

## BOLETÍN TÉCNICO DGST No. 2/2021

# Uso del Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) en el control de compactación en campo

La compactación de las diferentes capas que constituyen el cuerpo de un camino se da bajo condiciones no saturadas que coadyuvan en su comportamiento. Las normas actuales exigen que esta compactación alcance un porcentaje de la Masa Volumétrica Seca Máxima ( $\gamma_d \text{ max}$ ) del suelo, según la capa: terreno natural, terraplén, subyacente, subrasante, subbase o base.

Los métodos convencionales utilizados para el seguimiento y control de calidad de la compactación están basados en la densidad. Este parámetro es una propiedad relativamente fácil de medir en campo y se correlaciona libremente con más propiedades como la permeabilidad, el Valor Soporte de California (CBR), Módulo Elástico, entre otros.

Actualmente, el Módulo de Elasticidad es el parámetro fundamental para el diseño estructural de tipo mecanicista. Asimismo, la adopción del concepto *módulo* ha tenido más aceptación dentro del mundo de los pavimentos, tanto flexibles como rígidos, tal es el caso de su correlación con la compactación para el control en campo, mediante el uso del Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD, por sus siglas en inglés, *Light Weight Deflectometer*), que ha tomado auge como una alternativa innovadora de los métodos convencionales que consumen mayor tiempo en la verificación de este parámetro.

El equipo LWD es un dispositivo portátil que puede medir el porcentaje de compactación en campo a través de la medición del módulo de rigidez de superficie ( $E_{LWD_{campo}}$ ) obtenido directamente de la capa compactada con respecto al módulo de rigidez objetivo ( $E_{LWD_{obj}}$ ) obtenido en el laboratorio.

Este equipo se dio a conocer en el año 1981, en Magdeburgo, Alemania, siendo desarrollado como un dispositivo para evaluación *in situ* por el *Federal Highway Research Institute* y la *HMP Company* en Alemania.

El equipo LWD ha ganado aceptación y popularidad en varios países, como Estados Unidos, ya que existe un interés creciente en su uso como dispositivo de pruebas *in situ* para el control de la compactación en campo. Este dispositivo también se conoce con otros nombres: *Light Falling Weight Deflectometer* (Deflectómetro de Impacto Ligero), *Light Drop Weight Tester* (Dispositivo de Ensaye de Impacto Ligero) y *Dynamic Plate Load Test* (Prueba de Placa de Carga Dinámica). Existen diferentes tipos de LWD, pero el principio de funcionamiento es el mismo.



## EQUIPO

El equipo LWD consta de un dispositivo guía con amortiguador, una masa generadora de impacto, un sistema de medición de carga y una placa de carga.

De acuerdo con su sistema de medición, los equipos LWD se clasifican en dos grupos; el primer grupo, emplea una celda de carga para realizar la medición de la fuerza en cada impacto; en el segundo grupo, el equipo no emplea una celda de carga porque la fuerza de impacto está considerada como un valor constante.

El equipo LWD que funciona con una celda de carga está regulado internacionalmente por la norma *ASTM E2583-07 (2015), Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)*, mientras que el grupo que no cuenta con una celda de carga se regula con la norma *ASTM E 2835-11 (2015), Standard Test Method for Measuring Deflections using a Portable Impulse Plate Load Test Device*.



Los equipos con celda de carga cumplen con los requisitos de la norma ASTM E 2583-07 (2015), los cuales se indican a continuación:

- Operan en un rango de temperaturas de 10°C a 50°C, resistentes a la exposición de humedad relativa alta, lluvia y brisa, y otras condiciones adversas como el polvo, golpes y vibraciones tenues.
- Cuentan con una masa que se desliza sobre un vástago guía en caída libre y que, al hacer contacto con el sistema de amortiguamiento, aplica una fuerza de impacto provocando una energía que se trasmite a las capas del pavimento o terracerías generando una onda de tipo semisenoidal con una amplitud de pico de 50 kN, dando como resultado la deflexión del suelo en mm. La duración del impacto de la fuerza está entre 20 y 40 ms. La placa es capaz de distribuir uniformemente la carga sobre la superficie de contacto; asimismo, permite que la medición de la deflexión en el pavimento se realice en el orificio del centro de la placa de carga en el punto de impacto.
- Una celda de carga para medir la fuerza de impacto aplicada que debe estar colocada de tal forma que no restrinja la obtención de las deflexiones bajo la placa de carga.
- Los sensores del equipo para medir las deflexiones pueden ser de varios tipos dependiendo de la marca del equipo: transductores de desplazamiento, de velocidad o de aceleración.
- Cuentan con un sistema de procesamiento de datos, donde se muestran en tiempo real y se guardan de forma automática o manual, junto con los datos de temperatura del aire, temperatura de la superficie de la capa, coordenadas, etc.
- Los equipos tienen un tamaño y peso tal, que facilitan su transporte, como los mostrados en la Figura 1.

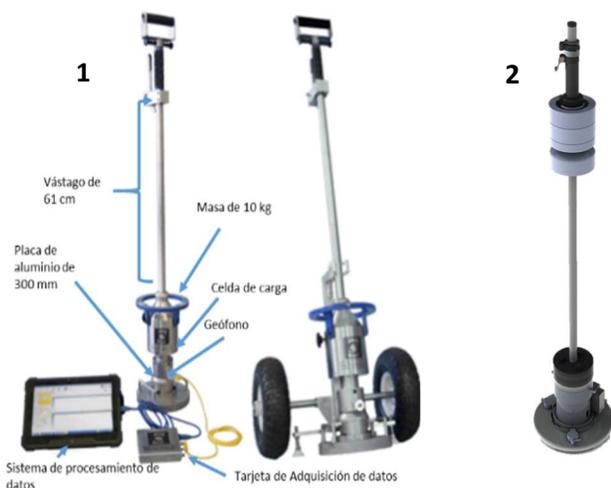


Figura 1. Equipos LWD con celda de carga integrada

Los equipos sin celda de carga cumplen con los requisitos de la norma ASTM E 2835-11 (2015), que se indican a continuación:

- Operan en un rango de temperaturas de 0°C a 50°C, resistentes a la exposición de humedad relativa alta, lluvia y brisa, y otras condiciones adversas como el polvo, golpes y vibraciones tenues.
- Cuentan con una masa que se desliza sobre un vástago guía a una altura fija preestablecida que impacta sobre un sistema de amortiguación. Además, los equipos están diseñados para operar con una fricción y resistencia despreciables.
- Una fuerza de impacto que produce una onda tipo semisenoidal en un intervalo de tiempo entre 10 y 30 ms.
- La placa de carga debe ser rígida y capaz de transferir el impacto hacia la superficie del suelo. La distribución de esfuerzos depende tanto de la placa de carga como de la rigidez y tipo de suelo.
- Los sensores del equipo para medir las deflexiones están colocados de tal forma para minimizar la rotación angular con respecto de su medición en el plano a la máxima deflexión esperada. Los sensores pueden ser de dos tipos dependiendo de la marca del equipo, tales como transductores de velocidad o de aceleración.
- Cuentan con un sistema de procesamiento de datos que despliega los resultados y el guardado de los datos de deflexión es opcional.
- Los equipos tienen un tamaño y peso tal, que facilitan su transporte, como los mostrados en la iError! No se encuentra el origen de la referencia..

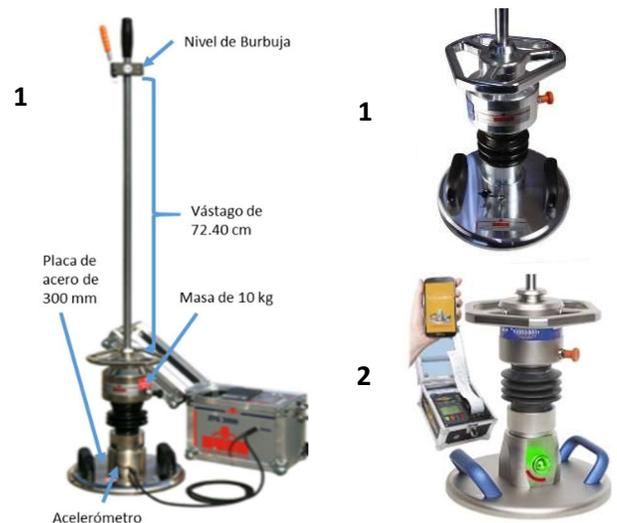


Figura 2. Equipos LWD con acelerómetro, sin celda de carga

## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO LWD

El funcionamiento básico del equipo LWD se lleva a cabo mediante el principio de caída libre y rebote de una masa sobre un sistema de amortiguamiento. El amortiguador se conecta a la placa, que a su vez está en contacto con el suelo. Una vez que la masa cae sobre el amortiguador, el equipo LWD y el suelo se desplazan juntos en modo acoplado. El sistema LWD-suelo es un sistema con dos grados de libertad. Durante la carga y el rebote y hasta el momento en que la fuerza de impacto se vuelve cero, el sistema se desacopla, tal como se muestra en la Figura 3a.

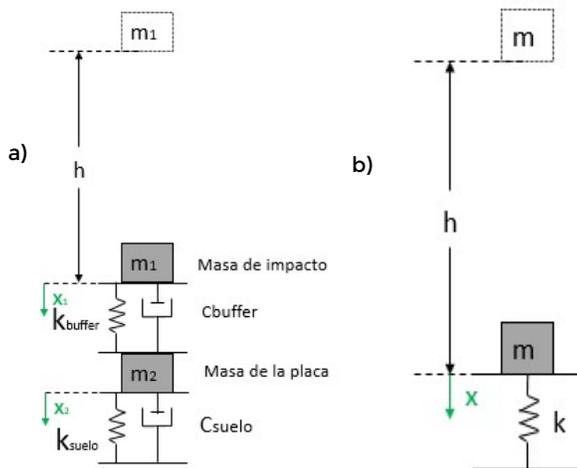


Figura 1. Esquema de funcionamiento de los equipos LWD: a) sin celda de carga y b) con celda de carga.

El sensor de velocidad (geófono) o acelerómetro registra la velocidad o aceleración de los movimientos de la placa de carga o suelo, dependiendo de la posición del sensor. La posición y tipo de sensor de deflexión es diferente entre los equipos LWD. Una vez finalizada la prueba, el desplazamiento máximo se calcula mediante la doble integración de las aceleraciones o la primera integración de las velocidades, según corresponda. El historial de fuerza y la fuerza máxima se miden mediante una celda de carga o en el caso de equipos sin celda de carga, se considera como una constante. Algunos tipos de LWD también proporcionan geófonos adicionales para medir la deflexión de la superficie con una mayor profundidad.

Para el caso de equipos como los mostrados en la **iError! No se encuentra el origen de la referencia.,**

que no cuentan con una celda de carga, se considera una fuerza de impacto de 7.07 kN (7 070 N) desde una altura de caída máxima (724 mm). Para alturas de caída diferentes de la máxima, ésta se puede calcular basándose en un modelo mecánico de un grado de libertad como el que se muestra en la Figura 3b, empleando las ecuaciones siguientes:

$$E = mgh = \frac{1}{2} k \cdot \Delta x^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

$E =$  Energía Potencial  
 $m =$  Masa de impacto  
 $g =$  Gravedad  
 $h =$  altura de caída  
 $k =$  rigidez  
 $\Delta x =$  Deflexión

$$F = k\Delta x \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde:

$F =$  Fuerza de impacto  
 $k =$  rigidez  
 $\Delta x =$  Deflexión

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

$P =$  Presión de contacto  
 $F =$  Fuerza de impacto  
 $A =$  Área de contacto

Por lo que:

$$F = \sqrt{2mghk} \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde:

$F =$  Fuerza de impacto  
 $m =$  Masa de impacto  
 $g =$  Gravedad  
 $h =$  altura de caída  
 $k =$  rigidez

Si se requiere obtener una altura para un diámetro de placa diferente, se deberá realizar una igualdad entre la relación de la fuerza y el área correspondiente de cada placa:

$$P = \frac{F}{A1} = \frac{F}{A2}$$

$$P = \frac{\sqrt{2mgh_1k}}{A1} = \frac{\sqrt{2mgh_2k}}{A2}$$

$$\frac{A1}{A2} = \frac{\sqrt{2mgh_1k}}{\sqrt{2mgh_2k}}$$



$$\left(\frac{A1}{A2}\right)^2 = \frac{2mg h_1 k}{2mg h_2 k}$$

$$\left(\frac{A1}{A2}\right)^2 = \frac{h_1}{h_2}$$

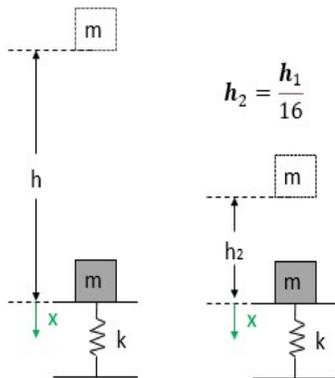
$$A = \pi \frac{D^2}{4}$$

$$D_{1campo} = 2D_{2Lab}$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{\pi \frac{D_1^2}{4}}{\pi \frac{D_2^2}{4}}\right)^2 = \left(\frac{D_1^2}{D_2^2}\right)^2 = \left(\frac{2^2 D_2^2}{D_2^2}\right)^2 = (2^2)^2 = 16$$

$$h_2 = \frac{h_1}{16} \quad \text{Ecuación 5}$$

Una vez calculada la altura de acuerdo con las áreas de cada una de las placas de carga (para laboratorio o para campo), se calcula la fuerza necesaria para obtener el mismo esfuerzo en cada placa.



$$F = \sqrt{2mghk}$$

$$\sqrt{2mgh_1 k} = \sqrt{2mgh_2 k}$$

$$\frac{F1}{F2} = \frac{\sqrt{2mgh_1 k}}{\sqrt{2mgh_2 k}} = \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_2}}$$

$$\frac{F1}{F2} = \sqrt{\frac{h_1}{h_2}} = \sqrt{\frac{16h_2}{h_2}} = \sqrt{16} = 4$$

$$F2 = \frac{F1}{4} \quad \text{Ecuación 6}$$

Por lo anterior y para el caso de los equipos sin celda de carga, donde la fuerza aplicada desde una altura

máxima de caída probable de 724 mm es de 7,07 kN (7 070 N) con la placa de campo (D= 300 mm); la fuerza aplicada para el caso del uso en laboratorio con su respectiva placa (D= 150 mm) es de 1,7675 kN (1 767,5 N) a una altura de 45,25 mm.

### PROCEDIMIENTO PARA EL USO DEL EQUIPO LWD

Previo al inicio de la prueba, ya sea en el campo o en el laboratorio, es necesario asegurar que el equipo LWD cuente con su certificado de calibración vigente expedido por el fabricante y en el caso de México, como opción reciente, por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

### Obtención del Módulo de Rigidez Objetivo en Laboratorio ( $E_{LWDobj}$ )

La determinación del Módulo de Rigidez Objetivo en Laboratorio ( $E_{LWDobj}$ ) empleando el LWD se lleva a cabo elaborando, primero, los especímenes con la metodología establecida en el manual *M-MMP-1-09/06, Compactación AASHTO*, variante B o variante D.

Usar el equipo LWD en el laboratorio tomando en cuenta los incisos indicados a continuación:

- Preparar el equipo LWD con la placa de 150 mm de diámetro. En el caso de los equipos que no cuentan con una celda de carga, ajustar la altura como se indica en el apartado anterior.
- Colocar el equipo LWD con la placa de carga sobre el molde con el material compactado, inmediatamente después de finalizada la elaboración del primer espécimen de la prueba de compactación AASHTO, aplicando un movimiento oscilatorio, hacia adelante y hacia atrás a la placa de carga, aproximadamente de 45° para asentarla, sin hacer contacto con el borde del molde; es posible usar un collarín si los componentes del equipo lo permiten o bien cortando uno a la medida.

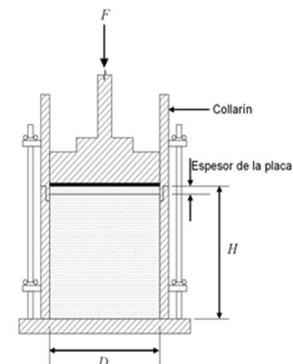


Figura 4. Equipo LWD sobre molde AASHTO con el collarín





- c) Aplicar 3 impactos sobre el espécimen como acondicionamiento y 3 más para obtener la deflexión. Registrar y exportar los valores obtenidos a una base de datos.
- d) Calcular el coeficiente de variación de las deflexiones en cada punto de prueba empleando la Ecuación 7.
- e)

$$C.V. = \frac{S}{\bar{x}} \times 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

En donde:

- C.V. = Coeficiente de variación, (%)
- S = Desviación Estándar.
- X = Medía aritmética de las mediciones.

Nota 1: Si el coeficiente de variación es mayor de 0.10, repetir la prueba a partir del inciso c).

Nota 2: Si el coeficiente de variación es menor de 0.10, continuar con los pasos siguientes.

- f) Obtener el valor de la rigidez k. Para los equipos que posean una celda de carga, este valor se calcula mediante el programa de procesamiento de datos del equipo, basado en la Ecuación 8. Para los equipos que no cuentan con una celda de carga será necesario calcularlo manualmente con la misma Ecuación 8.

$$k = \frac{F}{\delta} \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde:

- F = Fuerza promedio máxima de los 3 últimos impactos generados por el equipo LWD (constante para equipos sin celda de carga), (N).
- δ = Deformación promedio máxima, obtenida como producto de los 3 últimos impactos generados por el equipo LWD, (mm).

- g) Para obtener el valor del módulo de rigidez  $E_{LWD,Lab}$ , para los equipos que posean una celda de carga este valor, se calcula mediante el programa de procesamiento de datos del equipo basado en la Ecuación 9. Sin embargo, para los equipos que no cuentan con una celda de carga será necesario calcularlo manualmente con la misma Ecuación 9.

$$E_{LWD,Lab} = \left[ \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) \frac{4H}{\pi D^2} k \right] \quad \text{Ecuación 9}$$

En donde:

- $E_{LWD,Lab}$  = Módulo de rigidez de laboratorio obtenido del espécimen de suelo con el equipo LWD, (MPa).
- ν = Coeficiente de Poisson según el tipo de suelo, de acuerdo con la Tabla 1, (0-0.5).
- H = Altura del molde, (mm).
- D = Diámetro de la placa de carga, (mm).
- k = Rigidez del suelo, Ecuación 8, (N/mm)

TABLA 1. VALORES TÍPICOS DE COEFICIENTE DE POISSON DE UN SUELO.

Suelo	Rango de valores	Valor típico
Suelos granulares sin tratar	0.30 a 0.40	0.35
Suelos granulares tratados con cemento	0.10 a 0.20	0.15
Suelos finos tratados con cal	0.20 a 0.35	0.30
Suelos finos tratados con cemento	0.15 a 0.35	0.25
Limos estabilizados	0.10 a 0.25	0.20
Arena suelta o limosa	0.20 a 0.40	0.30
Arena densa	0.30 a 0.45	0.35
Arcillas saturadas	0.40 a 0.50	0.45
Limos	0.30 a 0.35	0.32
Arcillas no saturadas	0.10 a 0.30	0.20
Arcilla limosa	0.20 a 0.30	0.25
Arena de grano grueso	0.15	0.15
Arena de grano fino	0.25	0.25

- h) Graficar la curva de compactación del suelo, así como la del módulo de rigidez ( $E_{LWD,Lab}$ ) en función de su contenido de agua (Figura 5). Determinar el módulo de rigidez objetivo de laboratorio ( $E_{LWD,obj}$ ) de la gráfica de la Figura 5 a partir del contenido óptimo de agua y de la masa volumétrica seca máxima, trazando una línea que pase por estos dos puntos hasta interceptar con la curva del módulo de rigidez y a partir de éste, trazar una línea horizontal que intercepte el eje de módulo de rigidez, en este punto se localiza el **Módulo de Rigidez Objetivo de Laboratorio** ( $E_{LWD,obj}$ ) correspondiente a la Masa Volumétrica Seca Máxima y su contenido de agua óptimo.

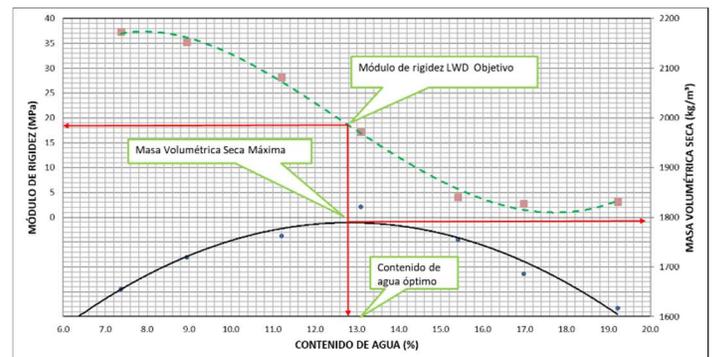


Figura 5. Gráfica para obtener el módulo de rigidez objetivo ( $E_{LWD,obj}$ ) mediante la curva de compactación AASHTO

### Obtención del Módulo de Rigidez de Superficie LWD en campo ( $E_{LWD,campo}$ )

Utilizar el mismo equipo empleado para determinar el módulo de rigidez objetivo en laboratorio  $E_{LWD,obj}$  sustituyendo la placa de carga de 150 mm por la de 300 mm u otra, considerado los incisos siguientes:

- a) Se recomienda determinar los lugares de sondeo de acuerdo con lo establecido en la norma *M-CAL-1-02/01. Criterios Estadísticos de Muestreo*.
- b) Preparar el equipo LWD con la placa de 300 mm de diámetro u otra. Para el caso de los equipos que no cuentan con una celda de carga, seguir las recomendaciones de uso del fabricante.
- c) Colocar el equipo LWD sobre el punto de sondeo determinado de acuerdo con el criterio estadístico indicado en la norma *M-CAL-1-02/01, Criterios Estadísticos de Muestreo*. La superficie de prueba deberá estar limpia, uniforme y sin partículas granulares sueltas tanto como sea posible. Si la superficie de prueba corresponde a una capa de base o subbase compuesta por material granular con una superficie irregular, se recomienda colocar una capa delgada de arena fina para nivelar y lograr un contacto uniforme entre la placa de carga del equipo y la superficie de la capa compactada.



- d) Colocar la placa de carga y el sensor, con un movimiento oscilatorio de 45° aproximadamente, hacia atrás y hacia adelante, para asegurar un contacto firme y estable sobre la superficie de prueba.
- e) Elevar la masa a la altura de prueba, impactando libremente 3 veces como acondicionamiento y posteriormente 3 impactos más para obtener resultados, los cuales se promediarán para cada punto de interés, registrando y exportando a una base de datos. Además, se verificará el coeficiente de variación de las deflexiones como se estipula en el inciso c) del apartado anterior. Posteriormente, continuar con los siguientes puntos en forma sucesiva hasta terminar con todos los puntos considerados.
- f) Determinar el contenido de agua del sitio, de acuerdo con el procedimiento indicado en el *Manual M-MMP-1-04, Contenido de Agua*, al momento de realizar el tendido y compactación de la capa. El valor del contenido de agua deberá estar dentro del siguiente intervalo:

$$\omega_o - 3,0\% \leq \omega_{campo} \leq \omega_o + 2,0\% \quad \text{Ecuación 10}$$

En donde:

$\omega_o$  = Contenido de agua óptimo de acuerdo con lo establecido en el *M-MMP-1-04, Contenido de Agua*, (%)

$\omega_{campo}$  = Contenido de agua en campo del suelo compactado, (%)

Se extraerán 3 muestras representativas del tramo para la obtención del contenido de agua en campo ( $\omega_{campo}$ ). Se tomará en forma aleatoria en los lugares

de muestreo indicados en el inciso a), realizando la prueba rápida que se indica en la Cláusula F del Manual *M-MMP-1-04, Contenido de Agua*, una durante el tendido y conformación de la capa y dos más inmediatamente después de la compactación: Las últimas 2 muestras no deberán variar en más del 2,0% respecto de la primera. El contenido de agua del tramo será el promedio de las 3 muestras.

- g) Los equipos LWD que no cuentan con una celda de carga, utilizan una fuerza de 7,07 kN (7 070 N), a la altura máxima de caída con la placa de carga de 300 mm de diámetro, como ya se mencionó anteriormente, con lo cual se genera un esfuerzo constante y aplicando la Ecuación 11 se obtiene el módulo de rigidez de superficie ( $E_{LWD_{campo}}$ ).

$$E_{LWD} = \frac{1,5 R \sigma}{\delta} = \frac{22,5}{\delta} \quad \text{Ecuación 11}$$

En donde:

$E_{LWD}$  = Módulo de rigidez de superficie, (MPa).

$R$  = Radio de la placa de carga, (mm)

$\delta$  = Deflexión máxima promedio, (mm)

$\sigma$  = Esfuerzo constante de 0,1 N/mm<sup>2</sup> o MPa.

$R$ ,  $\delta$  y  $\sigma$  se vuelven constantes (22,5) con la placa de carga de 150 mm de radio, siendo ésta la fórmula que se empleará en el procesamiento de datos para los equipos que no cuentan con celdas de carga. Con la Ecuación 11 no se requiere el valor de rigidez de la capa, sin embargo, es posible obtenerla utilizando la Ecuación 8.

- h) La Ecuación 12 muestra cómo calcular el  $E_{LWD_{campo}}$  con los parámetros correspondientes. Esta ecuación es la que utilizan los equipos que integran una celda de carga y que a su vez implica un mayor número de variables.

$$E_{LWD_{campo}} = \left[ \frac{2k(1 - \nu^2)}{AR} \right] \quad \text{Ecuación 12}$$

En donde:

$E_{LWD_{campo}}$  = Módulo de rigidez de superficie de la capa compactada medido en campo, (MPa).

$K$  = Coeficiente de rigidez calculado con la Ecuación 8, (N/mm).

$\nu$  = Coeficiente de Poisson según el tipo de suelo de acuerdo con la *T*, (adimensional, 0 a 0.5).

$A$  = Factor de distribución de esfuerzo, 2 para suelos mixtos, 8/3 para suelos granulares y  $\pi/2$  para suelos cohesivos, (adimensional).

$R$  = Radio de la placa de carga, (mm)

- i) En la TABLA 2, se pueden observar rangos de valores de módulos de rigidez de superficie medidos con



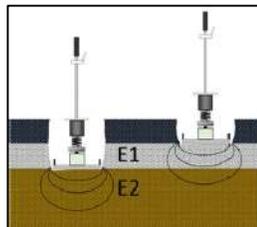
equipos LWD en campo, indicados en la norma AASHTO para diferentes tipos de suelos.

**TABLA 2. VALORES GENERALES DE MÓDULO DE RIGIDEZ LWD EN CAMPO DEPENDIENDO DEL TIPO DE SUELO.**

Tipo de Suelo	Módulo LWD de campo (MPa)
Base granular / subbase	100 - 550
Subrasante	30 - 275
Suelo estabilizado con cal	50 - 350
Suelo estabilizado mecánicamente	140 - 690
Suelo tratado con cemento	690 - 1700
Base tratada con cemento	1050 - 2750

## CORRECCIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DE SUPERFICIE POR EFECTO DEL ESPESOR FINITO DE CAPA

Para un sistema de 2 capas, Burmister (1945) propuso la Ecuación 13 con la que es posible realizar una corrección del módulo de rigidez objetivo ( $E_{LWDobj}$ ).



$$E_{LWDobj\ corr} = \frac{1}{\left[ \frac{1}{E_2 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_o} \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}} + \frac{1}{E_1 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_o}\right)^2}} \right]} \quad \text{Ecuación 13}$$

En donde:

$E_{LWDobj\ corr}$  = Módulo de rigidez objetivo corregido de la capa base compactada, (MPa).

$E_1$  = Módulo de rigidez objetivo de la capa base medido en el laboratorio con el equipo el LWD, (MPa).

$E_2$  = Módulo de rigidez de superficie medido en el campo de la capa inferior compactada (subrasante o subbase más subrasante), (MPa).

$h$  = Espesor de la capa superior, (mm).

$r_o$  = Radio de la placa de carga, (mm).

Para corregir el  $E_{LWDobj}$  del material que conforma la capa de base, se sustituirá en la Ecuación 13 ( $E_1$ ) por  $ELWD_{obj}$  como una función del espesor de la capa finita ( $h$ ) y de un módulo de superficie de la capa inmediata inferior ( $E_2$ ). Después,  $ELWD_{obj\ corr}$  deberá

compararse con el valor de  $E_{LWDcampo}$  y obtener así el grado de compactación ajustado para la capa de base. Esta corrección debe aplicarse siempre que el espesor de la capa de base sea menor que el diámetro de la placa que se utilice para el equipo LWD.

## CÁLCULO DEL GRADO DE COMPACTACIÓN ( $G_c$ )

Una vez obtenido el módulo de rigidez objetivo ( $E_{LWDobj}$ ) o en el caso de bases, el módulo de rigidez objetivo corregido ( $E_{LWDobj\ corr}$ ) y el módulo de rigidez de campo ( $E_{LWDcampo}$ ) correspondiente, se calcula y reporta el grado de compactación ( $G_c$ ) del suelo, para cada punto muestreado, como se indica en la Ecuación 14 y en la Ecuación 15.

$$G_c = \frac{ELWD_{campo}}{ELWD_{obj}} \times 100 \quad \text{Ecuación 14}$$

$$G_c = \frac{ELWD_{campo}}{ELWD_{obj\ corr}} \times 100 \quad \text{Ecuación 15}$$

En donde:

$G_c$  = Grado de compactación, (%).

$E_{LWDobj}$  = Módulo objetivo obtenido del material en el laboratorio, para terracerías y subbases, (MPa).

$E_{LWDobj\ corr}$  = Módulo de rigidez objetivo corregido de la capa base compactada, (MPa).

$E_{LWDcampo}$  = Módulo de rigidez de superficie de la capa compactada medido en campo, (MPa).

Para el caso de obtener el  $G_c$  con equipos LWD que no cuentan con una celda de carga, el  $E_{LWDcampo}$  puede tomarse del que emite el equipo o bien obtener el coeficiente de rigidez con base en la Ecuación 8 y posteriormente calcular el  $E_{LWDcampo}$  utilizando la Ecuación 12. Se recomienda obtener ambos módulos y realizar comparativas.

## ACEPTACIÓN DE RESULTADOS

- El contenido de humedad promedio para las muestras recolectadas inmediatamente después de la compactación, de acuerdo con el procedimiento indicado en el *Manual M-MMP-1-04, Contenido de Agua*, estará dentro del rango de contenido de humedad aceptable de acuerdo con el proyecto o con los valores que fije la Secretaría.





- Los valores de  $G_c$  obtenidos se consideran aceptables para cada punto, cuando el cociente sea mayor o igual a 1,0, que es el correspondiente al grado de compactación aprobado para los trabajos.
- Se aceptará el tramo compactado, cuando más del 80% de los valores cumplan con lo referido en el punto anterior y que el 20% restante no sea menor del 0,92.

## CONSIDERACIONES DE USO

- El equipo LWD que se utilice, tanto en el laboratorio como en el campo, debe estar calibrado de acuerdo con las especificaciones del fabricante, además de encontrarse en condiciones óptimas para su uso correcto.
- Para la obtención del  $ELWD_{obj}$  en el laboratorio se recomienda utilizar un molde con un collarín que permita que la placa de carga tenga contacto directamente con la superficie del material compactado y a su vez, sirva de guía para su colocación.
- Verificar que el equipo se encuentre nivelado y que al momento de impactar a través del vástago guía, el operador evite en lo posible realizar movimientos o recargarse en el sistema guía. En lo posible, se recomienda colocar uno o dos pies sobre la placa de carga para evitar el deslizamiento de éste.
- No utilizar el equipo LWD sobre carpetas asfálticas de cualquier tipo, ni sobre losas de concreto hidráulico ya que, debido a las elevadas rigideces que se pueden encontrar en estos casos, los resultados emitidos por el equipo pueden no ser representativos y ponerse en riesgo la integridad de éste, pues el equipo no está diseñado para dicha acción, por lo que será necesario abrir caja, primeramente.
- En el caso de laboratorio, no se recomienda utilizar el equipo si el espécimen de suelo está drenando agua por la parte inferior del molde AASHTO, ya que la lectura no será representativa debido al alto contenido de agua en la muestra.

Dentro de la Normativa para la Infraestructura del Transporte (NIT) se encuentra el manual *M-MMP-1-16/20, Grado de compactación con Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD)*, donde se abordan aspectos importantes estipulados en este boletín técnico.

Dicho manual se puede descargar de forma gratuita en la página oficial de la NIT-SCT, dentro del apartado *Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales (MMP), 1. Suelos y Materiales para Terracerías, 16. Grado de compactación con Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD)*. Al seleccionar la opción “descargar” se obtendrá el manual.

<https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#16>

<b>M-MMP-1-16/20</b>	
<b>LIBRO:</b>	<b>MMP. MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES</b>
<b>PARTE:</b>	<b>1. SUELOS Y MATERIALES PARA TERRACERÍAS</b>
<b>TÍTULO:</b>	16. Grado de Compactación con Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD)
<b>A. CONTENIDO</b>	
Este Manual describe el procedimiento para determinar el grado de compactación de los materiales compactados de revestimientos, terracerías, subbases y bases, usando el deflectómetro de impacto ligero (LWD, por sus siglas en inglés, <i>Light Weight Deflectometer</i> ), a que se refieren las Normas N-CMT-1-01, <i>Materiales para Terraplén</i> , N-CMT-1-02, <i>Materiales para Subyacente</i> , N-CMT-1-03, <i>Materiales para Subrasante</i> , N-CMT-1-04, <i>Materiales Tratados con Cal para Terracerías</i> , N-CMT-4-01, <i>Materiales para Revestimiento</i> , N-CMT-4-02-001, <i>Materiales para Subbases</i> , N-CMT-4-02-002, <i>Materiales para Bases Hidráulicas</i> y N-CMT-4-02-003, <i>Materiales para Bases Tratadas</i> .	
<b>B. OBJETIVO</b>	
Determinar el grado de compactación de una capa de material compactada, definido como el cociente del módulo de rigidez de superficie obtenido en campo, entre el módulo de rigidez objetivo obtenido en laboratorio, ambos determinados mediante el deflectómetro de impacto ligero.	
<b>C. REFERENCIAS</b>	





## REFERENCIAS

Normativa para la Infraestructura del Transporte, **M-MMP-1-16/20, Grado de compactación con Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD)**. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México. 2020.

W. Schwartz, D., Afsharikia, Z. and Khosravifar, D., **Standardizing Light Weight Deflectometer Modulus measurements for compaction quality assurance. Final Report**. Maryland Department of Transportation State Highway Administration. 2017.

HMP-LFG., **The light drop weight tester. Megdeburg prüfgeratebau GmbH**. [www.hmp-online.com](http://www.hmp-online.com).

M. Shabbir, K. Alex, **Evaluation of the Lightweight Deflectometer for In-Situ Determination of Pavement Layer Moduli**. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA, 2010.

ASTM E 2583-07, **Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)**. 2015.

ASTM E 2835-11, **Standard Test Method for Measuring Deflections using a Portable Impulse Plate Load Test Device**. 2015.

TP 123-01, **Laboratory Determination of Target Modulus Using LightWeight Deflectometer (LWD) Drops on Compacted Proctor Mold**. 2017.

TP 456-01, **Compaction Quality Control Using Light Weight Deflectometer (LWD)**. 2017.

W. Schwartz, D. and Afsharikia, Z., **Implementation of Lightweight Deflectometer (LWD) for modulus-based compaction quality assurance of unbound materials. Final Report**. Maryland Department of Transportation State Highway Administration. 2018.

