

**LIBRO: MMP. MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES**

**PARTE: 1. SUELOS Y MATERIALES PARA TERRACERÍAS**

**TÍTULO: 16. Grado de Compactación con Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD)**

**A. CONTENIDO**

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, *Light Weight Deflectometer*), a que se refieren las Normas N·CMT·1·01, *Materiales para Terraplén*, N·CMT·1·02, *Materiales para Subyacente*, N·CMT·1·03, *Materiales para Subrasante*, N·CMT·1·04, *Materiales Tratados con Cal para Terracerías*, N·CMT·4·01, *Materiales para Revestimiento*, N·CMT·4·02·001, *Materiales para Subbases*, N·CMT·4·02·002, *Materiales para Bases Hidráulicas* y N·CMT·4·02·003, *Materiales para Bases Tratadas*.

**B. OBJETIVO**

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.

**C. REFERENCIAS**

Este Manual se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Materiales para Terraplén .....	N·CMT·1·01
Materiales para Subyacente .....	N·CMT·1·02
Materiales para Subrasante .....	N·CMT·1·03
Materiales Tratados con Cal para Terracerías .....	N·CMT·1·04
Materiales para Revestimiento .....	N·CMT·4·01
Materiales para Subbases .....	N·CMT·4·02·001
Materiales para Bases Hidráulicas .....	N·CMT·4·02·002
Materiales para Bases Tratadas .....	N·CMT·4·02·003
Muestreo de Materiales para Terracerías .....	M·MMP·1·01
Contenido de Agua .....	M·MMP·1·04
Compactación AASHTO .....	M·MMP·1·09
Muestreo de Materiales Tratados con Cal .....	M·MMP·4·02·012

**D. EQUIPO**

**D.1. DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO LIGERO**

Consiste en un dispositivo guía, un dispositivo generador de impacto, un sistema de medición de carga, un sistema de registro de datos, placa de carga, transductor de deflexión y una celda de carga opcional, como se muestra en la Figura 1 de este Manual.

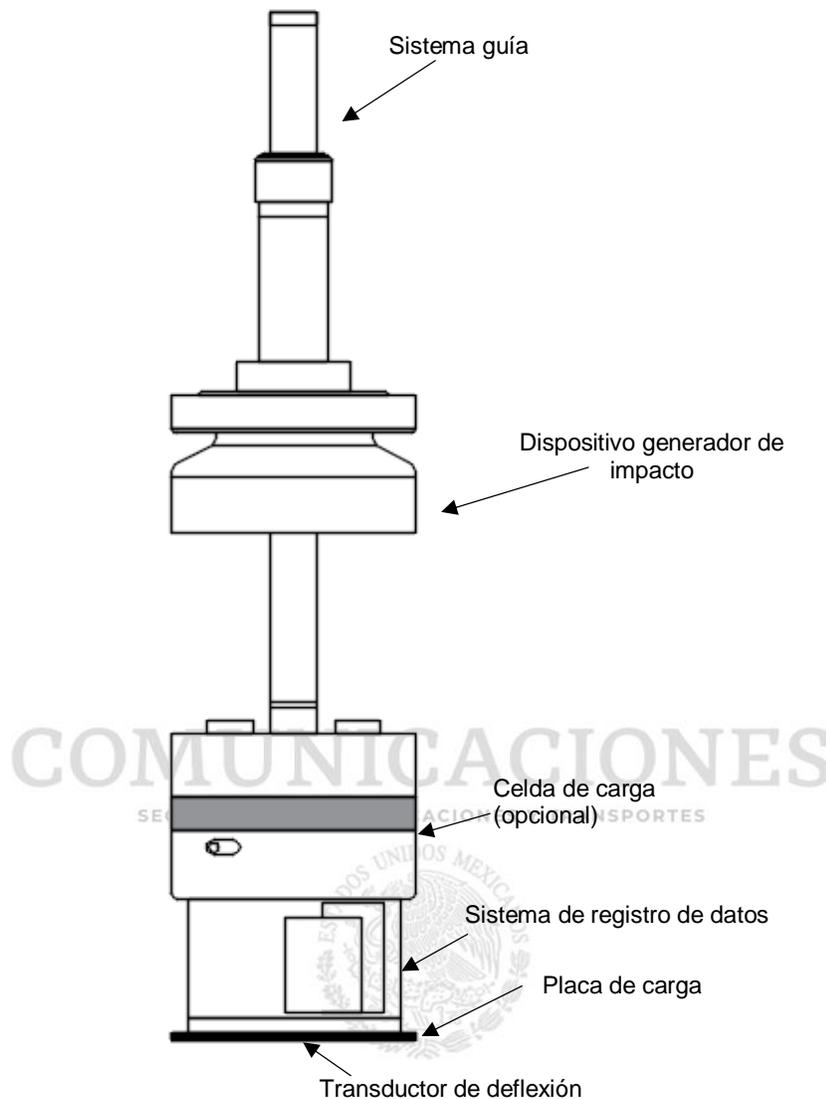


FIGURA 1.- Esquema de un deflectómetro de impacto ligero

#### D.1.1. Condiciones de uso del equipo

Los componentes del deflectómetro de impacto ligero expuestos al medio ambiente, serán capaces de operar en un rango de temperaturas de entre  $-10$  y  $50^{\circ}\text{C}$ ; humedad relativamente alta, lluvia o niebla; y otras condiciones adversas tales como polvo, golpes, o vibraciones que se pueden presentar normalmente cuando se utiliza en campo.

#### D.1.2. Dispositivo generador de impacto

- D.1.2.1.** Capaz de levantar una placa de carga con masa predeterminada y soltarla en caída libre mediante un sistema guía vertical. Es importante que el sistema guía presente una fricción despreciable y esté diseñado de tal manera que la placa de carga impacte perpendicularmente a la superficie de contacto.
- D.1.2.2.** Si el equipo cuenta con celda de carga, la onda generada por el impacto de la masa y transmitida a la superficie de contacto, será aproximadamente semisenoidal y se aplicará con una amplitud de pico a pico de 20 a 50 kN. La duración del impulso de fuerza permanecerá entre 20 y 40 ms. En el caso de equipos sin celda de carga, la duración del impulso de fuerza permanecerá entre 10 y 30 ms.

### D.1.3. Placa de carga

La placa de carga que se utilice en campo tendrá un diámetro de 150 a 300 mm, con un orificio en el centro que permita su montaje en el sistema guía. Capaz de distribuir uniformemente la carga durante el impacto sobre la superficie de contacto y permitiendo la medición de la deflexión al centro de la placa de carga. La placa que se use en el laboratorio será de 150 mm para que sea compatible con el molde de la prueba de compactación AASHTO, en sus variantes B y D.

### D.1.4. Transductor de deflexión

Capaz de medir el desplazamiento vertical máximo y estar montado de tal manera que minimice la rotación angular respecto a su plano de medición cuando ocurra el movimiento máximo esperado. El número y espaciamiento de los transductores de deflexión dependerá de las características de la capa por estudiar. Los transductores de deflexión pueden ser de desplazamiento, de velocidad o de aceleración, entre otros.

### D.1.5. Celda de carga

Capaz de medir la carga aplicada en cada impacto; se colocará de tal manera que no restrinja la capacidad de obtener mediciones de deflexión bajo el centro de la placa de carga. Además, será resistente al agua y al uso rudo durante el desarrollo de las pruebas en el laboratorio o en el campo.

### D.1.6. Sistema de registro y procesamiento de datos

**D.1.6.1.** Capaz de mostrar y registrar los valores de las cargas aplicadas y las deflexiones, así como el periodo de tiempo, presentándolos en forma numérica y gráfica, en tiempo real.

**D.1.6.2.** En el caso de equipos con celda de carga, la información obtenida por el equipo se mostrará y almacenará con una resolución para las mediciones de la deflexión y carga máxima, de  $\pm 1 \mu\text{m}$  o menor. Las mediciones de las cargas máximas y la deflexión se registrarán, dentro de un periodo de al menos 60 ms, con una precisión para la celda de carga de  $\pm 0,1 \text{ kN}$  y para el transductor de deflexión de  $\pm 2 \mu\text{m}$ .

**D.1.6.3.** Para aquellos equipos sin celdas de carga, la información obtenida por el equipo se mostrará y almacenará con una resolución para las mediciones de la deflexión, así como el almacenamiento de resultados, de  $\pm 20 \mu\text{m}$  o menor. Las mediciones de la carga y de la deflexión se registrarán, dentro de un periodo de al menos 50 ms, con una precisión para el transductor de deflexión de  $\pm 40 \mu\text{m}$ .

## D.2. HERRAMIENTAS

Pala y cuchara de albañil.

## E. CALIBRACIÓN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO LIGERO

Previo al inicio de la prueba se verificará el certificado de calibración del equipo, cuya vigencia será de un año, expedido por un laboratorio debidamente acreditado. El certificado contendrá la calibración del dispositivo generador de impacto y del transductor de deflexión.

## F. OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ OBJETIVO, $E_{Obj}$ , EN LABORATORIO

### F.1. PROCEDIMIENTO

Para cada tramo en estudio, siempre que las características del material de construcción sean las mismas en dicho tramo, se determinará el módulo de rigidez objetivo,  $E_{Obj}$  en laboratorio para lo cual se prueban 5 porciones de material obtenidas de una misma muestra, como se indica a continuación:

- F.1.1.** Se toma una muestra de aproximadamente 40 kg del material que se utilice en la construcción del tramo en estudio, de acuerdo con lo establecido en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías* o M-MMP-4-02-012, *Muestreo de Materiales Tratados con Cal*, según sea el caso, de manera que se realice la prueba con las mismas condiciones en que se encuentre el tramo de la obra en estudio.
- F.1.2.** Se preparan y compactan las 5 porciones de prueba mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-1-09, *Compactación AASTHO*, variantes B y D, excepto que una vez determinada la masa del molde junto con la porción de prueba y antes de extraer el espécimen del molde, se realizará lo siguiente:
- F.1.2.1.** Se apoya el molde para la prueba de compactación AASTHO que contiene la porción de prueba sobre una base sólida, horizontal y estable, preferentemente sobre un piso de concreto.
- F.1.2.2.** Se coloca el deflectómetro de impacto ligero sobre la placa de carga de 150 mm de diámetro, la cual se monta sobre la parte superior de la muestra contenida en el molde de prueba y se gira aproximadamente 45° hacia la derecha y hacia la izquierda para asentar la placa, sin que entre en contacto con el borde del molde y evitando cualquier movimiento lateral durante los impactos de la placa de carga. Se podrá usar un collarín como el que se muestra en la Figura 2 de este Manual. Es muy importante asegurar que el contacto de la placa de carga sea sobre la totalidad de la superficie del material de prueba contenido en el molde y que sea siempre perpendicular a ésta, debido a que algunos equipos por las dimensiones de su estructura, no es posible usar el collarín como guía.
- F.1.2.3.** Se sostiene verticalmente el equipo de impacto ligero sobre el molde y se aplican 6 impactos de la placa de carga utilizando el dispositivo generador de impacto. La altura de caída de la placa de carga será la que indique el fabricante de acuerdo con el tipo de equipo que se utilice.
- F.1.2.4.** De los 6 impactos de la placa de carga señalados en el Párrafo anterior, se aplicarán 3 inicialmente que sirven para asentar la placa de carga sobre el material en el molde y 3 más para completar los 6 impactos, con los cuales se obtienen las deflexiones y las cargas aplicadas. Posteriormente, se retira el equipo de impacto ligero del molde.
- F.1.3.** Se calcula el coeficiente de variación de las deflexiones de cada porción de prueba. Si el coeficiente de variación es menor de 10%, se continúa con el procedimiento de compactación AASTHO, de lo contrario, se repite la prueba. El coeficiente de variación se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C.V. = \frac{S}{\bar{x}} \times 100$$

Donde:

C.V. = Coeficiente de variación, (%)

S = Desviación estándar de las deflexiones,  $\delta_i$ , (m)

$\bar{x}$  = Media aritmética de las deflexiones,  $\delta_i$ , (m)

- F.1.4.** Se registran, para cada porción de prueba  $i$ , las deflexiones como  $\delta_i$ , en mm, y las cargas aplicadas,  $F_i$ , en N, las alturas de caída,  $h_i$ , en m, y en el caso de equipos que cuenten con celda de carga, el módulo de rigidez de la porción de prueba  $i$ , como  $E_{pi}$ , en MPa.

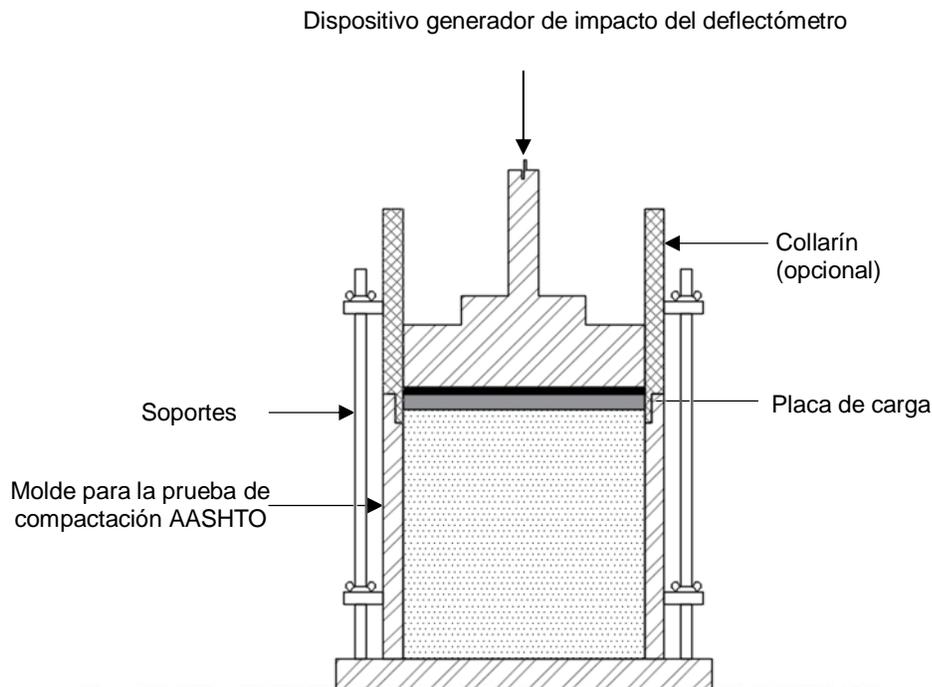


FIGURA 2.- Esquema del molde para la prueba de compactación AASHTO con la placa de carga y el dispositivo de impacto del deflectómetro utilizando un collarín

**F.1.5.** Se calcula la rigidez del suelo,  $k_i$ , para cada porción de prueba  $i$ , cuando el equipo no cuente con una celda de carga, mediante la siguiente expresión:

$$k_i = \frac{F_{m\acute{a}x}}{\delta_{m\acute{a}x}}$$

Donde:

$k_i$  = Rigidez del suelo de la porción de prueba  $i$ , (N/mm)

$F_{m\acute{a}x}$  = Carga máxima, aplicada por el deflectómetro de impacto ligero de los 3 últimos impactos, (N)

$\delta_{m\acute{a}x}$  = Deformación máxima promedio, producida por el deflectómetro de impacto ligero de los 3 últimos impactos, (mm)

## F.2. CÁLCULO DEL MÓDULO DE RIGIDEZ OBJETIVO, $E_{obj}$

### F.2.1. Método gráfico

Este método de cálculo es aplicable directamente para deflectómetros de impacto ligero que proporcionen el módulo de rigidez de la porción de prueba  $i$ ,  $E_{pi}$ , durante la ejecución de la prueba. Para lo cual se realiza lo siguiente:

**F.2.1.1.** Se elabora la curva de compactación de los materiales mediante la cual se obtiene el contenido de agua óptimo,  $\omega_o$ , que le corresponde para una masa volumétrica seca máxima,  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ , de acuerdo con lo indicado en el Manual M·MMP·1·09, *Compactación AASHTO*, como se muestra en la Figura 3 de este Manual.

- F.2.1.2.** Se elabora una gráfica que relacione el eje de las abscisas, contenido de agua  $\omega_i$ , en %, para cada porción de prueba  $i$ , y el eje de las ordenadas, el módulo de rigidez  $E_{pi}$ , en MPa, que resulte mayor, de la porción de prueba  $i$ , como se muestra en la Figura 4 de este Manual.
- F.2.1.3.** Se traza un línea perpendicular en el punto correspondiente al valor del contenido de humedad óptimo  $\omega_b$ , en %, hasta interceptar la curva de módulo de rigidez y a partir de este punto se traza una línea horizontal que intercepte el eje de las ordenadas en donde se encontrará el módulo de rigidez objetivo,  $E_{Obj}$ , como se muestra en la Figura 4 de este Manual.

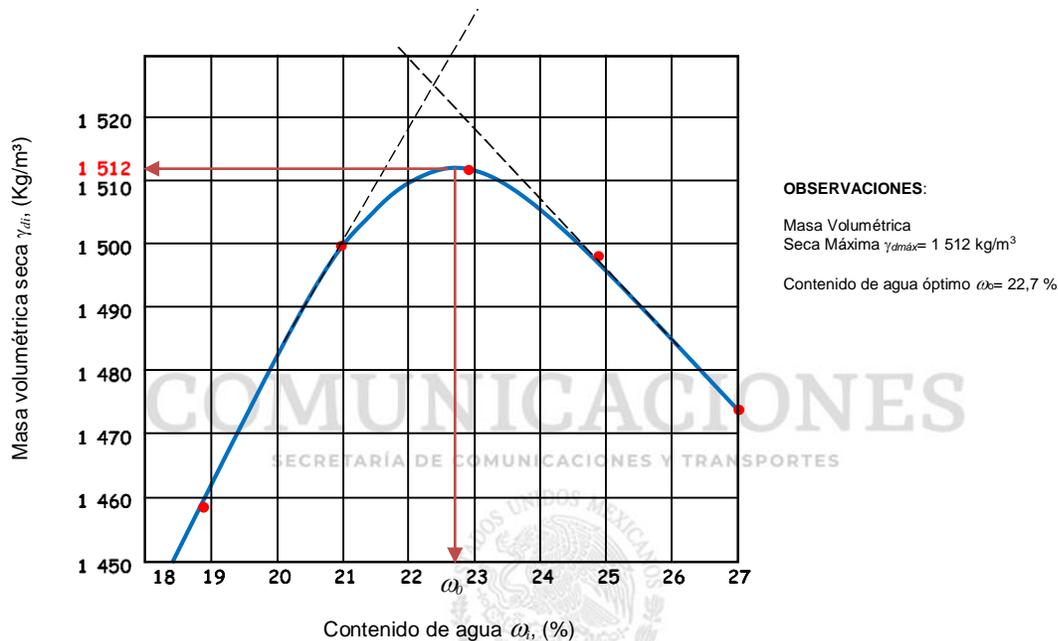


FIGURA 3.- Curva de compactación de la muestra

### F.2.2. Método matemático

Cuando el equipo no proporcione directamente de cada porción de prueba  $i$ , el módulo de rigidez,  $E_{pi}$ , se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_{pi} = \left(1 - \frac{2v^2}{1-v}\right) \times \frac{4H}{\pi D^2} \times k_i$$

Donde:

$E_{pi}$  = Módulo de rigidez de la porción de prueba  $i$ , (MPa)

$v$  = Coeficiente de Poisson según el tipo de material, obtenido de la Tabla 1 de este Manual, (adimensional)

$H$  = Altura del molde usado en la prueba de compactación AASTHO, (mm)

$D$  = Diámetro de la placa de carga del deflectómetro de impacto ligero (LWD), (mm)

$k_i$  = Rigidez de la porción de prueba  $i$ , calculado como se indica en el Inciso F.1.5. de este Manual, (N/mm).

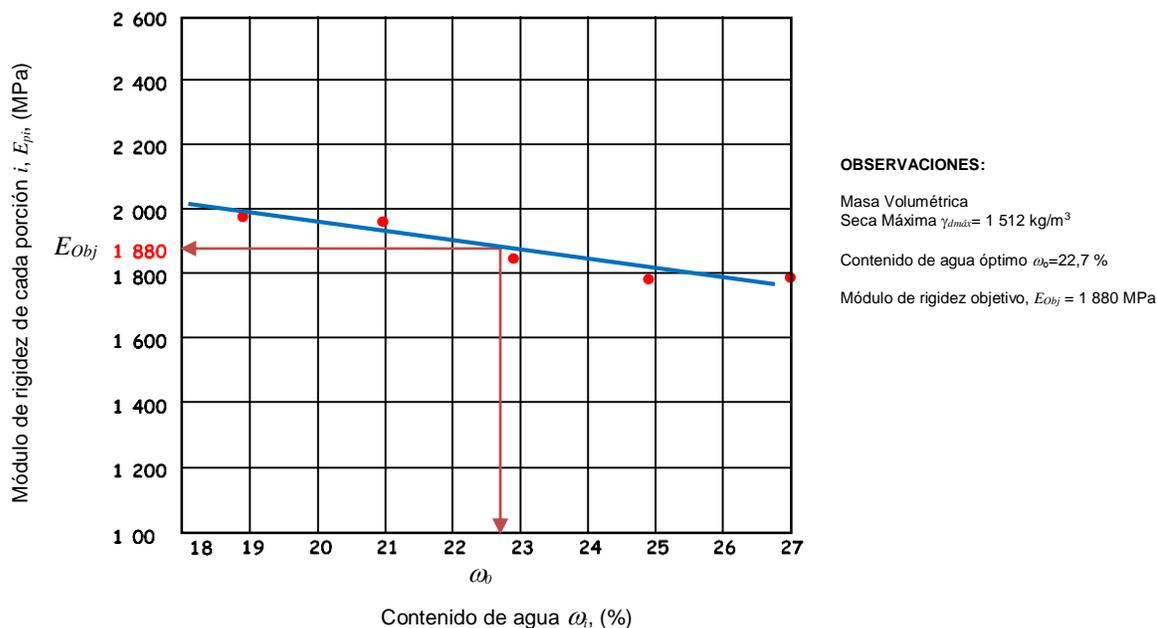


FIGURA 4.- Curva de módulo de rigidez objetivo,  $E_{Obj}$

COMUNICACIONES  
 TABLA 1.- Valores típicos de coeficiente de Poisson,  $\nu$

Material	Rango de valores $\nu$	Valor típico $\nu$
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

**F.2.3.** Una vez obtenidos los módulos de rigidez,  $E_{pi}$ , de cada una de las porciones de prueba  $i$ , se obtiene el módulo de rigidez objetivo,  $E_{Obj}$ , correspondiente al contenido de agua óptimo,  $\omega_o$ , de manera gráfica como se indica en el Inciso F.2.1. de este Manual.

**F.2.4. Corrección del módulo de rigidez objetivo para bases**

Por efecto del espesor finito de capa de las bases, cuando se tenga un sistema de dos capas, siempre que el espesor de la capa de base sea menor que el diámetro de la placa de carga

que esté utilizando el deflectómetro, el módulo de rigidez objetivo corregido,  $E_{Obj-corr}$ , se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_{Obj-corr} = \frac{1}{\left[ \frac{1}{E_2 \sqrt{1 + \left( \frac{h}{r_o} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \right)}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{h}{r_o} \right)^2}}}{E_1} \right]}$$

Donde:

- $E_{Obj-corr}$  = Módulo de rigidez objetivo corregido, (MPa)  
 $E_1$  = Módulo de rigidez objetivo de la base, obtenido en el laboratorio, (MPa)  
 $E_2$  = Módulo de rigidez de superficie de campo, de la capa inferior (subbase o subrasante), medido antes de colocar la base, (MPa), como se indica en la Cláusula G. de este Manual  
 $h$  = Espesor de la capa de base, (mm)  
 $r_o$  = Radio de la placa de carga utilizada por el equipo de impacto ligero en campo, (mm)

**F.2.5.** Los resultados del cálculo del módulo de rigidez objetivo,  $E_{Obj}$ , se pueden reportar utilizando el formato mostrado en la Tabla 2 de este Manual.

## G. OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DE SUPERFICIE EN CAMPO, $E_{LWD}$

### G.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

- G.1.1.** Para obtener el módulo de rigidez de superficie en campo,  $E_{LWD}$ , se utiliza el mismo deflectómetro de impacto ligero que se empleó en el laboratorio para obtener el módulo de rigidez objetivo,  $E_{Obj}$ , para eliminar posibles diferencias entre mediciones debidas al uso de diferentes equipos.
- G.1.2.** Debido a que el contenido de agua es un factor muy importante a considerar, es indispensable obtener el módulo de rigidez de superficie en campo,  $E_{LWD}$ , dentro de las 2 primeras horas de realizada la compactación, lo cual garantizará la confiabilidad de las mediciones en campo, al evitar pérdidas de humedad en el suelo.

### G.2. DISTRIBUCIÓN Y FRECUENCIA DE LOS PUNTOS DE PRUEBA

Antes de iniciar la prueba en campo, se determina el número de puntos de prueba, para revestimientos, terracerías, subbases y bases. Si el deflectómetro de impacto ligero lo permite, se identifica cada punto de prueba mediante el registro de sus coordenadas geoespaciales o bien, identificando el punto de prueba mediante numeración secuencial y el cadenamiento que le corresponda al tramo en estudio. Para la distribución y frecuencia de los puntos de prueba se considera lo siguiente:

#### G.2.1. Para revestimientos y terracerías

La frecuencia de los puntos de prueba para terracerías se considera a cada 100 m o menos para un tramo en estudio de 500 m de longitud, de acuerdo con la distribución que se muestra en la Figura 5 de este Manual.

**TABLA 2.- Formato para el reporte del módulo objetivo,  $E_{obj}$**

**Reporte de Prueba**

Fecha y Hora: \_\_\_\_\_  
 Diámetro de la Placa de Carga: \_\_\_\_\_ ( ) Tipo de material: \_\_\_\_\_  
 Localización del proyecto: \_\_\_\_\_  
 Operador: \_\_\_\_\_

Prueba de Compactación	Número de porción de prueba $i$	1	2	3	4	5
	Contenido de agua óptimo, $\omega_o$ , (%)					
	Energía de compactación (Estándar o Modificada)					
	Masa del molde, (g)					
	Masa del molde más suelo húmedo compactado, (g)					
	Masa volumétrica seca máxima $\gamma_{dm\acute{a}x}$ (Kg/m <sup>3</sup> )					

Coefficiente de Poisson,  $\nu$ : \_\_\_\_\_

Módulo de rigidez de cada porción de prueba, $E_{pi}$ , MPa,	Número de porción de prueba $i$	1	2	3	4	5
	Altura de caída, $h_i$ : _____ m					
	Altura de caída, $h_s$ : _____ m					
	Altura de caída, $h_G$ : _____ m					

Módulo de rigidez de cada porción de prueba, $E_{pi}$ , en MPa, para equipos sin celda de carga					
---	--	--	--	--	--

Contenido de agua	Porción de prueba $i$	Masa del molde, g	Masa del molde + suelo húmedo, g	Masa del molde + suelo seco, g	$\omega_i$ , %
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

Resultados	Modelo deflectómetro de impacto ligero, $LWD$	
	Coefficiente de Poisson, $\nu$ , utilizado	
	Masa volumétrica seca máxima, $\gamma_{dm\acute{a}x}$	
	Contenido de agua óptimo, $\omega_o$ , %	
	Módulo de rigidez objetivo, $E_{obj}$	

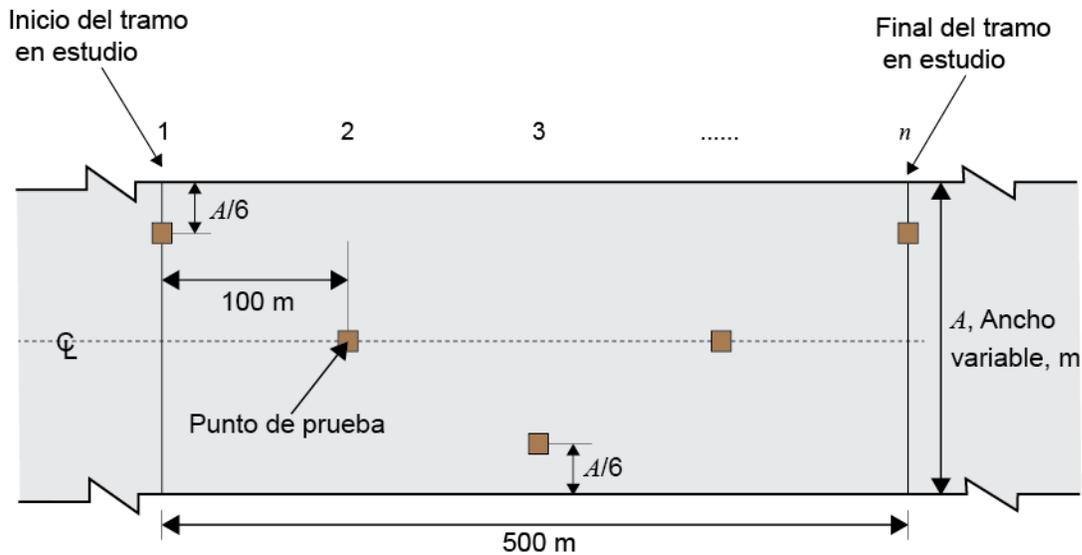


FIGURA 5.- Distribución y frecuencia de los puntos de prueba para revestimientos y terracerías

### G.2.2. Para subbases o bases

En el caso de subbases y bases, la frecuencia de prueba se considera a cada 50 m o menos para un tramo de estudio de 500 m de longitud, de acuerdo con la distribución de los puntos de prueba que se muestra en la Figura 6 de este Manual.

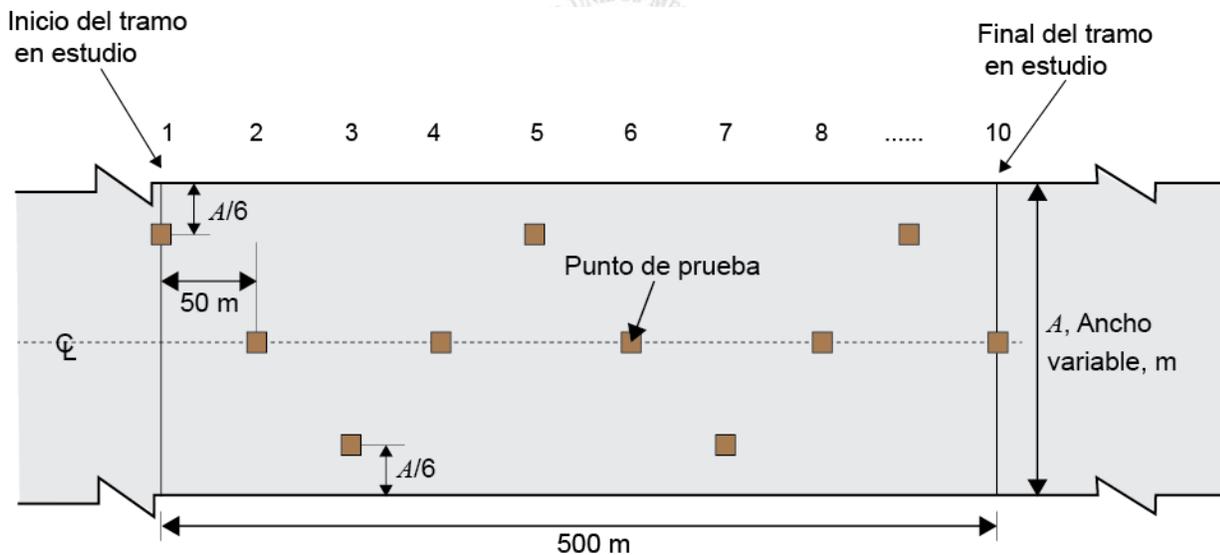


FIGURA 6.- Distribución y frecuencia de los puntos de sondeo de prueba para capas de base y subbase

## G.3. DETERMINACIÓN DEL INTERVALO DE CONTENIDO DE AGUA EN CAMPO

**G.3.1.** Se obtienen 3 muestras del material utilizado durante la construcción y se les determina su contenido de agua, realizando la prueba rápida que se indica en la Cláusula F. del Manual M-MMP-1-04, *Contenido de Agua*; una muestra se obtiene durante el tendido y conformación de cada capa y las otras dos muestras se obtienen inmediatamente después de la compactación, de acuerdo con el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-1-01,

Muestreo de Materiales para Terracerías o en el Manual M·MMP·4·02·012, *Muestreo de Materiales Tratados con Cal*, según sea el caso.

- G.3.2.** Se verifica que el contenido de agua de las muestras obtenidas después de la compactación no varíe en más del 2% respecto del contenido de agua de la muestra obtenida durante el tendido y conformación. El contenido de agua del tramo en estudio se considera como el promedio del contenido de agua de las tres muestras.
- G.3.3.** Se recomienda para la ejecución de la prueba, que el intervalo del contenido de agua del material compactado en el campo en el tramo en estudio, sea el siguiente:

$$\omega_o - 3\% \leq \omega_{campo} \leq \omega_o + 2\%$$

Donde:

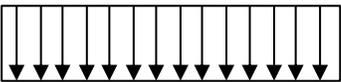
$\omega_o$  = Contenido de agua óptimo obtenido de acuerdo con lo indicado en el Manual M·MMP·1·09, *Compactación AASHTO*, (%), como se muestra en la Figura 3 de este Manual

$\omega_{campo}$  = Contenido promedio de agua en campo del material compactado en el tramo en estudio, (%)

**G.4. PROCEDIMIENTO**

- G.4.1.** Una vez obtenido el intervalo del contenido de agua en campo para el tramo en estudio, se ingresa al sistema de procesamiento y registro de datos del deflectómetro de impacto ligero, el coeficiente de Poisson,  $\nu$ , utilizado para obtener el módulo de rigidez objetivo,  $E_{Obj}$ , y el factor de distribución de esfuerzos,  $A$ , indicado en la Tabla 3 de este Manual, según el tipo de suelo de que se trate.

**TABLA 3.- Factor de distribución de esfuerzos para diferentes tipos de suelo**

Tipo de suelo	Factor $A$	Distribución de esfuerzos
Mixto	2	
Granular	$8/3$	
Cohesivo	$\pi/2$	

- G.4.2.** Se ajusta la altura de caída para la ejecución de la prueba en campo de acuerdo con lo indicado por el fabricante.
- G.4.3.** Para cada punto de prueba, se limpia y nivela el área bajo la placa de carga del deflectómetro de impacto ligero y se remueven las rocas con sobretamaño, si existieran, asegurándose de contar con una superficie plana y compacta. Si la granulometría de la capa es muy abierta, mediante el uso de una pala y una cuchara de albañil, se puede colocar una capa delgada de arena que permita tener un contacto completo y uniforme con la placa de carga.

- G.4.4.** Se posiciona la placa de carga y se acomoda con movimientos oscilantes aproximadamente 45° hacia adelante y hacia atrás para asegurar el contacto entre la placa de carga y la superficie de la capa en el punto de prueba.
- G.4.5.** Se realizan 6 impactos del deflectómetro con la carga a la altura previamente ajustada, asegurando que el sistema guía siempre se encuentre perpendicular a la placa de carga y procurando colocar el pie en el borde exterior del molde para evitar su movimiento durante el impacto de la carga. Los primeros 3 impactos servirán para asentar la placa de carga sobre la superficie de la capa y los 3 impactos restantes servirán para obtener el módulo de rigidez de superficie en campo,  $E_{LWD}$ , para el punto de prueba en estudio.
- G.4.6.** Si el deflectómetro de impacto ligero obtiene directamente los módulos de rigidez de superficie en campo para cada punto de prueba, estos se exportarán a un sistema de registro de datos.
- G.4.7.** Cuando no se obtengan directamente los módulos de rigidez superficie en campo,  $E_{LWD}$ , de los puntos de prueba, estos se pueden calcular mediante la siguiente expresión:

$$E_{LWD} = \frac{2k(1-\nu^2)}{Ar_o}$$

Donde:

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

$k$  = Rigidez del suelo, calculada como se indica en el Inciso F.1.5. de este Manual, (N/mm)

$\nu$  = Coeficiente de Poisson según el tipo de material, de acuerdo con lo indicado en la Tabla 1 de este Manual, (adimensional)

$A$  = Factor de distribución de esfuerzos de acuerdo con lo indicado en la Tabla 2 de este Manual, (adimensional)

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

#### **G.5. VALORES DE REFERENCIA DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DE SUPERFICIE EN CAMPO, $E_{LWD}$**

En la Tabla 4 de este Manual, se sugieren algunos valores de referencia esperados para diferentes materiales que pueden servir de orientación durante la ejecución de la prueba.

**TABLA 4.- Valores de referencia del módulo de rigidez de superficie en campo para diferentes materiales**

Material	Módulo de rigidez de superficie en campo, $E_{LWD}$ MPa
Base granular o subbase	100 - 550
Subrasante	30 - 275
Terracerías estabilizadas mecánicamente	140 - 690
Suelos estabilizados con cal	50-350
Terracerías tratadas con cemento	690 - 1 700
Base tratada con cemento	1 050 - 2 750

## H. CÁLCULO DEL GRADO DE COMPACTACIÓN (RELACIÓN DE RIGIDECES)

Una vez obtenido el módulo de rigidez objetivo,  $E_{Obj}$ , y los módulos de rigidez de superficie en campo,  $E_{LWD}$ , se calcula el grado de compactación como la relación de rigideces de los puntos de prueba del tramo en estudio, considerando lo siguiente:

### H.1. PARA CAPAS DE REVESTIMIENTOS, TERRACERÍAS Y SUBBASES

$$RG_{TS} = \frac{E_{LWD}}{E_{Obj}}$$

Donde:

$RG_{TS}$  = Relación de rigideces para revestimientos, terracerías y subbases, (adimensional)

$E_{LWD}$  = Módulo de rigidez de superficie en campo, (MPa), obtenido como se indica en la Cláusula G. de este Manual

$E_{Obj}$  = Módulo de rigidez objetivo, (MPa), obtenido como se indica en la Cláusula F. de este Manual

### H.2. PARA CAPAS DE BASE

$$RG_B = \frac{E_{LWD}}{E_{Obj-corr}}$$

Donde:

$RG_B$  = Relación de rigideces para bases, (adimensional)

$E_{LWD}$  = Módulo de rigidez objetivo, (MPa), obtenido como se indica en la Cláusula G. de este Manual

$E_{Obj-corr}$  = Módulo de rigidez de superficie en campo, (MPa), obtenido como se indica en la Cláusula F. de este Manual

## I. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN

Para el tramo en estudio, se determina mediante comparación lo siguiente:

- I.1. Cuando los valores de la relación de rigideces (grado de compactación) obtenidos sean iguales a 1 o mayores, significa que el grado de compactación para cada punto de prueba es igual o mayor al indicado en el proyecto o aprobado por la Secretaría.
- I.2. Cuando más del 80% de los puntos de prueba tengan relaciones de rigideces (grado de compactación) iguales a 1 o mayores, significa que el grado de compactación para el tramo en estudio es el indicado en el proyecto o aprobado por la Secretaría. Si esta condición no se cumple, se considera que el grado de compactación del tramo en estudio no cumple con lo indicado.

## J. REPORTE DE RESULTADOS

El reporte de resultados incluye al menos lo siguiente:

- Ubicación del proyecto y descripción de las condiciones climáticas.
- Cadenamiento del tramo en estudio y tipo de material.
- Identificación y ubicación de los puntos de prueba, así como el espesor de la capa en estudio.

- Modelo del defleómetro de impacto ligero usado en campo, tamaño de la placa de carga usada en laboratorio y campo, altura de caída y carga aplicada.
- Curva de compactación y gráfica para el cálculo del módulo de rigidez objetivo,  $E_{Obj}$ .
- Cálculo del módulo de rigidez objetivo,  $E_{Obj}$ .
- Cálculo del módulo de rigidez de superficie de campo,  $E_{LWD}$ , así como la relación de rigideces de cada punto de prueba para el tramo en estudio. Se puede utilizar el formato mostrado en la Tabla 5 de este Manual, así como larguillos o cualquier otra representación gráfica que facilite la interpretación de los resultados.

## K. PRECAUCIONES PARA EVITAR ERRORES

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observarán las siguientes precauciones:

- K.1.** Que el defleómetro de impacto ligero que se utilice tanto en laboratorio como en el campo mantenga su calibración dentro del periodo que indique el fabricante y en condiciones óptimas para su uso.
- K.2.** Que en el laboratorio, si se utiliza un collarín junto con el molde para la prueba de compactación durante la obtención del módulo de rigidez objetivo,  $E_{Obj}$ , permita que la placa de carga tenga contacto directamente con la superficie del material compactado.
- K.3.** Que en el campo, la superficie de la capa por estudiar, sea plana y libre de escombros de manera que permita un contacto completo y uniforme de la placa de carga del equipo de impacto ligero.
- K.4.** Que al emplear el defleómetro de impacto ligero, se verifique que se encuentra bien nivelado y que al momento de dejar caer el dispositivo de carga, el operador evite realizar movimientos o recargarse en el sistema guía.
- K.5.** Que se evite el uso del defleómetro cuando se observe que el material por compactar tenga un exceso de agua.
- K.6.** Que se limite el uso del defleómetro únicamente para los materiales y condiciones aquí descritos, para evitar daños al equipo.

**TABLA 5.- Formato para reportar el módulo de rigidez de superficie en campo y la relación de rigideces (grado de compactación)**

Fecha y Hora: \_\_\_\_\_  
 Tipo de material: \_\_\_\_\_  
 Localización del proyecto: \_\_\_\_\_  
 Operador: \_\_\_\_\_  
 Cadenamiento: \_\_\_\_\_ Espesor de la capa: \_\_\_\_\_ Tipo de material: \_\_\_\_\_  
 Coeficiente de Poisson,  $\nu$ : \_\_\_\_\_ Factor de forma (A): \_\_\_\_\_  $E_{obj}$ : \_\_\_\_\_ MPa

Condición del clima		
Modelo del deflectómetro de impacto ligero (LWD)		
Diámetro de la placa de carga, mm		
Altura de caída, m		
Fuerza de caída, N		
Contenido de agua óptimo, $\omega_0$ , %		
Intervalo del contenido de agua en campo		
Muestra del punto de prueba $n$	Localización	Contenido de agua, $\omega_{campo}$ %
1		
2		
3		
Promedio ( $\omega_{campo}$ )		
Intervalo del contenido de agua en campo ( $\omega_0 - 3\% \leq \omega_{campo} \leq \omega_0 + 2\%$ )		

No.	Ubicación punto de prueba	$E_{LWD}$ MPa	$E_{LWD} / E_{obj}$ Adimensional	Comparación $E_{LWD} / E_{obj} \geq 1$	
				Si	No
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
$n$					
Porcentaje de puntos de prueba del tramo en estudio que satisfacen el grado de compactación indicado en el proyecto o aprobado por la Secretaría, $E_{LWD} / E_{obj} \geq 1$					

# SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



**SCT**

SECRETARÍA DE  
COMUNICACIONES  
Y TRANSPORTES

## SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

Dirección General de Servicios Técnicos

Av. Coyoacán 1895

Col. Acacias

Ciudad de México, 03240

[www.gob.mx/sct](http://www.gob.mx/sct)



## INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Av. Universidad No. 1738, Edificio B, Nivel 1

Col. Santa Catarina

Ciudad de México, 04010

<https://normas.imt.mx>

[normas@imt.mx](mailto:normas@imt.mx)