

Compatibilidad del ensayo de cono de arena con el equipo LWD para el control de calidad de rellenos in situ y análisis de ensayos MASW

Compatibility of the sand cone test with LWD equipment for quality control of in-situ backfill and MASW test analysis

MSc. Carlos Andrés Buenahora Ballesteros¹, Esp. (c) Oscar Mauricio Bravo Molina², PhD Antonio Miguel Martínez Graña³, PhD. Álvaro Orlando Pedroza Rojas⁴

¹ Universidad de Salamanca, Salamanca, España, Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-9497-9185>, Email: director@ingtecnica.com.co

² Universidad de Santander, Bucaramanga, Colombia, Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-5336-9920>, Email: obravo@ingtecnica.com.co

³ Universidad de Salamanca, Salamanca, España, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2242-5192>, Email: amgramma@usal.es

⁴ Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4174-2815>, Email: alvaroorlandopr@ufps.edu.co

Cómo citar: C.A. Buenahora-Ballesteros, O.M. Bravo-Molina, A.M. Martínez-Graña y A.O. Pedroza-Rojas, "Compatibilidad del ensayo de cono de arena con el equipo LWD para el control de calidad de rellenos in situ y análisis de ensayos MASW", Rev. Ingenio, vol. 22, n°1, pp. 7-15, 2025, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.4586>

Fecha de recibido: 18 de junio de 2024
Fecha aprobación: 23 de octubre de 2024

RESUMEN

Palabras clave:

Compactación, densidad, humedad, control de calidad, cono y arena, LWD.

La existencia de un método como el cono y arena para el control de calidad de rellenos con material In Situ ostenta algunas desventajas, entre ellas se encuentra el control de la humedad y granulometría presente en el suelo, ya que, si no se tiene un estricto control en cada una de ellas, es posible que los suelos queden aparentemente compactados, pudiendo llegar a ocasionar inconvenientes en las estructuras que vayan a ser apoyadas. La invención de un dispositivo tecnológico como el LWD (Deflectómetro de Impacto Ligero) para el control de calidad es un avance importante que permite realizar mayor cobertura de análisis puntual de pruebas en terreno, debido a su versatilidad y rapidez en la toma de pruebas en campo, además de ser un equipo con mayor sensibilidad a los cambios de granulometría y humedad, permitiendo tener mayor control en la aceptación de la compactación de capas. En la presente investigación se mostrarán los resultados y análisis de dos metodologías diferentes como garantes de la compactación del suelo de un relleno con dos diferentes fuentes, las cuales son el método de cono y arena y el equipo LWD. Finalmente, realizará una comparación de estos resultados con un ensayo de ondas superficiales (MASW, Análisis Multicanal de Ondas Superficiales) como resultado de la investigación se logró mostrar que a diferencia del ensayo de cono de arena, el LWD es una técnica adecuada de control de la compactación en especial porque no depende de la humedad y la granulometría de los suelos, y se correlaciona mejor con los resultados ensayos sísmicos.

ABSTRACT

Keywords:

Compaction, density, humidity, quality control, sand cone, LWD.

The existence of a method such as cone and sand for quality control of fills with in situ material has some disadvantages, among them is the control of moisture and granulometry present in the soil, since, if there is not a strict control in each one of them, it is possible that the soils are apparently compacted, this may cause inconveniences in the structures to be supported. The invention of a technological device such as the LWD (Light Weight Deflectometer) for quality control is an important advance that allows greater coverage of punctual analysis of field tests, due to its versatility and speed in taking field tests, besides being an equipment with greater sensitivity to changes in granulometry and humidity, allowing greater control in the acceptance of the compaction of layers. This research will show the results and analysis of two different methodologies as guarantors of soil compaction of a backfill with two different sources, which are the cone and sand method and the LWD equipment. Finally, a comparison of these results with a surface wave test (MASW, Multichannel Analysis of Surface Waves) will be carried out. As a result of the research, it was shown that unlike the sand cone test, the lwd is an adequate compaction control technique, especially because it does not depend on the moisture and granulometry of the soils, and correlates better with the seismic test results.

1. Introducción

El control de compactación de rellenos en Colombia es realizado a través de diferentes métodos o procedimientos, dentro de los cuales se encuentran, el densímetro nuclear (norma INV E 164 – 13) [1] y el método de cono y arena

(norma INV E 161 – 13) [2]. El primero, a pesar de emitir un resultado de la densidad de un relleno en poco tiempo, ha cedido importancia en la industria, producto de los impactos negativos en la salud que puede ocasionar a quien opere el equipo en campo. El segundo método, es menos versátil

Autor para correspondencia

Correo electrónico: diego.ortiz.2020@upb.edu.co (Diego Fernando Ortiz-Carrascal)



La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Artículo bajo la licencia CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>)

y requiere medidas directas del suelo comparado con el primero. Este método hoy en día en Colombia es el más empleado para el control de calidad de la compactación de rellenos, sin embargo, el tiempo de evaluación de cada prueba es mayor si se compara con el método del densímetro nuclear, sin embargo, al realizar pruebas de SPT y sísmicas se ha identificado que los materiales en el perfil, a profundidad, no presentan una adecuada compactación. Las dos metodologías anteriormente mencionadas; como de arena y densímetro nuclear, generan algún tipo de afectación al relleno, es decir, que afectan localmente la integridad de la estructura de este [3].

El método de cono y arena posee algunas limitaciones relacionadas con el tiempo de ejecución de las pruebas para la determinación de la compactación de un relleno [3]. Una de las repercusiones importantes relacionadas con el tiempo de ejecución es la baja cobertura de aplicación de pruebas de compactación, infiriendo que el control de compactación de un relleno en toda su área no sea determinado, por tal motivo, no se puede garantizar una estabilidad general en la estructura del relleno [3]. El problema que puede ocasionar esta baja cobertura en la infraestructura que vaya a ser construida sobre un relleno está asociado con inconvenientes a nivel estructural como agrietamiento o asentamientos de las estructuras. De la misma manera otra limitación del método de cono de arena es la presencia de fragmentos de roca genera una incertidumbre en los valores de la densidad puesto que altera fácilmente los valores con los que se calcula este parámetro del suelo de relleno, así como la alta sensibilidad en los resultados con relación a la presencia de humedad, qué cómo se es conocido de la gráfica de la curva de compactación, un menor o mayor valor de la humedad incide de manera considerable en la disminución de la densidad esperada.

El porcentaje de agua presente en el suelo para la compactación es un factor determinante para obtener la densidad máxima seca de un relleno [4]. Un porcentaje de humedad en el suelo ubicado por encima o por debajo del valor óptimo de humedad, puede ocasionar excesiva deformación producto de la destrucción de la cohesión entre las partículas del suelo y presentar agrietamiento de este al ser expuesto a las cargas de compactación [5]. Sin embargo, cuando un relleno es evaluado por el método de cono y arena y sí el material empleado para compactar contiene altos volúmenes de gravas de tamaño mayor a 3/4"; éstas pueden compensar los valores que se hallen por encima del valor óptimo de humedad determinado por el método del ensayo de Proctor modificado (INV E 142-13) [6].

Otra de las desventajas del método del cono y arena para el control de compactación de rellenos con suelo In Situ proviene del control de la granulometría de los materiales empleados para su construcción, puesto que, de la cantera

donde se extrae el material para el relleno, generalmente está constituido por suelo y bloques de roca o cantos de gran tamaño, que, durante la etapa de compactación no generan la calidad esperada del relleno. La matriz de un suelo a compactar es la que soportará los esfuerzos de un equipo compactador y se deformará, mientras que los bloques de roca o los cantos, sólo se acomodarán al interior de la estructura del relleno, sin embargo, aumentará la densidad del relleno debido a que posee un peso unitario mayor que la matriz del suelo, pero no precisamente no es un indicador correcto de la calidad del mismo.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente y con base en lo que se desarrollará a lo largo de este documento (otras técnicas de caracterización de suelos), la compactación aprobada por el método de cono y arena no garantiza que las obras que se construyan sobre el relleno no presenten inconvenientes estructurales en el futuro [14].

Enunciadas las ventajas y desventajas con el uso del método de cono de arena y en función de los avances de la tecnología en la geotecnia, se da paso al desarrollo de nuevas metodologías para el control de calidad de rellenos, entre ellas, el deflectómetro de impacto liviano (LWD); equipo no invasivo, que evalúa el grado de compactación de los rellenos de forma indirecta, es decir, que es un ensayo no destructivo. Con la ventaja de la versatilidad y su fácil operación, además de obtener resultados en tiempo real y en menor tiempo de evaluación comparado con el método de cono de arena y el densímetro nuclear, en los que se tiene afectación de la estructura del relleno y del operador respectivamente [3].

En Colombia, esta nueva tecnología es poco empleada, por su falta de conocimiento y aplicabilidad en el sector civil, es por ello, que a través de la presente investigación se pretende dar a conocer la compatibilidad de los resultados obtenidos en el control de calidad de un relleno empleando el método de cono y arena y el método del LWD, equipo fabricado por la empresa Dynatest [8].

Los resultados y análisis de resultados se realizaron de acuerdo con la recopilación de datos de campo en la construcción de un relleno con un suelo de tipo limo arenoso, ubicado en una obra del área metropolitana de Bucaramanga, departamento de Santander, el cual fue compactado en capas de 30 cm de espesor.

2. Antecedentes

Para de la determinación de la densidad máxima seca de un suelo se emplea la norma INV E 142-13 (ensayo modificado de compactación) [6], la cual explica que para determinar la humedad óptima y la densidad máxima seca de un suelo se usa un molde de 6" de diámetro y 116 mm de altura, un martillo y una mezcla de suelo y agua. El procedimiento consiste en realizar una mezcla de suelo seco y agua, y,

una vez esté lista, se procede a compactarla con un martillo mediante 5 capas de 55 golpes cada una hasta llegar a la altura máxima del molde (116 mm). Este proceso se repite un mínimo de 3 veces con diferentes porcentajes de agua en la mezcla con el fin de generar una gráfica como se muestra en la Figura 1.

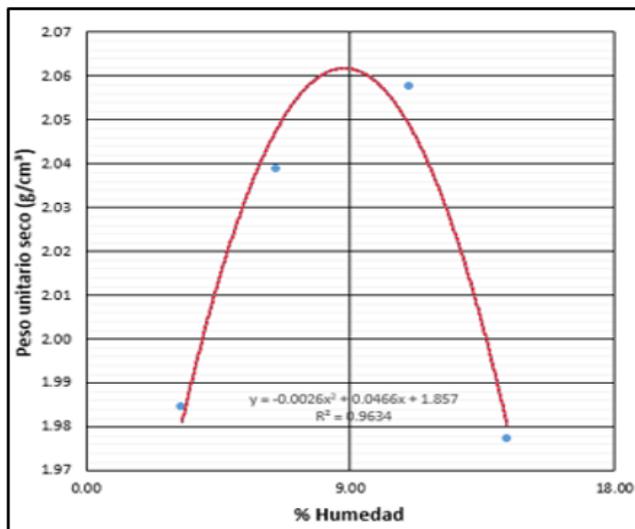


Figura 1. Curva de compactación.

La determinación de la densidad y la humedad del suelo en el terreno se llevó a cabo teniendo en cuenta lo estipulado en la norma INV E 161 – 13 (método del cono y arena) [2]. Los elementos utilizados para ensayos de cono y arena se pueden observar en la Figura 2 y Figura 3. El objetivo de este ensayo es realizar la comparación entre el peso unitario de una arena (calibrada) previamente seleccionada (arena de Ottawa) y la densidad máxima seca del suelo extraído (ver Figura 3). Al suelo extraído se le determina, contenido de agua respecto al peso seco del suelo, por medio de un dispositivo para tal fin conocido como humidómetro.



Figura 2. Excavación.



Figura 3. Suelo extraído y cono y arena.

En contraste con el método del cono de arena, la compañía DYNATEST con sede en Dinamarca desarrolló e implementó el uso del deflectómetro de impacto liviano (LWD) para el control de calidad de las estructuras que componen un pavimento (base, subbase y subrasante) [8] con base a la norma AASHTO TP-456-2017 [9] incluso para nuevas técnicas de pavimentación [15]. Este equipo tiene como principio de funcionamiento la caída de una masa 10Kg sobre unas gomas, las cuales transmiten la energía a un plato metálico de 300 mm de diámetro, el cual se encuentra en contacto con el suelo; la caída de la masa produce un pulso de carga; con la información del pulso de carga se determinan los esfuerzos y deflexiones del suelo, y así, se calcula el módulo de deformación unitaria (E) usando la solución elástica lineal, que en otras palabras y para efecto de esta investigación se le denominará módulo de superficie [3].

Este equipo está compuesto por tres partes principales: (a) Una base de placa metálica con sensores (geófonos); (b) sistema de adquisición de datos (pulso de carga), gomas amortiguadoras de constante elástica definida y una barra guía y (c) aplicaciones para toma de datos y procesamiento de las señales [3], ver Figura 4.

La profundidad de influencia de la caída de la masa es de hasta 300 mm dependiendo de los materiales a ensayar, y su influencia decrece a medida que el módulo elástico de la capa evaluada aumenta [4].

Para realizar el control de calidad de los rellenos por medio del ensayo del LWD se debe determinar el módulo elástico de superficie en laboratorio (E_{Field}) y el módulo de superficie de campo (E_{Lab}). Si la relación de E_{Field}/E_{Lab} es mayor a uno, se concluye que la capa evaluada es aceptada, en caso contrario, ésta será rechazada.

Para determinar el módulo de superficie de laboratorio se empleó la ecuación 1:

$$E_{Lab} = \left(1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu}\right) * \left(\frac{4H}{\pi D^2}\right) * K_i \quad (1)$$

E_{Lab} : Módulo de superficie de laboratorio (Mpa)
 K_i : Rigidez del suelo (N/mm)
 ν : Coeficiente de Poisson
 H : Altura del molde usado (mm)
 D : Diámetro de la placa de carga del LWD (mm)

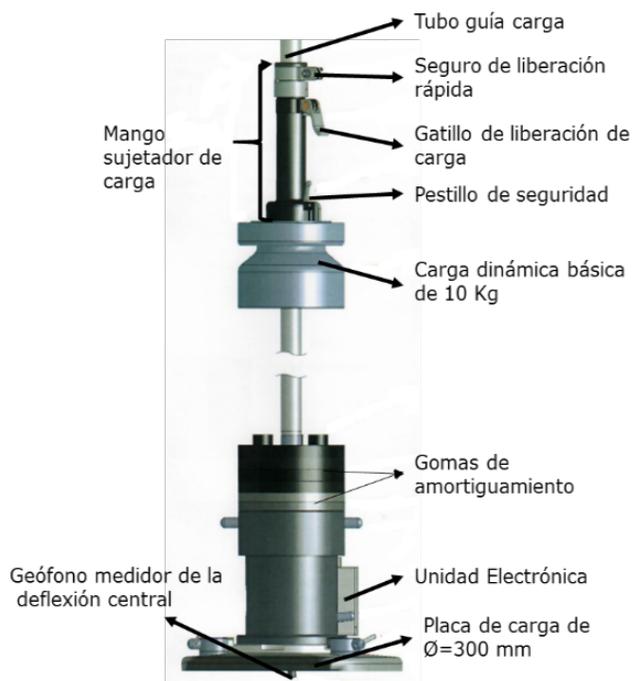


Figura 4. Deflectómetro de Impacto Liviano (LWD). Fuente. [8].

La ecuación 2 permitió determinar el módulo de superficie de campo se empleó la siguiente ecuación (2):

$$E_{Field} = \frac{2k_i(1 - \nu^2)}{Ar_0} \quad (2)$$

E_{Field} : Módulo de superficie de campo (Mpa)
 K_i : Rigidez del suelo (N/mm)
 ν : Coeficiente de Poisson
 A : Factor de distribución de esfuerzos
 r_0 : Radio de la placa de carga (mm)

Para validar los resultados de los ensayos de LWD, se puede utilizar los análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) que hoy en día son empleados para determinar la rigidez del suelo mediante la propagación de ondas sísmicas superficiales (Rayleigh) donde dicha rigidez se asocia a las deformaciones que son determinadas con el ensayo de LWD. El ensayo consiste en un arreglo geométrico de 24 geófonos de 4.5 Hz de frecuencias, los cuales son enlazados

a un cable sísmico, y este a su vez, a un sismógrafo de 24 canales. Para la toma de la información se emplea un maso que golpea una platina ubicada en el suelo con el fin de generar las ondas que luego son grabadas con la ayuda de un sismógrafo [10]. Finalmente, las señales obtenidas son tratadas y posteriormente procesadas para obtener una tomografía 2D que muestra la distribución de velocidades de ondas de corte a través del perfil de suelo a lo largo del arreglo geométrico mencionado.

Para hacer uso de los ensayos de ondas superficiales (MASW) la norma técnica colombiana sismo resistente (NSR-10) en el capítulo A (Tabla A.2.4.-1), se establecen límites para clasificar el tipo de suelo: Perfil de suelos Tipo C, suelos muy densos con velocidades de onda $360 \text{ m/s} \leq V_s \leq 760 \text{ m/s}$, Perfil Tipo D, suelos rígidos con velocidades de onda $180 \text{ m/s} \leq V_s \leq 360 \text{ m/s}$ y perfil de suelo Tipo E ($V_s \leq 180 \text{ m/s}$), suelos considerados como de baja rigidez, propensos a deslizarse o generar asentamientos importantes bajo cargas estáticas y sísmicas [11].

3. Metodología

La presente investigación fue desarrollada en cuatro etapas: 1. Determinación de la humedad óptima y densidad máxima seca de los suelos empleados para el relleno, por medio del ensayo de proctor modificado. 2. Determinación de módulo elástico de superficie (E_{Lab}) en laboratorio por medio del ensayo de proctor modificado y el LWD. 3. Pruebas de densidad de cono y arena en campo. 4. Determinación del Módulo de Superficie de campo (E_{Field}) con el Deflectómetro de impacto Liviano (LWD).

Los materiales seleccionados para realizar las pruebas tanto en campo como en laboratorio fueron los siguientes: un material residual limo arenoso con presencia de bloques de roca (Material A) y un suelo limo arenoso de procedencia aluvial (Material B) sin la presencia de fragmentos de roca.

Las relaciones empleadas en la mezcla de suelo/agua para determinar la densidad seca y la humedad óptima se muestran a continuación:

Tabla 1. Relaciones de agua/suelo.

Tipo de relación	Distinción	
	Material A	Material B
Agua/Suelo	4.33%	4.17%
	7.67%	9.17%
	11.00%	13.33%
	12.67%	16.67%

3.1 Determinación de la densidad máxima seca y humedad óptima del suelo

Una vez elaboradas las mezclas y con base a la norma INVE 142-13, se realizó un control exhaustivo en la compactación del suelo dentro del molde metálico empleado para el ensayo de Proctor Modificado. Para determinar la densidad máxima

seca y la humedad óptima, se tomaron muestras de suelo ya compactadas; las cuales se llevaron a un horno eléctrico para conocer el contenido de humedad presente en cada una de ellas (INV E 122 – 13) [12]. Obtenidos los resultados, se procede a realizar una gráfica de Peso Unitario Seco Vs %Humedad, con el fin de determinar el valor máximo de contenido de agua que soporta el suelo para obtener la máxima compactación que este puede desarrollar.

3.2 Determinación del módulo de superficie en laboratorio

La adquisición de datos con el equipo LWD se realizaron en cada una de las mezclas compactadas dentro del molde de 6" (Tabla 1), a diferentes alturas de caída de la carga, 1", 2", 3", 4", 5" y 7" pulgadas de caída, como se muestra en la siguiente Figura 5.

Para cada mezcla de suelo según las relaciones de humedad definidas se determinaron los módulos de superficie de laboratorio a diferentes alturas de caída de la carga, y así, realizar la gráfica E_{Lab} Vs %Humedad. Establecido el valor óptimo de humedad para cada tipo de material y la gráfica E_{Lab} Vs %Humedad se determinó el módulo de superficie objetivo a obtener en campo.



Figura 5. Ensayo de LWD en molde de 6".

3.3 Medidas de cono y arena y LWD en campo.

Los ensayos del método de cono y arena y LWD se ejecutaron en el mismo sitio de exploración para validar los resultados obtenidos entre estos dos ensayos.

La determinación de la densidad del suelo en el terreno se realizó a través del método del cono y arena (norma INV

E 161 – 13) [2], mientras que la toma de datos con el equipo LWD se realizaron con un plato de 150 mm y 300 mm y a diferentes alturas de caída, 5"-10" y 10"-15" respectivamente (ver Figura 6). Finalmente, para tener un control de la humedad del suelo en campo se empleó el humidómetro.



Figura 6. Ensayo de LWD y cono y arena en campo.

3.4 Ensayo de MASW

El ensayo sísmico de ondas superficiales (MASW) se realizó sobre el material A, con la finalidad de comparar el resultado de este ensayo con los resultados obtenidos mediante los ensayos de cono y arena y el equipo LWD.

4. Resultados

En la Figura 7, y Tabla 2 se detallan los resultados del ensayo de Proctor modificado y las propiedades para los dos materiales ensayados, concluyendo que el material A tiene mayor contenido de material granular y menor contenido de agua, por lo tanto, la densidad máxima seca del material A es mayor que la del material B.

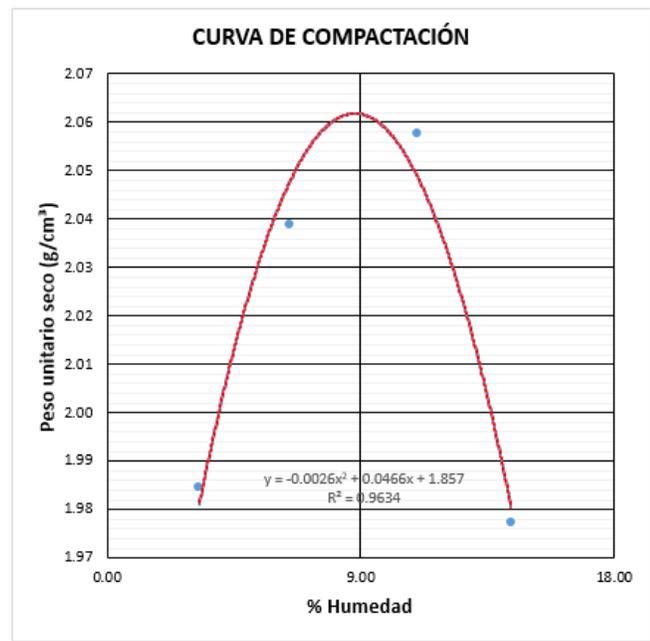
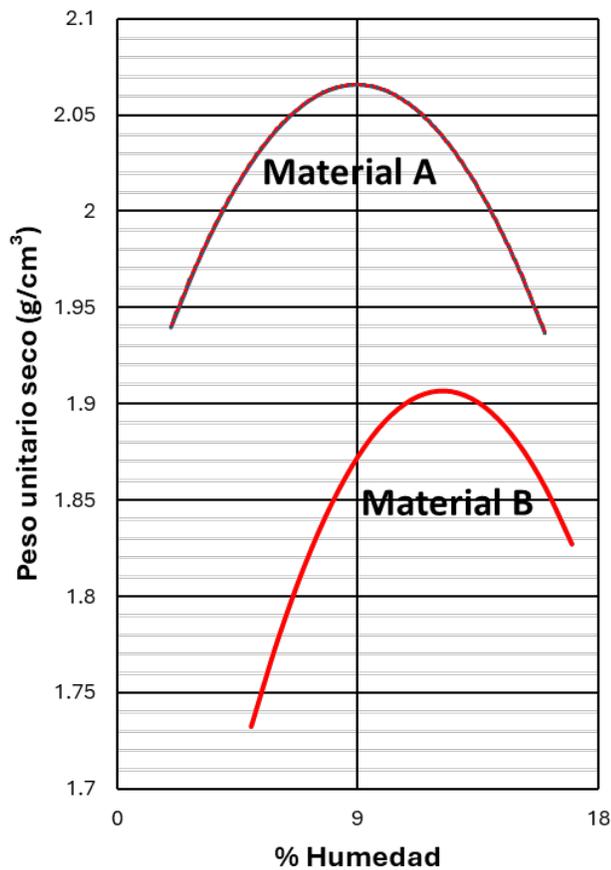


Figura 7. Curva de compactación Material A y B.

Los módulos de laboratorio obtenidos fueron los siguientes, Material A, E_{Lab}: 65 MpPa y para el material B, el E_{Lab}: 75 MpPa. (Ver Figura 8 y Figura 9). Para cada uno de los materiales, fue necesario ajustar los módulos de

laboratorio determinados debido a que en campo se evidenció que los suelos empleados para la compactación mostraron mayores contenidos granulares (partículas con tamaño mayores a 3/4" de diámetro) que los determinados mediante el ensayo de Proctor modificado. El recalcu realizado conllevó a obtener un módulo E_{Lab} para el material A y B de 80 MpPa y 100 MpPa respectivamente.

Tabla 2. Propiedades obtenidas de los materiales.

Propiedades del material		
	Material A	Material B
Húmedad óptima (%)	8.96	12.16
Densidad Máxima (g/cm ³)	2.02	1.9
Límite Líquido (LL)	18.01%	22.05%
Límite Plástico (LP)	8.10%	9.15%
% de Finos	48.06	59.06
% de Gruesos	51.94	40.94
Clasificación del material	SM	ML

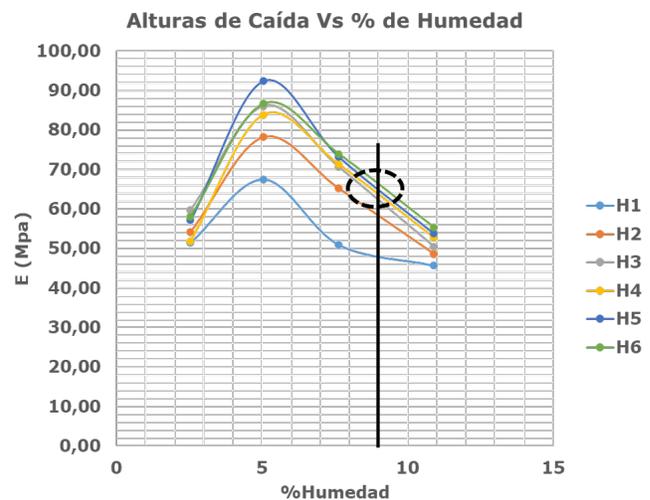


Figura 8. Curva E_{Lab} Vs %Humedad Material A.

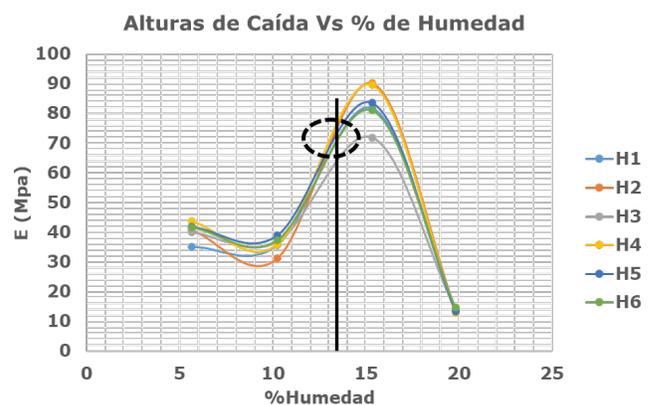


Figura 9. Curva E_{Lab} Vs %Humedad Material B.

La toma de datos en campo en el equipo LWD se realizaron con el plato de 150 mm y 300 mm, y a diferentes alturas, 10" y 15" respectivamente, como se evidencia en la Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 3. Resultados del ensayo LWD en campo para el Material A.

Tipo de Material	Punto	Efield (MPa)	%Alcan	Diámetro Plato(mm)
A	1	50.21	62.76	300
		48.18	60.23	150
	2	56.70	70.88	300
		77.95	97.44	150
	3	91.92	114.9	300
		85.32	106.65	150
	4	87.00	108.75	300
		86.42	108.03	150
	5	81.80	102.25	300
		91.02	113.78	150
	6	54.84	68.55	300
		68.32	85.40	150
	7	31.20	39.00	300
		32.15	40.19	150

Nota: %Alcan, se refiere al grado de compactación alcanzado, como una relación entre la densidad medida en campo y la densidad seca máxima obtenida del ensayo Proctor modificado.

Tabla 4. Resultados de ensayo de cono y arena para el material A.

Tipo de Material	Punto	ρ_{max} (g/cm ³)	%Alcan	%Humedad
A	1	1.63	80.69	13.6
	2	1.79	88.61	10.8
	3	1.84	91.09	7.3
	4	1.90	94.06	10.8
	5	1.85	91.58	9.3
	6	1.90	94.06	8.9
	7	1.72	85.15	9.4

El material B fue evaluado en un relleno ubicado sobre el mismo sector del material A; adicionalmente, se tomaron solo 5 puntos para el control de calidad tanto con el ensayo de cono y arena y el equipo LWD., resultados que se muestran en las Tablas 5 y 6.

Tabla 5. Resultados del ensayo LWD en campo para el Material B.

Tipo de Material	Punto	Efield (MPa)	%Alcan	Diámetro Plato(mm)
B	1	132.3	132.3	300
		108.1	108.1	150
	2	154.0	154.0	300
		147.0	147.0	150
	3	131.3	131.3	300
		136.3	136.3	150
	4	89.0	89.0	300
		86.0	86.0	150
	5	83.0	83.0	300
		92.0	92.0	150

Tabla 6. Resultados de ensayo de cono y arena para el material B.

Tipo de Material	Punto	ρ_{max} (g/cm ³)	%Alcan	%Humedad
B	1	1.76	92.63	8.5
	2	1.86	97.89	9.7
	3	1.77	93.16	12.2
	4	1.61	84.74	13.7
	5	1.62	85.26	16.05

Las Tabla 7 y Tabla 8 y Figura 10. muestran los resultados de los ensayos de cono y arena, LWD y ensayo de ondas superficiales (MASW-2D) para el material A

Tabla 7. Resultados del ensayo LWD en campo para el Material A.

Propiedades del material	Punto	Efield (Mpa)	%Alcan	Diámetro Plato(mm)
A	1	55.89	69.86	300
		29.44	36.8	150
	2	67.46	84.32	300
		30.84	38.55	150

Tabla 8. Resultados de ensayo de cono y arena para el material A.

Tipo de Material	Punto	ρ_{max} (g/cm ³)	%Alcan	%Humedad
A	1	1.88	93.07	12.25
	2	2.00	99.11	14.00

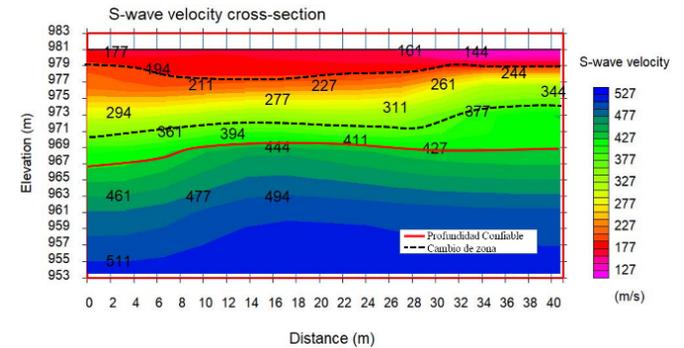


Figura 10. Ensayo de ondas superficiales (MASW 2D) Material A.

5. Discusión

Los resultados obtenidos con el equipo LWD para los dos materiales utilizados para la construcción del relleno permiten identificar que: el equipo genera esfuerzos con una profundidad de influencia diferente para cada plato, es decir, el plato de 150 mm proporciona esfuerzos más someros que el plato de 300 mm [4], por consiguiente y como se detalla en la Tabla 3 y Tabla 5, todos los valores de los módulos de superficie de campo son diferentes para cada plato. La diferencia en los valores de los módulos (EField) en un sólo punto indica que, si el módulo obtenido con el plato de 150 mm es mayor que el determinado con el plato de 300 mm, la capa tiene mejor compactación a nivel superficial, pero disminuye en profundidad; por otro lado, si el valor del módulo obtenido es mayor con el plato de 300 mm, se

interpreta que la capa está bien compactada en términos generales, sin embargo se espera que a nivel superficial haya una reducción en la calidad del relleno.

Según el estudio desarrollado por Charles Shwartz. et al [7], los módulos de superficie obtenidos con el equipo LWD tanto en el laboratorio como en campo, están influenciados por dos variables, la granulometría y la humedad presente cuando se realiza las pruebas con el equipo. Para el material A, específicamente los puntos 1 y 2 y para el material B, los puntos 4 y 5, el contenido de humedad determinado en campo es superior de acuerdo con el Instituto Mexicano del Transporte ($W_o - 3\% \leq W_{\text{campo}} \leq W_o + 2\%$) [13], es decir, las capas que vayan a ser ensayadas con el equipo LWD y posean un valor de contenido de humedad fuera del rango posiblemente no cumplan con las exigencias en el control de calidad del relleno. Con base a lo explicado anteriormente, se evidencia que los puntos evaluados tienen un valor de módulo (E_{Field}) inferior al exigido ($< 100\%$) y confirma que las capas ensayadas tienen un porcentaje alcanzado de la densidad en campo menor al 90%, demostrado la gran influencia del contenido de humedad en la compactación de los materiales.

Durante la fase de toma de pruebas en campo, se observó que el material A contenía partículas mayores a $\frac{3}{4}$ " proporcionando un incumplimiento con lo estipulado en la norma INV E 142 – 13, ensayo de Proctor modificado. Teniendo en cuenta lo acotado anteriormente, los puntos 6 y 7 del material A mostraron un contenido de humedad dentro del rango (establecido arriba), sin embargo, como se evidenció en campo, el exceso de bloques de roca no genera implícitamente buena compactación del relleno, motivo por el cual, el punto 6 a pesar mostrar un porcentaje de densidad en campo mayor al 90%. Este mismo punto evaluado con el equipo LWD no cumple con los requerimientos de calidad ($E_{\text{Field}}/E_{\text{Lab}} > 1$).

Los ensayos de ondas superficiales (MASW) son una herramienta útil para evaluar las propiedades del suelo, entre ellas la rigidez del terreno. La Figura 11 muestra el resultado de un ensayo de MASW 2D para el material A y la interpretación de ésta indica que el suelo es de baja rigidez, es decir, que el control en la compactación del relleno no fue la correcta, a pesar de que los ensayos de cono y arena mostraron que el relleno cumplía con el porcentaje de compactación exigido (ver Tabla 8). Es importante hacer la salvedad que al procesar los datos del ensayo MASW se tiene un intervalo, en profundidad de mejor resolución, y, usualmente, los primeros cm, no tienen una adecuada resolución, aún cuando se utilice una distancia entre geófonos mínima. No obstante si es posible establecer grado de homogeneidad de la capa, según los valores de velocidad obtenidos. Cabe anotar, que en dicho sitio los ensayos realizados con el equipo LWD mostraron que el suelo compactado no cumple con los

requisitos de calidad, debido al exceso de humedad presente en el suelo empleado para el terraplén. Tomando como referencia lo acotado en la norma NSR 10, aquellos suelos que posean una velocidad inferior a 180 m/s son susceptibles a deslizarse o presentar asentamientos bajo cargas estáticas o dinámicas (sismos), lo cual se confirma en los datos 1, 2, 6 y 7 de la Tabla 3.

Finalmente, los dos materiales ensayados en los puntos 3, 4 y 5 (material A) y 1, 2 y 3 (material B) a través de las dos metodologías empleadas muestran que existe coherencia entre los resultados obtenidos, infiriendo que la capa analizada cumple con los estándares de calidad exigidos, tanto por el ensayo de cono y arena como con el equipo LWD.

6. Conclusiones

En las normas empleadas para el desarrollo de este artículo indican que el plato a emplear en campo sea el de 300 mm, puesto que realiza mayor distribución de esfuerzo en el suelo, por lo tanto, se recomienda que, para capas menores a 15 cm, emplear el equipo LWD con un plato de 300 mm con una caída de la masa a baja altura, con el fin de evitar registrar información por debajo de esta capa.

La ejecución de ensayos con el equipo LWD es una alternativa viable para controlar la compactación de un relleno principalmente cuando no se tiene un control eficiente de la humedad y la granulometría, contrario a lo que sucede con el ensayo del cono de arena. Al fin al cabo un terraplén con bajas deformaciones es quien define la calidad de este.

Se concluye que el equipo LWD muestra mayor versatilidad mayor versatilidad, rapidez y confiabilidad comparado con el ensayo del cono de arena en la toma de pruebas en campo comparado con el ensayo de cono y arena, garantizando mayor cobertura en el control de calidad de un relleno y optimización en los tiempos de ejecución de los ensayos que se emplean para evaluar la calidad de un relleno.

A pesar de ser un equipo diseñado para el control de calidad de la estructura de un pavimento y tener poca aplicabilidad en Colombia, el equipo LWD puede prestar grandes servicios en el mundo de la geotecnia como es la verificación del nivel de suelo de fundación recomendado cuando en un estudio de suelos se recomienda una capacidad admisible del suelo mediante el control de los asentamientos en un modelo de elementos finitos.

Un control de compactación con cono y arena no siempre es un indicativo de calidad del terraplén convirtiéndolo en un sistema obsoleto y en especial para estructuras diferentes a las de una vía.

7. Referencias

- [1] INVIAS, editor. Determinación de la densidad y del contenido de agua del suelos y suelo-agregado en el terreno empleando medidores nucleares (INV-E-164). Instituto Nacional de Vías, 2013.
- [2] INVIAS, editor. Densidad y peso unitario del suelo en el terreno por el método de cono y arena (INV-E-161). Instituto Nacional de Vías, 2013
- [3] E. C. Salamanca (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. [online]. Available: <http://hdl.handle.net/10554/47174>.
- [4] Osorio, A. (2008). Metodología de evaluación In-Situ de la capacidad de soporte de bases y subbases granulares de pavimentos flexibles con el deflectómetro de impacto liviano. Santiago de Chile, Chile. [online] Available: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/1435>.
- [5] Kavussi, A., Qorbaninik, M., Hassani, A (2019, June). The Influence of Moisture content and Compaction level on LWD Modulus of Unbound Granular Base Layers. El Sevier. [online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100252>.
- [6] INVAS, editor . Relaciones de humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo Modificado de Compactación). (INV-E-142). Instituto Nacional de Vías, 2013
- [7] Schwartz, C., Afsharikia, Z., Khosravifar. Standardizing lightweight deflectometer modulus measurements for compaction quality assurance. University of Maryland College Park, USA, 2017.
- [8] Dynatest. (2020). User Manual of Dynatest 3032 LWD (Light Weight Deflectometer). Dynatest A/S Denmark. [online] Available: <https://f.hubspotusercontent10.net/hubfs/19512362/1110300%20LWD%203032%20User%20Manual%201.0.6b.pdf>.
- [9] AASHTO-TP456-01, editor. Compaction Quality Control Using Light Weight Deflectometer (LWD), 2017
- [10] Hayashi, K., Suzuki, H. (2004). CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data. Vol. 57-No.1. Ibaraki, Japan. [online] Available: https://www.geometrics.com/wp-content/uploads/2018/10/Hayashi_CMPXCorrelation.pdf.
- [11] NSR-10. (2010). Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente, Título A. Pág. 22. Bogotá, Colombia. [online] Available: <https://www.scg.org.co/Titulo-A-NSR-10-Decreto%20Final-2010-01-13.pdf>.
- [12] INVAS, editor (2013). Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelos-agregado. (INV-E-122). Instituto Nacional de Vías.
- [13] Instituto Mexicano del Transporte. (2020). Grado de compactación con deflectómetro de impacto liviano. (M•MMP•1•16/20). [online] Available: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-16-20.pdf>.
- [14] O. A. Cuanalo-Campos, R. Ayala-Aranda, y L. J. Quintero-Lemus, “Diseño geotécnico y dinámico de la cimentación para una máquina laminadora de mármol en la ciudad de Puebla, México”, *Revista Ingenio*, vol. 21, n.º 1, pp. 1–8, 2024. Doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.3588>
- [15] M. Gómez-Galván, R. Gallardo-Amaya, y A. A. Macgregor-Torrado, “Pavimentación con asfalto natural “MAPIA”. Estudio de caso: Proyecto mejoramiento de la vía El Diviso – Torcoroma del municipio de San Martín, Cesar”, *Revista Ingenio*, vol. 16, n.º 1, pp. 10–15, 2019. Doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2334>