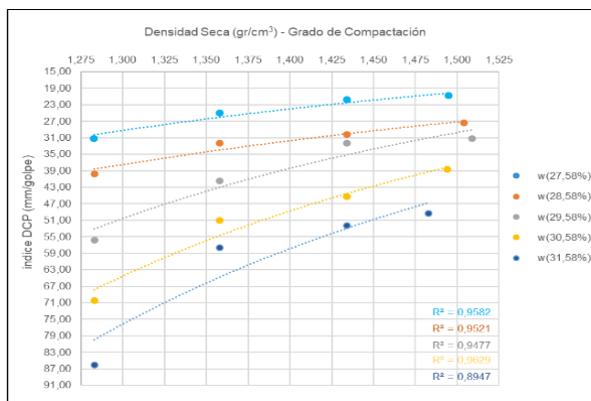


Figura 3. Relación entre el índice DCP y densidad seca para cada contenido de humedad

3.3 Ensayos con el Deflectómetro de Impacto Ligero – LWD

Los ensayos LWD en laboratorio fueron realizados utilizando la norma ASTM E3331 y para el procedimiento en campo, se adoptó la norma AASHTO TP-456-01.

3.3.1 Sensibilidad del Módulo E_{LWD} a la humedad, densidad, y presión

Se procedió a realizar el análisis de diseño de experimentos factoriales. El análisis entregó un coeficiente de determinación R^2 de 96,62% para el modelo de ajuste. En la Figura 4, se aprecia el resultado del análisis que indicó que la humedad es el factor más influyente en el módulo de rigidez E_{LWD} , seguido de la combinación de la humedad con la densidad seca. También señaló que la presión ejercida tiene una influencia significativa. Las demás combinaciones de factores no resultaron influyentes. Se destaca el escaso efecto de la densidad. Los resultados demostraron que, en todos los casos, la humedad sigue siendo el factor más influyente, adquiriendo mayor significancia para grados de compactación superiores al 95% con relación a los demás factores. La influencia de las presiones fue significativa en ambas ramas, pero lo fue más en la rama seca que

en la húmeda. La influencia simultánea de la humedad en combinación con la densidad fue significativa en todos los casos.

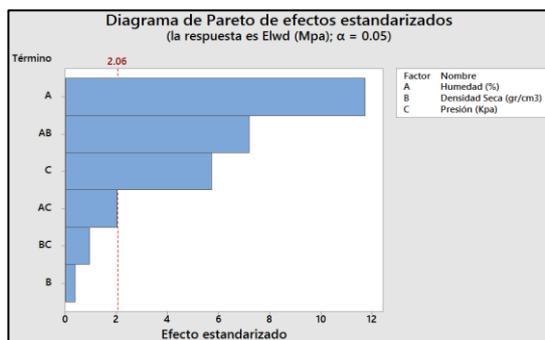


Figura 4. Influencia de parámetros entre el 90% y 100% de compactación

En la figura 5 se observa que, a medida que la humedad aumenta, el módulo disminuye. También se puede notar que, para humedades mayores o iguales a la óptima, las alturas de caída no resultaron relevantes, debido a que generaron módulos similares. Sin embargo, para humedades menores a la óptima, se obtuvieron módulos diferentes.

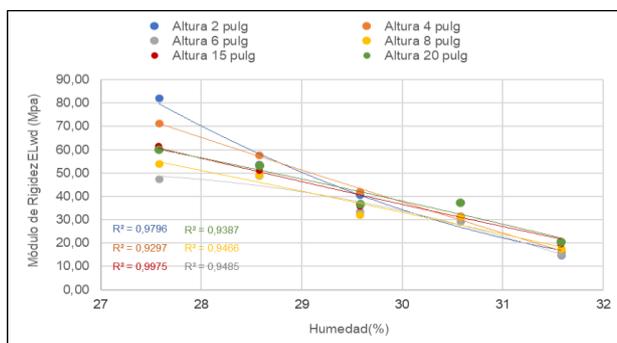


Figura 5. Módulos en función de la humedad para cada altura de caída. Probetas con 100% de compactación

Considerando los gráficos mostrados, se observa que hay un comportamiento del módulo en la rama seca diferente al de la rama húmeda. En la rama seca, cuando disminuye la densidad, también lo hace el módulo, pero en la rama húmeda, cuando disminuye la densidad, el módulo aumenta. Además, en la región de la humedad óptima, la variación del módulo es mínima. Esto implica que, en la rama seca, los valores del módulo para condiciones subcompactadas del suelo, serán menores al valor máximo para la condición totalmente compactada (E_{Objetivo}), por lo que la relación de módulos será menor a uno, es decir, el método detectaría con eficiencia un suelo que no está totalmente compactado. Por otra parte, en la rama húmeda, los valores del módulo para condiciones subcompactadas del suelo, serán mayores al valor máximo correspondiente a la condición totalmente compactada (E_{Objetivo}), por lo que el cociente entre el módulo de campo y el módulo objetivo daría mayor a la unidad, lo cual indica que el método no detectaría el suelo subcompactado en esa zona.

3.4 Ensayos de Campo

Tabla 2. Resultados de ensayos de cono de arena

Pista	Pista 1	Pista 2	Pista 3
Número de Pasadas	2	4	6
Punto de Ensayo	5	5	8
Humedad del Punto (%)	29.3	28.9	29.1
Densidad Seca (kg/m³)	1 270	1 427	1 348
Densidad máxima seca (kg/m³)	1 509	1 509	1 509
Grado de Compactación	84.2	94.6	89.3

4.4.1 Correlación en campo entre la densidad seca, el índice DCP y la humedad

Se realizó un análisis de regresión no lineal ajustando la dispersión de puntos representativos al modelo mencionado en (Guevara & Canaza, 2023), cuyo resultado se exhibe en la Figura 6. El coeficiente de determinación R^2 obtenido por el modelo fue del 93,6%.

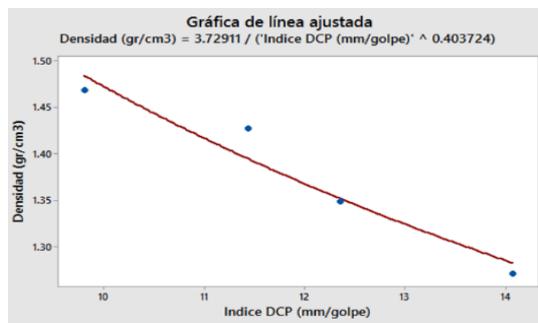


Figura 6. Curva resultante del análisis de regresión

3.4.1 Comportamiento del Módulo de Rigidez LWD respecto a cambios de humedad y densidad

El módulo objetivo se obtiene a partir del análisis de los resultados en el laboratorio de las probetas compactadas a densidades y humedades equivalentes al 100% de la energía estándar, según ASTM D-698. Los coeficientes del modelo de ajuste proporcionada por el método fueron determinados y los resultados mostraron un R^2 de 83,7%, lo que implica un buen ajuste de los datos. A continuación, se presenta la ecuación resultante, donde E_{LAB} representa el Módulo de rigidez en Mpa, ω denota la humedad en %, y P es la presión en Kpa, dicha ecuación se puede visualizar gráficamente en la Figura 7.

$$E_{LAB} = 1502,53 - 87,796 * \omega + 1,3137 * \omega^2 - 0,2127 * P + 0,000398 * P^2 \quad (2)$$

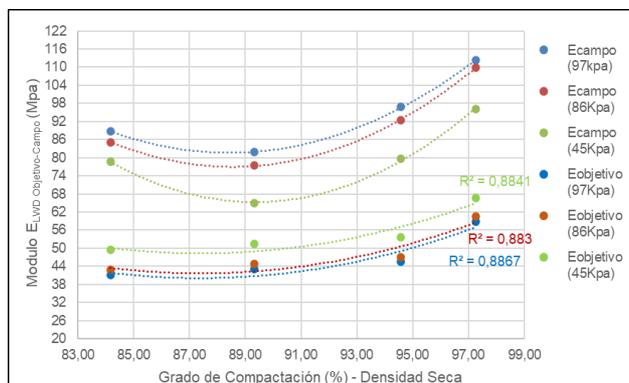


Figura 7. Módulos $E_{Objetivo - Campo}$ vs Densidad seca para todas las presiones

3.5 Evaluación de las pistas según diversos métodos

En la Figura 8 se presenta un resumen gráfico de los resultados obtenidos de los métodos estudiados en esta investigación.

Se puede afirmar que existe una baja concordancia entre los resultados de los métodos con el DCP y LWD, ambos señalan falta de homogeneidad en las pistas. Según el método DCP, sería necesario reforzar la pista terminada (pista 3), en la franja central de la misma. El método con el LWD también sugiere reforzar la pista, al menos en ambos bordes. Sin embargo, éstas son franjas que el DCP ha considerado aceptables. La falta de coincidencia podría atribuirse a posibles errores en la medición o a contenidos de humedad considerados según áreas de influencia de puntos de humedad conocida, así también el fenómeno que experimenta el módulo de rigidez con grados de compactación muy bajos.

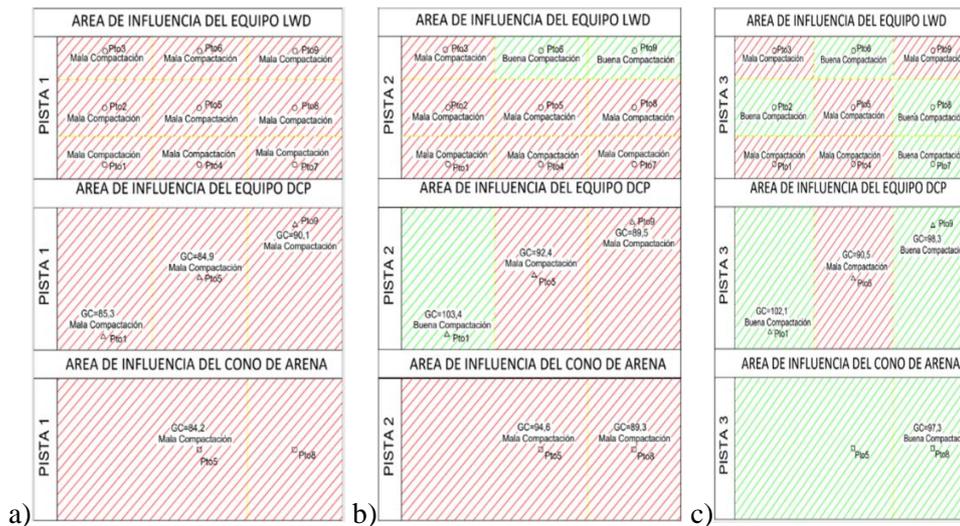


Figura 8. Comparativa de resultados de cada método en: a) Pista 1 (2 pasadas) b) Pista 2 (4 pasadas) c) Pista 3 (6 pasadas)

4 CONCLUSIONES

La investigación se centró en un tipo de suelo residual identificado como Arcilla de Alta Plasticidad A-7-5, con límites líquido y plástico de 57% y 30%, respectivamente, utilizado en la construcción de terraplenes.

4.1 En cuanto al método con el DCP

Se determinó que el índice DCP fue significativamente afectado por la humedad, con menor impacto en la rama seca, identificada como la región más adecuada para detectar variaciones de densidades con el método.

Aunque el índice DCP mostró una buena sensibilidad inicial a los cambios de densidad, esta cualidad disminuyó gradualmente hasta volverse poco sensible a medida que el suelo alcanzaba niveles altos de compactación. No obstante, esto no representa un problema para el método, ya que esta disminución de sensibilidad ocurrió para niveles de compactación por encima del límite aceptable.

Se lograron establecer correlaciones satisfactorias entre el índice DCP, la densidad seca y la humedad, tanto en el entorno de laboratorio como en campo. En cuanto a las correlaciones obtenidas en laboratorio, no pudieron emplearse en campo, debido a que se observó que el rango de valores de las mediciones del Índice DCP en campo no concordaron con los límites de validez de las correlaciones mencionadas. Esto sugiere que las condiciones simuladas en el laboratorio no reprodujeron adecuadamente la complejidad o variabilidad encontrada en el entorno real del campo.

Se determinó que es más efectivo obtener al realizar ensayos sobre plataformas de prueba compactadas con diferentes números de pasadas y configuraciones de la compactadora, manteniendo constante la humedad. Se observaron mejores aptitudes con este enfoque para predecir condiciones subcompactadas del suelo, así como puntos de la curva de compactación.

4.2 En cuanto al método con el LWD

Se determinó que la humedad es el factor más influyente en el módulo de rigidez E_{LWD} , presentándose una correlación muy fuerte entre ambos.

Además, el módulo mostró una alta sensibilidad a la presión en la rama seca, generando un amplio rango de valores de módulos, y una escasa sensibilidad en la rama húmeda, hasta el punto en que la presión se volvió irrelevante. Este comportamiento se mantuvo para densidades menores.

Se encontró que la relación entre el módulo y la densidad tiene un comportamiento particular, es directa en la rama seca e inversa en la rama húmeda. Respecto a la región con humedad óptima, se presentó poca

sensibilidad del módulo a los cambios de densidad. De esto se deduce que el criterio de relación de módulos del método es efectivo en la rama seca, y se sugiere sea invertido en la rama húmeda.

Dada la buena correlación hallada in situ entre el módulo de rigidez y la densidad, se encontró una alternativa para calibrar el método con el LWD empleando directamente los valores representativos de módulos de campo alcanzados en lugar de utilizar la relación de módulos.

4.3 En cuanto a los métodos abordados en esta investigación

Se encontró que existe una baja concordancia entre los resultados de los métodos con el DCP y LWD. Los métodos evaluados señalaron falta de homogeneidad en las pistas.

El equipo LWD demostró ser más rápido que el DCP, y su operación solo requirió de un operador, a diferencia del equipo DCP, que necesitó de dos operadores. Ambos equipos presentan métodos que optimizan la evaluación de la compactación de terraplenes y estructuras similares, aumentando el número de muestras sobre pistas para garantizar mayor homogeneidad y rapidez en obra.

Se considera que el método con el DCP exhibió un mejor comportamiento y mayor confiabilidad para controlar densidades alcanzadas que el método con el LWD. Esto no implica desmeritar al método con el LWD, sino que demostró una mayor exigencia en el nivel de cuidado tanto en las mediciones como con los parámetros que influyen en el módulo que proporciona.

AGRADECIMENTOS

Al Programa Universitario de Becas para la Investigación «Andrés Borgognon Montero» (PUBIABM) y a la ganadera 13 de Mayo S.A, por el apoyo técnico, científico y financiero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). Standard Method of Test for Compaction Quality Control Using Light Weight Deflectometer (LWD).
- Arriola Astocaza, M. D. J., & Farias Montoya, J. E. (2020). Propuesta metodológica para verificación del grado de compactación de suelos con un deflectómetro de impacto liviano (LWD). Universidad San Ignacio de Loyola.
- Berrocal Espinal, C. N. (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 [Tesis de Grado]. Universidad Continental.
- Guevara Lopez, I., & Canaza Rojas, F. (2023). Estimación de la densidad seca de un relleno granular utilizando el penetrómetro dinámico de cono. *Gaceta Técnica*, 24, 77-91. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica242.6>
- Manzano Ortiz, P. M. (2021). Correlación entre el CBR, DCP, propiedades índice y mecánicas en suelos del cantón Píllaro; parroquia Marcos Espinel; de la provincia de Tungurahua [bachelorThesis]. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Civil.
- Maryland Department of transportation state highway administration. (2017). Standardizing Lightweight Deflectometer Modulus Measurements for Compaction Quality Assurance.
- Parada, G. (2018). COMPARISON STUDY BETWEEN FIELD COMPACTION CONTROL DEVICES OF UNBOUND MATERIALS. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12699.98084>
- Salamanca Rodríguez, E. C. (2019). Curvas de calibración para el control de la calidad de compactación usando el equipo LWD en capas granulares en un proyecto de infraestructura vial [Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería]. <http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/47174>
- Yepes Piqueras, V. (2021). Procedimiento de construcción para la compactación y mejora del terreno. Universitat Politècnica de Valencia.