

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN DE CAPAS GRANULARES EN PAVIMENTOS  
FLEXIBLES CON EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO  
LIVIANO**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**JUAN CARLOS CALDERÓN VILLANUEVA**

**Lima- Perú**

**2015**

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres, esposa e hijos.

A la Universidad Nacional de Ingeniería.

A todas las personas que me apoyaron  
e incentivaron a seguir adelante.

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>2</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>4</b>
<b>LISTA DE CUADROS .....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS .....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO I: MÉTODO DE EVALUACIÓN DE CAPAS GRANULARES CON EL EQUIPO LWD.....</b>	<b>8</b>
1.1    METODOLOGÍA.....	8
1.2    CONCEPTO DE RESILENCIA .....	10
1.3    DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO .....	11
<b>CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DE MANEJO DEL EQUIPO Y SOFTWARE.....</b>	<b>14</b>
2.1    MANEJO DEL EQUIPO LWD .....	14
2.2    INDICACIONES PARA UNA MEJOR TOMA DE DATOS .....	19
2.3    USO DEL SOFTWARE LWDmod .....	20
2.4    CALIBRACIÓN .....	21
2.5    RENDIMIENTO .....	21
2.6    COSTOS DEL EQUIPO Y EVALUACIÓN.....	21
<b>CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LA TOMA DE DATOS .....</b>	<b>22</b>
3.1    DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE PRUEBA.....	22
3.2    TOMA DE DATOS .....	23
3.3    ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS OBTENIDOS .....	24
<b>CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE CAPAS GRANULARES IN SITU .....</b>	<b>31</b>
4.1    UBICACIÓN.....	31
4.2    EVALUACIONES IN SITU .....	31
4.3    DATOS SEMILLA .....	32
4.4    PROCESAMIENTO DE DATOS .....	32
4.5    RESULTADOS OBTENIDOS.....	32
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>42</b>
5.1    CONCLUSIONES .....	42
5.2    RECOMENDACIONES.....	44
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>46</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>47</b>

## RESUMEN

El tema del presente Informe de Suficiencia, comprende la descripción de la evaluación de capas granulares en pavimentos flexibles con el equipo LWD, conocido como Deflectómetro de Impacto Liviano, que viene a ser un método no destructivo, aquí se describe la metodología de su aplicación, enfocado como una herramienta de control in-situ de las capas granulares colocadas. Esta metodología utiliza la deflectometría de impacto con carga liviana, que es una tecnología que permite evaluar las capas compuestas en la estructura de un pavimento, con el cual se obtendrá el Módulo Resiliente (Mr) in situ, que los métodos actuales de diseño estructural de pavimentos flexibles, incluida la nueva Guía de Diseño AASHTO 2008, utilizan como indicador de la capacidad estructural de las capas granulares, considerando que el principal aporte de las capas granulares de un pavimento flexible es su capacidad estructural.

Esta información se logra obtener aplicando una carga dinámica a las capas a evaluar, registrando su deformación a través de sensores; con la cual utilizando la metodología de retrocálculo, el equipo entrega los valores de Mr en las condiciones que se presente en ese instante, y son almacenadas en un PDA vía bluetooth. Los datos obtenidos se procesan con su software aplicativo denominado LWDmod, al cual se le debe ingresar datos iniciales o valores semilla además de configurar parámetros del material que se compone la capa para iniciar los cálculos mediante un proceso de iteración.

También se analiza en este informe la confiabilidad de los datos obtenidos por el equipo LWD en un área de prueba, con el fin de realizar mediciones y obtener datos de Módulo Resiliente de capas granulares, para poder llevar un control en la ejecución de obras viales de forma confiable.

Para fines de este informe se tomaron datos de la evaluación realizada para el Servicio de Gestión Vial por Niveles de Servicio de la Red N°03 del Proyecto de Redes Viales Regionales Integrando el Cusco en la Red 3A Tramo V: Colca – La Quebrada – Quellouno – Cháhuas (km 0+000 al km 83+810), donde se evaluó la capa de base con el fin de verificar el número estructural (SN) requerido en los términos de referencia de dicho proyecto. Para fines de comparación se hizo uso de los ábacos y fórmula para capas de base de la Guía Aashto 1993.

Se concluye que con el método no destructivo con el LWD, se puede llegar a verificar el número estructural de las capas granulares de un pavimento flexible con la obtención del módulo de la capa, y generar una alternativa de medición práctica y de rápida operación con valores aceptables de confiabilidad.

Los datos obtenidos pueden variar al cambiar las condiciones de densidad y humedad que involucran la compactación y el tipo de material.

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1.- Estado de esfuerzos provocado en la subrasante por el paso de un vehículo en movimiento. ....	10
Figura 2.- Partes del equipo LWD .....	13
Figura 3.- Equipo LWD armado con carga de 10kg .....	16
Figura 4.- Datos en pantalla del PDA.....	18
Figura 5.- Revisión de datos en pantalla del PDA .....	19
Figura 6.- Distribución de puntos en sector de prueba .....	22
Figura 7.- Capa de base granular .....	23
Figura 8.- Distribución de controles de compactación .....	24
Figura 9.- Correlación de Eo para 10 y 15 kg.....	27
Figura 10.- Correlación de Eo para 10 y 20 kg.....	27
Figura 11.- Correlación de Eo para 15 y 20 kg.....	28
Figura 12.- Correlación de Em para 10 y 15 kg.....	28
Figura 13.- Correlación de Em para 10 y 20 kg .....	29
Figura 14.- Correlación de Em para 15 y 20 kg.....	29
Figura 15.- Gráfico de deflectometría (km 0+000 – km 83+810) .....	34
Figura 16.- Gráfico de módulos de superficie (km 0+000 – km 83+810) .....	35
Figura 17.- Gráfico de módulos de subrasante (km 0+000 – km 83+810) .....	36
Figura 18 .- Abaco de diseño Aashto, coeficiente estructural a2 para base granular .....	39
Figura 19.- Medición del módulo en la capa superficial.....	44
Figura 20.- Medición del módulo en la superficie de la capa subyacente .....	45

## LISTA DE CUADROS

	<b>Pág.</b>
Cuadro 1.- Configuración de amortiguadores de carga.....	15
Cuadro 2.- Valores de relación de Poisson .....	17
Cuadro 3.- Resultado de módulos obtenidos en prueba de confiabilidad .....	25
Cuadro 4.- Coeficientes de correlación obtenidos .....	30
Cuadro 5.- Estadística de deflexiones.....	33
Cuadro 6.- Estadística de Módulos .....	33
Cuadro 7.- Puntos observados .....	37
Cuadro 8.- Módulos promedio por sectores .....	38
Cuadro 9.- Módulos y Coeficiente $a_2$ del ábaco Aashto.....	40

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

$a$	:	Radio del plato
$a_2$	:	Coefficiente estructural de capa de base
$C$	:	Módulo a nivel de la tensión de referencia
CBR	:	California Bearing Ratio
$d_0$	:	Deflexión en el centro
$e$	:	Espesor de capa
$E$	:	Módulo de subrasante
$E_{BS}$	:	Módulo de la capa de base
$E_m$	:	Módulo de subrasante
$E_o$	:	Módulo de superficie en deflexión
$f$	:	Factor de distribución de carga
kg	:	Kilogramo
kN	:	Kilo newton
kPa	:	Kilo pascales
LWD	:	Light Weight Deflectometer
mm	:	milímetros
MPa	:	Mega pascales
$M_r$	:	Módulo resiliente
$n$	:	Exponente de la no linealidad
PC	:	Personal Computer
PDA	:	Personal Digital Assistant
psi	:	Libras por pulgada cuadrada
SN	:	Numero estructural
$\mu m$	:	Micrómetros
$\sigma$	:	Varianza
$\sigma_a$	:	Esfuerzo al nivel de referencia atmosférico
$\sigma_0$	:	Esfuerzo bajo el plato
$\sigma$	:	Esfuerzo al nivel
$\nu$	:	Relación de Poisson
$\mu$	:	Coefficiente de variación

## INTRODUCCIÓN

El aumento de la infraestructura vial y la conservación de estas en nuestro país, sumados a la aceleración de su ejecución, lleva a que se pueda hacer uso de nuevas tecnologías de medición que simplifiquen las labores y nos provean de datos confiables en forma rápida. Una nueva tecnología con poco uso en nuestro medio es el uso del equipo LWD en las evaluaciones de capas granulares en pavimentos flexibles, con el fin de encontrar casi directamente el Mr (Módulo Resiliente) de la capa evaluada.

En los últimos años el incremento de la demanda por dispositivos automatizados cada vez más simples de usar, ha ocasionado que se haga uso de este instrumento, pero el uso de nueva tecnología en nuestro medio lleva un tiempo de adaptación y aceptación, pues debe ser probado y comprobado sus bondades.

En este informe se desea describir el manejo adecuado del equipo LWD, verificar su confiabilidad y realizar la evaluación de capas granulares que involucran la estructura de un pavimento.

## CAPÍTULO I: MÉTODO DE EVALUACIÓN DE CAPAS GRANULARES CON EL EQUIPO LWD

### 1.1 METODOLOGÍA

El Deflectómetro de Impacto Liviano (Light Weight Deflectometer – LWD) es un equipo que permite evaluar en terreno el Módulo Resiliente ( $M_r$ ) que los métodos actuales de diseño estructural de pavimentos flexibles, incluida la nueva Guía de Diseño AASHTO 2008, utilizan como indicador de la capacidad estructural de las capas granulares.

La utilización de este equipo está enfocado como una herramienta de control in-situ de las capas granulares colocadas, considerando que el principal aporte de las capas granulares de un pavimento flexible es su capacidad estructural.

El parámetro que describe de mejor forma la capacidad estructural de estos materiales es el Módulo Resiliente ( $M_r$ ), que corresponde al módulo elástico medido luego de la aplicación de cargas cíclicas, estado en el cual los materiales granulares tienen un comportamiento elástico o resiliente.

Esta metodología utiliza la Deflectometría de Impacto, que es una tecnología que permite evaluar el módulo resiliente in-situ de un pavimento y de las capas que lo componen. Esta información se obtiene aplicando una carga dinámica a la capa a evaluar y registrando su deformación a través de sensores. Con los datos de la deflexión y utilizando la metodología de retrocálculo, el equipo entrega los valores de  $M_r$  en las condiciones que se presente en ese instante.

#### ***Algoritmo de cálculo del módulo elástico***

Para determinar el módulo elástico, el equipo determina la rigidez estática, calculada a partir de los valores máximos de fuerza y deflexión los cuales son inducidos mediante una carga dinámica que puede variar entre 10, 15 o 20 kg, con una caída variable hasta 85 cm; dicha carga es repartida mediante el contacto del equipo con el suelo por una placa de carga que también puede ser variable entre diámetros de 10, 15 y 30 cm., y opcionalmente de 20 cm.

La magnitud de la fuerza del impacto se determina a partir de mediciones reales con una celda de carga de precisión, midiendo la historia de tiempo

y el valor máximo de la fuerza del impacto de las configuraciones de peso estándar de 10 kg o las opcionales de 15 kg o 20 kg.

La historia de tiempo de la deflexión máxima al centro y el valor máximo se mide a través de un agujero en la placa de carga usando un transductor sísmico (geófono) de alta precisión, opcionalmente el equipo posee 2 geófonos adicionales para complementar datos entre 30 y 60 cm del centro de la placa.

La electrónica del LWD Dynatest está interconectada a una PDA a través de una conexión inalámbrica Bluetooth donde se recibe los datos.

Los datos recibidos se descargan a una PC y es procesada mediante el programa LWDmod, al cual se le debe ingresar datos iniciales o valores semilla para iniciar los cálculos mediante un proceso de iteración.

Dentro de la metodología de cálculo que utiliza el programa se definen las ecuaciones siguientes:

$$E_0 = \frac{f * (1 - \nu^2) * \sigma_0 * a}{d_0}$$

Dónde:

$E_0$  = Módulo de superficie en deflexión (MPa)

$f$  = Factor de distribución de carga

$\nu$  = Relación de Poisson

$\sigma_0$  = Esfuerzo bajo el plato (kPa)

$a$  = Radio del plato (mm)

$d_0$  = Deflexión en el centro (um)

Además:

$$E = C * \left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^n$$

Dónde:

$E$  = Módulo de subrasante (MPa)

$C$  = Módulo a nivel de la tensión de referencia (MPa)

$\sigma$  = Esfuerzo al nivel (kPa)

$\sigma_a$  = Esfuerzo al nivel de referencia atmosférico (kPa)

$n$  = Exponente de la no linealidad

## 1.2 CONCEPTO DE RESILENCIA

Cuando un vehículo circula sobre el pavimento, los neumáticos transmiten cargas que son absorbidas por la estructura, entonces un elemento diferencial de suelo ubicado en la subrasante, estará sometido a esfuerzos que a su vez inducen un estado de deformaciones, tal como se muestra en la figura N°1. Si se considera al material de subrasante, con un comportamiento elástico, isotrópico y homogéneo, hipótesis básicas de la mecánica de suelos, los esfuerzos y las deformaciones se relacionarán con el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, propios del material.

La reacción, está en función de las características propias de los materiales que conforman el pavimento y donde las cargas impuestas por el tránsito tienen un carácter dinámico con muy cortos tiempos de aplicación. Luego la deformación total inducida, se recupera al cesar la carga aplicada.

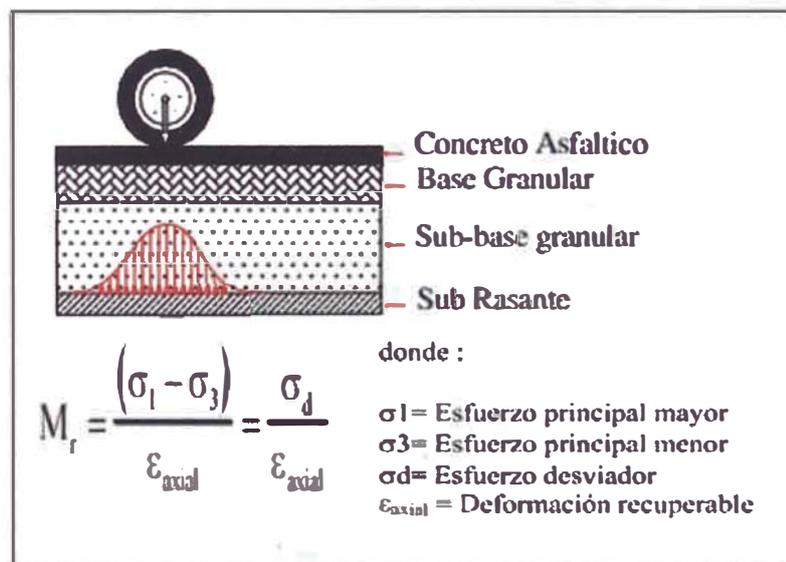


Figura 1.- Estado de esfuerzos provocado en la subrasante por el paso de un vehículo en movimiento.

Fuente: XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil – Iquitos 2003

### 1.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El Deflectómetro de Impacto Liviano (Light Weight Deflectometer – LWD) consta principalmente de las siguientes partes como se muestra en la figura N°2 y se describen a continuación.

Mango sujetador de carga.- Posee un sistema imantado el cual puede sujetar o soltar las cargas imantadas sujetas a su parte inferior, este mango puede ajustarse fácilmente al tubo guía mediante un sistema de liberación rápida ajustable.

Pestillo de seguridad.- Mediante el cual por seguridad sujeta la carga al mango enganchándola.

Gatillo de liberación de carga.- Permite desactivar la atracción de imán entre el mango y la carga para que esta caiga.

Carga dinámica.- Posee una masa estándar de 10 kg y adicionalmente 2 cargas de 5 kg las cuales se adhieren una a la otra por medio de pernos, estas cargas poseen imanes en la parte superior para poder adherirse al mango.

Tubo guía de carga.- Posee tubo de acero con rosca y escala en bajo relieve que sirve como eje guía del peso, que permite un ajuste fácil de la altura de caída deseada.

Amortiguador de carga.- Consta de 2 amortiguadores combinables para cargas de 10, 15 y 20 kg de color negro y plomo.

Unidad electrónica.- Consta de 4 baterías recargables AA Ni-Mh que forman el sistema de alimentación de energía para emitir señal bluetooth con una duración de aproximada de 12 horas de uso continuo.

Palanca de centrado.- Esta palanca sirve para garantizar que el geófono central este bien centrado y asentado.

Placas de carga de  $\varnothing=150, 200$  y  $300$  mm.- Posee un sistema de doble placa de  $300$  mm y  $150$  mm para permitir ensayos en la misma posición con dos tamaños de placa diferentes, además de una placa para cambiar a un  $\varnothing=200$  mm.

Seguros de presión.- Estos seguros son giratorios y aseguran el equipo a la placa.

Celda de carga de precisión.- Este se encuentra interiormente al igual que el geófono central el cual registra el valor máximo de la fuerza de impacto.

Geófonos opcionales.- Adicionalmente posee 2 geófonos adicionales dispuestos en una barra indicadora de posición a  $30$  y  $60$  cm del centro.

Receptor digital (PDA).- El equipo se encuentra interconectado a través de una conexión inalámbrica Bluetooth, este recibe datos y los procesa, pudiendo visualizar numéricamente y gráficamente los datos.

Se adjunta como anexos un panel fotográfico que describe mejor las partes del equipo.

Se adjunta en anexos la norma ASTM E 2583 – 07

(Método de prueba estándar para Medición de deflexiones con Deflectómetro de Peso Liviano (LWD))

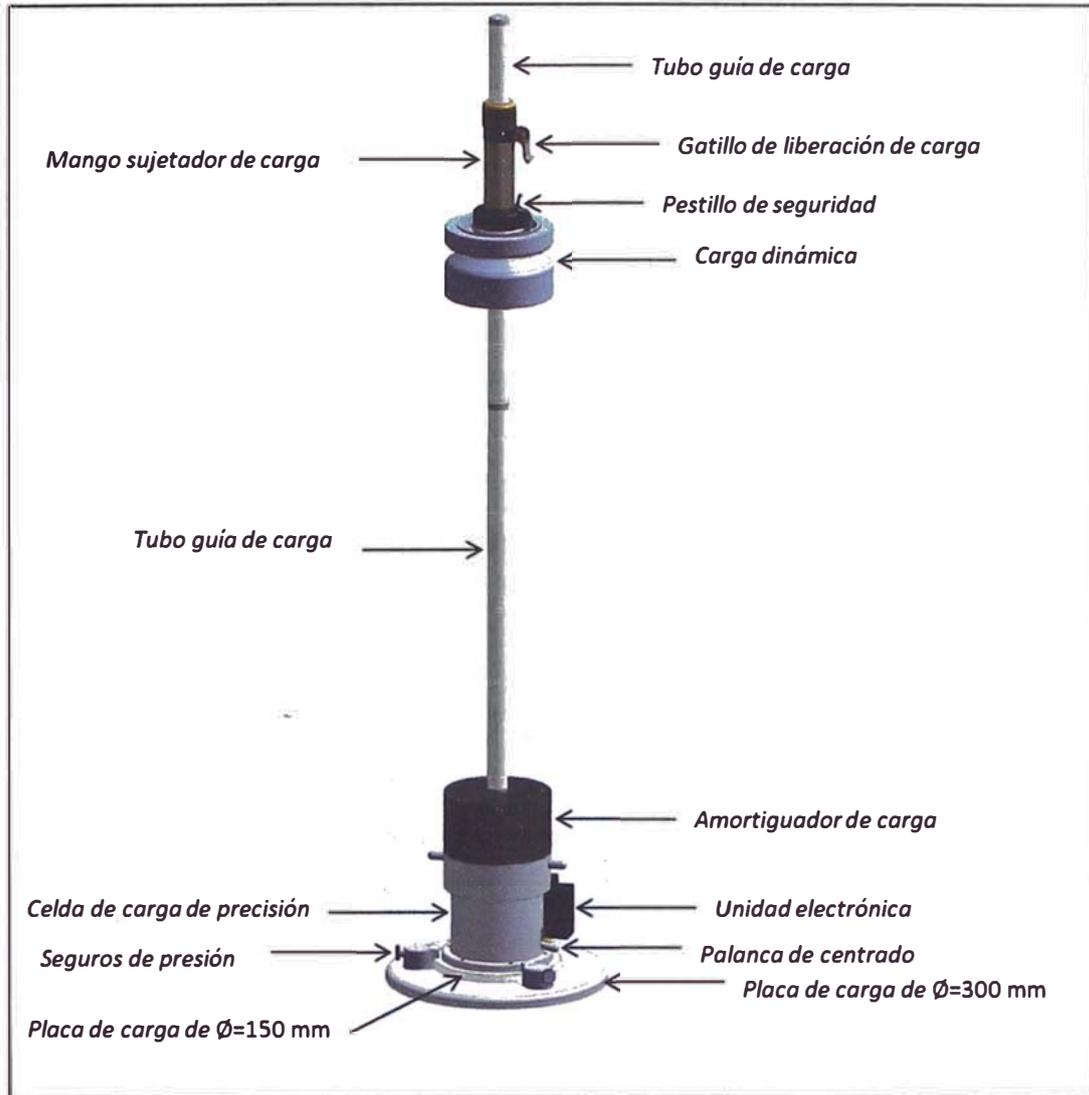


Figura 2.- Partes del equipo LWD

Fuente: Manual, "Dynatest 3031 LWD, 2010

## CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DE MANEJO DEL EQUIPO Y SOFTWARE

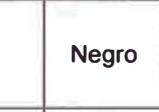
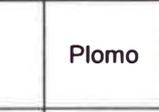
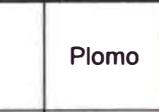
### 2.1 MANEJO DEL EQUIPO LWD

El manejo del equipo LWD comprende el armado del equipo antes iniciar las evaluaciones ya que este para su transporte es necesario tenerlo desarmado dentro de un maletín, luego de armado se prosigue con la configuración del PDA y se empieza la toma de datos.

#### Armado del equipo LWD:

- 1.- Se coloca sobre el punto a evaluar el jêbe de contacto que tiene el mismo diámetro de la placa de carga de 30 cm, este evita que se deslice la placa y se distribuyan los esfuerzos sobre toda el área de la placa de carga.
- 2.- Luego sobre el jêbe se coloca la placa de carga de 30 cm de diámetro ambos centrados.
- 3.- Se inserta la celda de carga de tal forma que este centrado y encaje el pin que señala la opción de medir con una placa de 300 mm de diámetro o de 150 mm según se desee.
- 4.- Se procede a asegurar la celda a la placa con los 3 seguros de presión.
- 6.- Se enrosca el tubo guía.
- 5.- Se ponen los amortiguadores de carga según la carga que se piensa utilizar para las mediciones, tomando en cuenta las configuraciones que se dan en el cuadro N°1.

Cuadro 1.- Configuración de amortiguadores de carga

Carga	Almohadilla	Color		Ubicación
10 kg	Gruesa	Negro		Arriba
	Delgada	Plomo		Debajo
15 kg	Gruesa	Plomo		Arriba
	Delgada	Negro		Debajo
20 kg	Gruesa	Plomo		Arriba
	Delgada	Plomo		Debajo

Fuente: Elaboración propia

- 6.- Se coloca la configuración de cargas de 10 kg, 15kg o 20kg según corresponda.
- 7.- Se coloca y ajusta el mango sujetador de carga a la altura que se considere necesaria.
- 8.- Se alza la carga para empezar los ciclos de carga dinámica quedando el equipo listo para hacer el impacto como se muestra en la figura N°3.

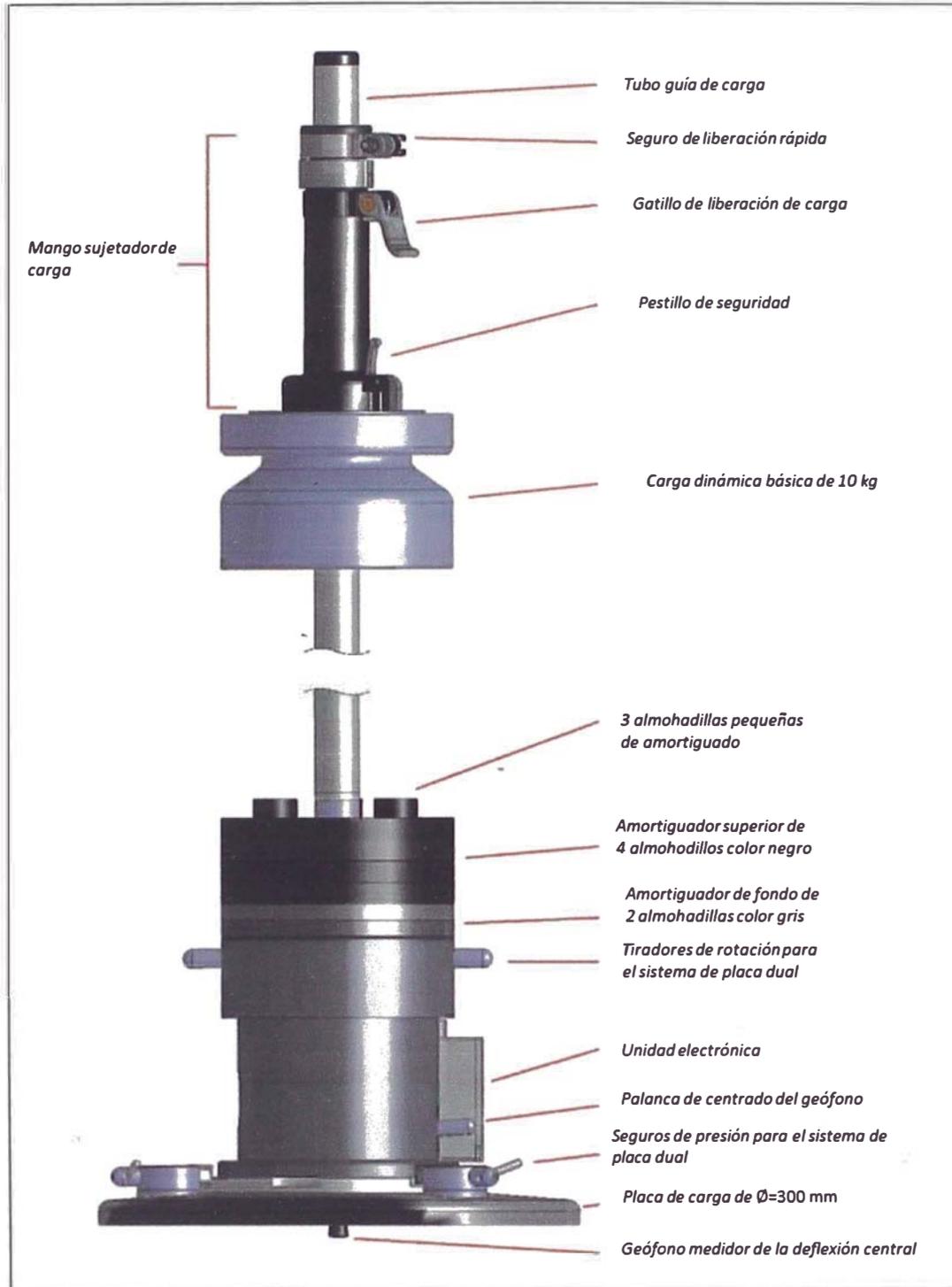


Figura 3.- Equipo LWD armado con carga de 10kg

Fuente: Manual, "Dynatest 3031 LWD, 2010"

### Configuración del receptor inalámbrico (PDA):

- 1.- Se activa la conexión inalámbrica Bluetooth del receptor digital del PDA.
- 2.- Para esto antes de iniciar cualquier medida se debe configurar el PDA en las condiciones en que se realizara la toma de datos, como seguidamente se mencionan.
- 3.- Se debe verificar que coincida la opción del diámetro de placa adoptado.
- 4.- Debe indicarse si se va usar solo un sensor o agregar los dos adicionales que ya serian sumando en número de 3 sensores (geófonos).
- 5.- Deberá verificarse que el valor de relación de Poisson coincida con el valor que se requiere para el cálculo, por defecto el equipo da un valor de 0.35 que referencia a materiales granulares, pudiendo este ser variado de acuerdo al tipo de material como se presenta a continuación en el cuadro N°2.

Cuadro 2.- Valores de relación de Poisson

Material	Relación de Poisson
Concreto asfáltico	0.30 a 0.40
Concreto hidráulico	0.10 a 0.20
Bases granulares	0.20 a 0.40
Suelos cohesivos	0.25 - 0.45
Suelos estabilizados con cemento	0.10 - 0.30
Suelos estabilizados con cal	0.10 - 0.30

Fuente: Uso y Calibración de Deflectómetros de Impacto en la Evaluación Estructural de Pavimentos", Publicación Técnica No 252 Sanfandila, Qro, 2004

- 6.- También debe verificarse el valor del factor de distribución de carga para que sea el adecuado a las características del terreno, debiendo ser para una distribución uniforme un valor de  $f=2$  (materiales granulares) y un  $f=\pi/2$  para el caso rígido (materiales cohesivos).

### Toma de datos:

- 1.- La toma de datos para un solo punto será un mínimo de 6 mediciones, pudiendo ser más si se requiere que el dato sea más estable o la variación sea mínima en los tres últimos datos.
- 2.- Cada medición corresponde a una caída de la carga.

- 3.- Los datos son recepcionados automáticamente por el sistema de conexión inalámbrica Bluetooth, el cual presenta en pantalla valores numéricos de deflexión en  $\mu m$  (micrómetros) y valores de módulo elástico de superficie en MPa (mega pascales), además de las gráficas.
- 4.- Cada punto a registrar deberá identificarse digitalmente antes de empezar las mediciones y poder llevar un registro de tomas.
- 5.- Los datos se aprecian en pantalla digital y se pueden revisar y eliminar como se muestra en la figura N°4 y N°5.

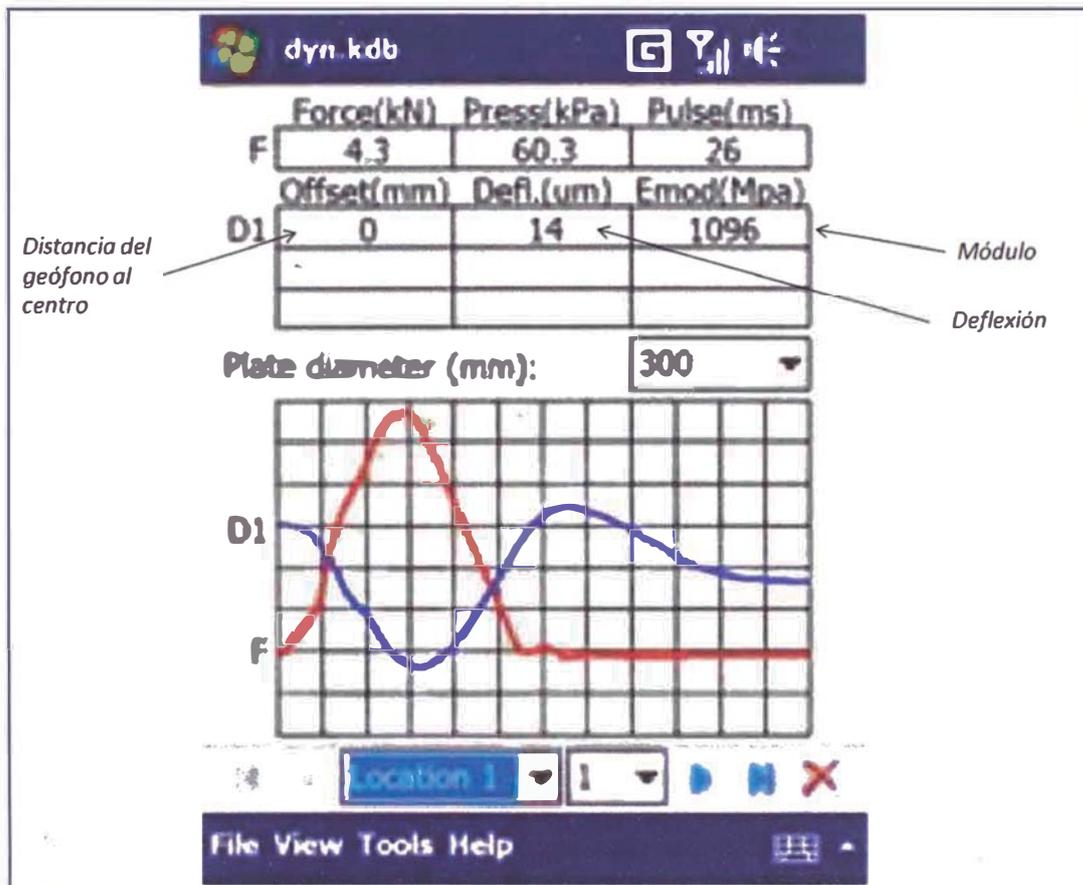


Figura 4.- Datos en pantalla del PDA

Fuente: Manual, "Dynatest 3031 LWD, 2010

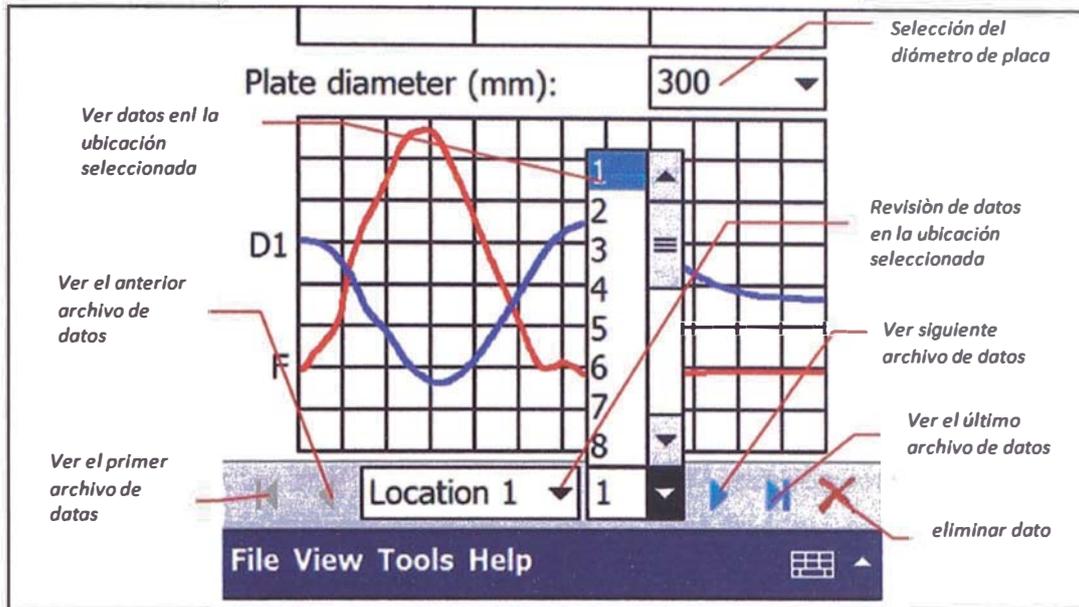


Figura 5.- Revisión de datos en pantalla del PDA

Fuente: Manual, "Dynatest 3031 LWD, 2010

## 2.2 INDICACIONES PARA UNA MEJOR TOMA DE DATOS

La toma de datos deberá ser la más confiable para obtener buenos datos, ya que una mala toma puede generar dudas y errores, por eso se debe tomar en consideración lo siguiente:

- 1.- Verificar que la capa superficial donde se desea evaluar sea uniforme y plana, esta no debe presentar irregularidades como superficie de apoyo para la placa de carga.
- 2.- Si la superficie presentara irregularidades estas deberán ser leves y podrán corregirse con una delgada capa de arena fina nivelante para que la distribución de la carga sobre la placa sea uniforme y se transmita de igual forma al terreno.
- 3.- No deberán hacerse mediciones sobre superficies muy húmedas o después de lluvia, pues en esa condición generan errores en la toma de datos.
- 4.- Verificar que los datos numéricos y gráficos que se aprecian inmediatamente en la pantalla del PDA sean razonables con lo que se espera obtener, las gráficas deben ser regulares y no distorsionadas.

- 5.- Describir si es posible, el tipo de material subyacente y adyacente cercano, así como la presencia de roca cercana al punto de evaluación, que puedan dar valores exagerados.

### 2.3 USO DEL SOFTWARE LWDmod

LWDmod es el programa de cálculo para PC bajo el cual se importan los datos obtenidos de los ensayos in-situ.

Describiremos brevemente el uso del software:

- 1.- Se descargan los archivos del PDA a la PC, estos archivos tienen una extensión kdb.
- 2.- Mediante el programa LWDmod se crea un nuevo proyecto con extensión mdb, dentro del cual se van a importar los archivos de datos kdb.
- 3.- Luego, los datos importados se proceden a editar, depurando posibles datos erróneos que no deberían entrar al cálculo y que no se eliminaron en campo.
- 4.- Se debe verificar o modificar la configuración de unidades y parámetros a ingresar como la relación de Poisson, el factor de distribución de carga, el diámetro del plato usado y datos semilla.
- 5.- Se procede al análisis de cada punto y del proyecto, definiendo con cuantos datos se desea hacer el cálculo.
- 6.- Definir el número de capas existentes.
- 7.- Deberán ingresarse valores iniciales o semilla de los siguientes parámetros, espesor (h) en mm de la capa, módulo de superficie (E) en MPa, supuesto de la capa, módulo a nivel de la tensión de referencia (C) en MPa y un valor de la no linealidad (n) que generalmente se inicia con un valor de cero.
- 8.- Se procede a calcular los resultados para cada punto o todo el proyecto con los valores iniciales ingresados.
- 9.- El programa LWDmod retroanaliza los módulos de capa, confirma el espesor de las capas y calcula el espesor de recapado necesario para asegurar que los diseños cumplan con las especificaciones.

Estos procesos se describen también en los anexos, con imágenes descriptivas de cada proceso en el software.

## 2.4 CALIBRACIÓN

La Calibración para este tipo de equipos; en primer nivel corresponde a la calibración propiamente dicha por parte de organismos certificados o acreditados, que realizan las comparaciones de los instrumentos de medición de los deflectómetros de impacto, contra patrones con trazabilidad a patrones primarios nacionales o internacionales; la calibración se centra en calibrar los transductores de deflexión y carga por instituciones acreditadas.

Es recomendable realizar comprobaciones de medición para saber la funcionalidad del equipo, dejando caer la carga al menos cinco veces y verificando la diferencia relativa para cada carga, esta no debería variar entre ellas más del 3%.

## 2.5 RENDIMIENTO

El sistema del LWD es alimentado por una batería recargable, proporciona aproximadamente 2000 mediciones o, lo que equivale a más de 12 horas de funcionamiento continuo.

El rendimiento de evaluaciones o de productividad con la manipulación de 2 personas es de 30 análisis localizados por hora; en las experiencias propias de evaluación con este equipo en tramos lineales continuos de carretera con el uso de una camioneta para su traslado, se han llegado a obtener rendimientos promedios en la evaluación, de 5 km/h con puntos evaluados a cada 200 m y de 2 km/h a cada 50 m.

## 2.6 COSTOS DEL EQUIPO Y EVALUACIÓN

El costo de este equipo con cotización a la fecha de setiembre de 2013 por distribuidores de Dynatest en el Perú fue de 39,367.75 dólares incluido el software aplicativo; se adjunta cotización del equipo en el anexo 07.

Los costos referidos a la evaluación pueden ser muy variables dependiendo de las características del servicio, aproximadamente el costo por punto evaluado puede bordear entre 30 a 40 soles, sin considerar los gastos referidos al operador, ayudante, movilidad, traslado, procesamiento de información y elaboración de informe.

### CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LA TOMA DE DATOS

En este capítulo se trata de determinar la confiabilidad de los valores que da el equipo desde el punto de vista de la repetitividad en la evaluación de un área de prueba, y su relación ante el uso de diferentes cargas.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE PRUEBA

Para la evaluación de la confiabilidad de los datos recepcionados por el equipo, se ha escogido un sector de carretera en el eje, correspondiente al km 55+600 de la Red 3A, Tramo 5: Colca – La Quebrada – Quellouno – Cháhuas, del Servicio de Gestión Vial por Niveles de Servicio de la Red N°03 del Proyecto de Redes Viales Regionales Integrando el Cusco, donde se evaluó la capa de base en un área de dimensiones cuadradas de 3 m de lado, el cual se subdividió en 36 partes de 0.5m por 0.5m, donde se realizaron pruebas en cada centro de las subdivisiones, las que se numeraron del 1 al 36, obteniendo datos del módulo de superficie y módulo de subrasante para cada punto, con sobrecargas de 10kg, 15kg y 20kg. En la figura N°6 se aprecia la distribución de los puntos y en la figura N°7 la distribución de la capa.

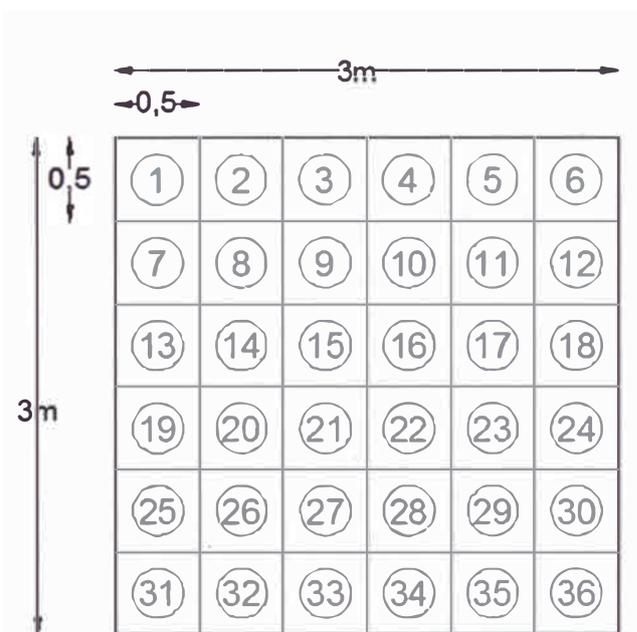


Figura 6.- Distribución de puntos en sector de prueba

Fuente. Elaboración propia

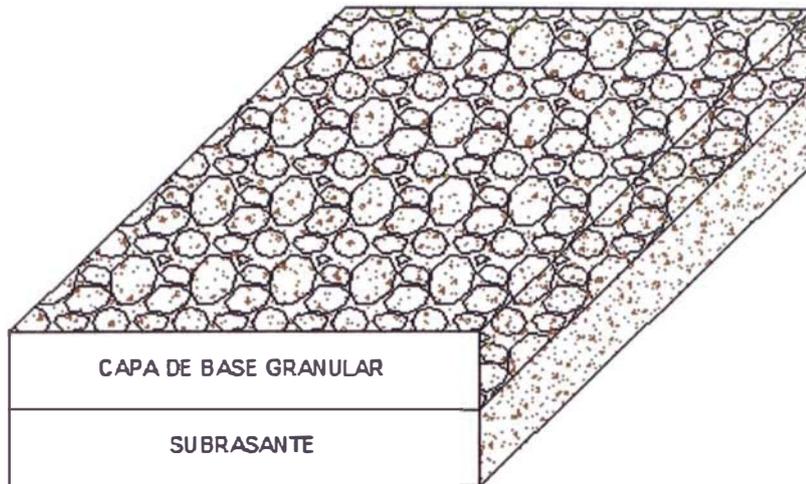


Figura 7.- Capa de base granular  
Fuente. Elaboración propia

### 3.2 TOMA DE DATOS

Los datos fueron tomados con el equipo LWD en cada punto establecido en orden correlativo del 1 al 36, evaluados todos primero con una carga de 10 kg, luego con 15 kg y finalmente 20 kg.

La toma de datos se realizó verificando las siguientes condiciones:

- Se verificó la uniformidad del material colocado y de la subrasante así como la compactación realizada, verificándose esta al 100% en 5 puntos distribuidos como se muestra en la figura N°8.
- Se verificó la uniformidad y forma plana de la superficie de base granular compactada, para una mejor distribución de esfuerzos.
- Se inspecciono el área a fin de que no exista presencia de protuberancias o agregado grueso expuesto en superficie directamente.
- Se realizó la evaluación en condiciones de clima favorables sin presencia de garuas o lluvia y temperatura ambiente estable alrededor de los 20° C.

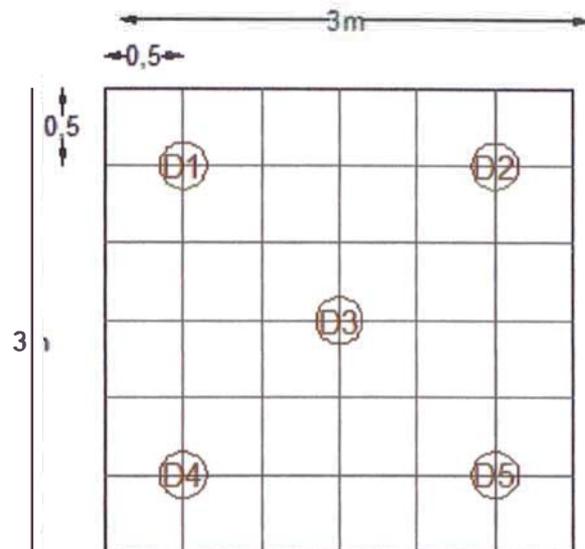


Figura 8.- Distribución de controles de compactación

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 ANALISIS ESTADÍSTICO DE DATOS OBTENIDOS

Luego de la toma de datos realizada se procedió a la descarga de estos y el procesamiento mediante la importación de los datos al programa LWDmod; para lo cual se ingresó los siguientes datos:

#### Datos de configuración:

Unidades: Configurado para el SI (Sistema Internacional).

Coefficiente de Poisson: Configurado para una distribución uniforme de suelo granular con un valor de 0.35.

Factor de distribución de carga: Configurado para una distribución uniforme de suelo granular con un valor de  $f=2$ .

Radio del plato de carga (mm): Configurado según lo usado en campo con un plato de radio = 150mm.

Presión de contacto por defecto (kPa): configurado para 100 kPa.

Módulo por defecto designado para el material (MPa): configurado para 300 MPa.

#### Datos semilla o iniciales:

Número de capas: En este caso se colocó un valor de 2, debido a que existe capa de Base y Subrasante.

**Espesor de capa  $h$ (mm):** En este caso la capa de base tiene un espesor de 170 mm.

**Módulo de Base  $E$  (MPa):** El valor inicial ingresado para el cálculo es para un CBR de 100% lo que equivale a 336 MPa utilizando la relación  $Mr=2555(CBR)^{0.64}$  establecida por la metodología de diseño Aashto, donde  $Mr$  está en unidades de psi, el cual dividido entre el factor de 145.04 nos da el valor en MPa.

**Módulo de Subrasante  $C$  (Mpa):** El valor adoptado como referencia es el valor obtenido del ensayo de CBR de subrasante el cual en este caso resulto ser un CBR de 10.3% para el sector evaluado según datos del proyecto, lo que en pascales corresponde a 78.4 MPa utilizando la relación  $Mr=2555(CBR)^{0.64}$ .

Los datos obtenidos se muestran en los anexos como cuadros de resultados de la evaluación, su estadística, así como su representación gráfica.

A continuación presentamos en el cuadro N°3 los resultados de módulos de capa de Base ( $E_o$ ) y Subrasante ( $E_m$ ), Para cargas de 10, 15 y 20 kg respectivamente.

Cuadro 3.- Resultado de módulos obtenidos en prueba de confiabilidad

N°	Carga de 10 kg		Carga de 15 kg		Carga de 20 kg	
	$E_m$	$E_o$	$E_m$	$E_o$	$E_m$	$E_o$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1	211	310	206	310	208	309
2	186	283	185	282	176	279
3	187	283	185	282	174	279
4	220	314	221	322	215	313
5	185	283	183	282	168	275
6	193	290	190	293	179	287
7	170	263	164	265	155	258
8	185	280	183	282	171	279
9	169	266	165	265	157	265
10	162	257	159	257	154	256
11	207	306	208	304	194	299
12	188	283	185	287	178	279
13	203	298	204	301	198	294
14	192	287	184	287	180	285

N°	Carga de 10 kg		Carga de 15 kg		Carga de 20 kg	
	Em	Eo	Em	Eo	Em	Eo
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
15	203	298	196	293	181	289
16	205	298	202	301	199	298
17	222	319	216	316	212	309
18	221	314	205	307	200	306
19	169	263	167	265	154	258
20	218	314	221	316	210	311
21	192	287	192	287	171	279
22	167	260	170	265	154	258
23	174	273	173	272	165	271
24	196	294	198	298	193	292
25	167	266	167	265	151	258
26	162	260	162	261	160	261
27	206	302	208	307	197	301
28	185	280	189	287	176	281
29	164	260	163	265	160	258
30	229	320	214	313	212	311
31	198	294	191	290	184	287
32	196	294	197	296	184	287
33	187	283	182	285	177	279
34	174	270	177	275	162	267
35	211	306	201	304	194	299
36	184	280	190	287	174	279
<b>Mín.</b>	<b>162</b>	<b>257</b>	<b>159</b>	<b>257</b>	<b>151</b>	<b>256</b>
<b>Máx.</b>	<b>229</b>	<b>320</b>	<b>221</b>	<b>322</b>	<b>215</b>	<b>313</b>
<b>Prom.</b>	<b>191,3</b>	<b>287,2</b>	<b>189,0</b>	<b>288,2</b>	<b>179,9</b>	<b>283,2</b>
$\sigma$	<b>18,6</b>	<b>18,4</b>	<b>17,4</b>	<b>17,5</b>	<b>18,8</b>	<b>17,4</b>
$\square$ (%)	<b>9,7</b>	<b>6,4</b>	<b>9,2</b>	<b>6,1</b>	<b>10,4</b>	<b>6,2</b>

Fuente: Elaboración propia

Se presenta a continuación los gráficos y el coeficiente de correlación  $R^2$  para los valores de los módulos de Base (Eo) y Subrasante (Em) respectivamente.

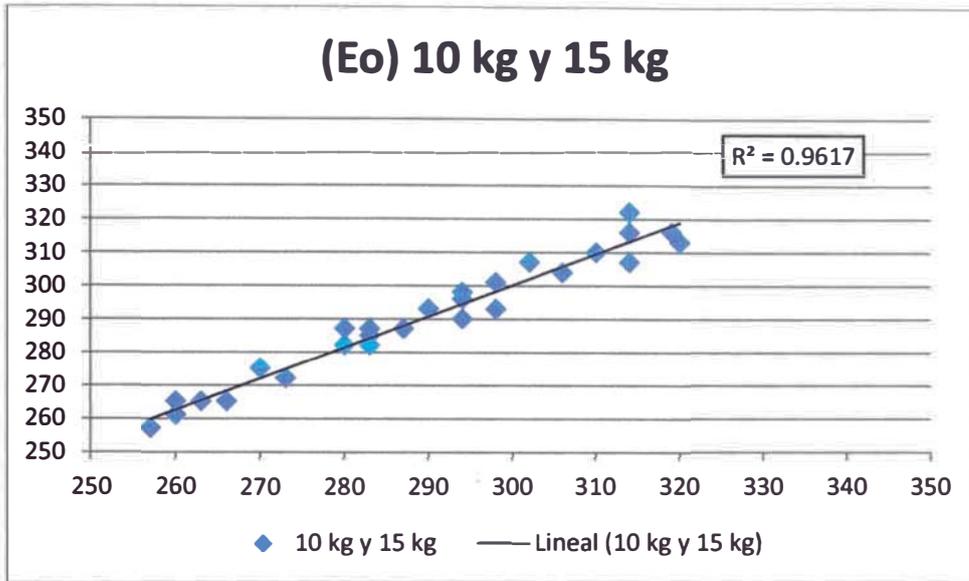


Figura 9.- Correlación de Eo para 10 y 15 kg

Fuente: Elaboración propia

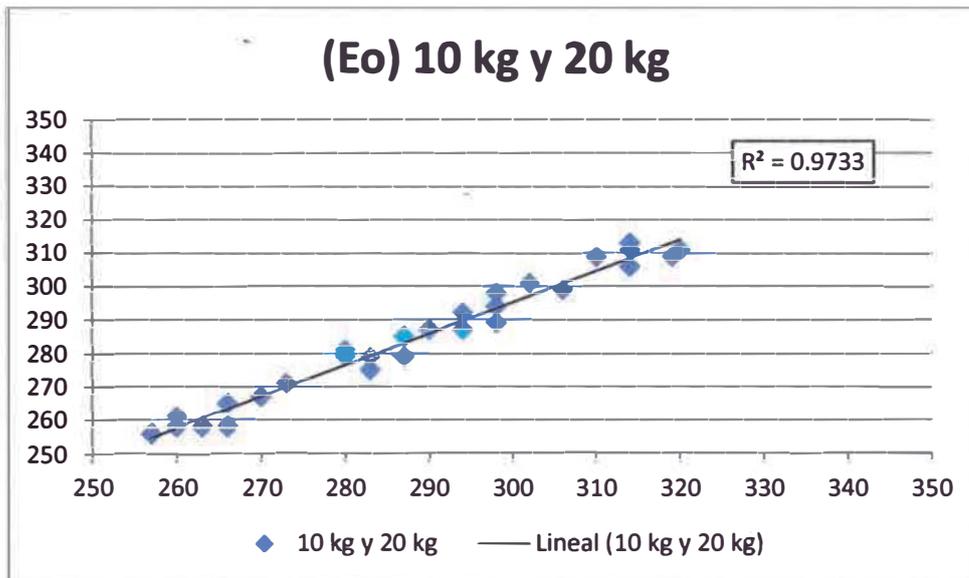


Figura 10.- Correlación de Eo para 10 y 20 kg

Fuente: Elaboración propia

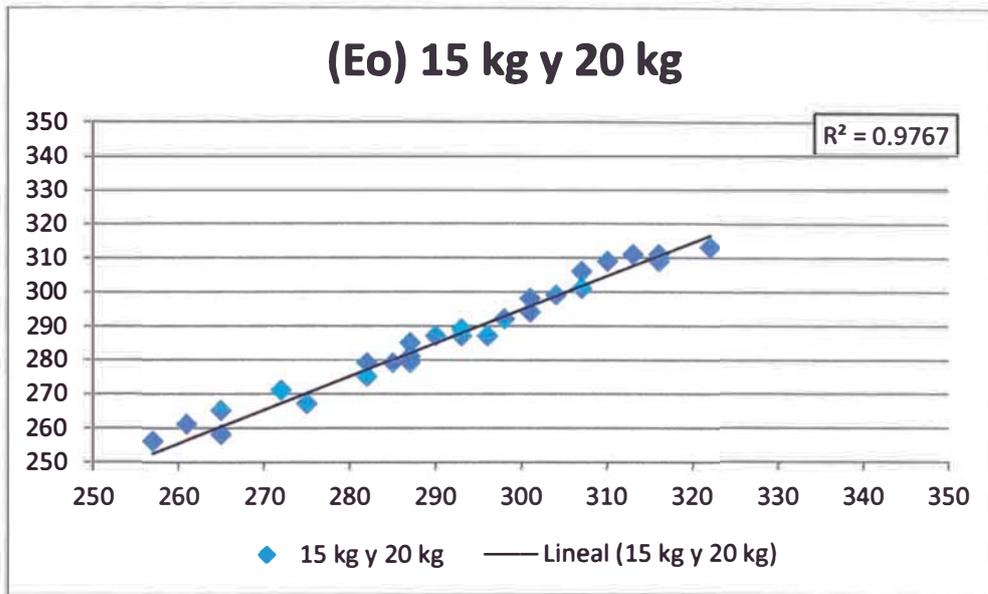


Figura 11.- Correlación de Eo para 15 y 20 kg

Fuente: Elaboración propia

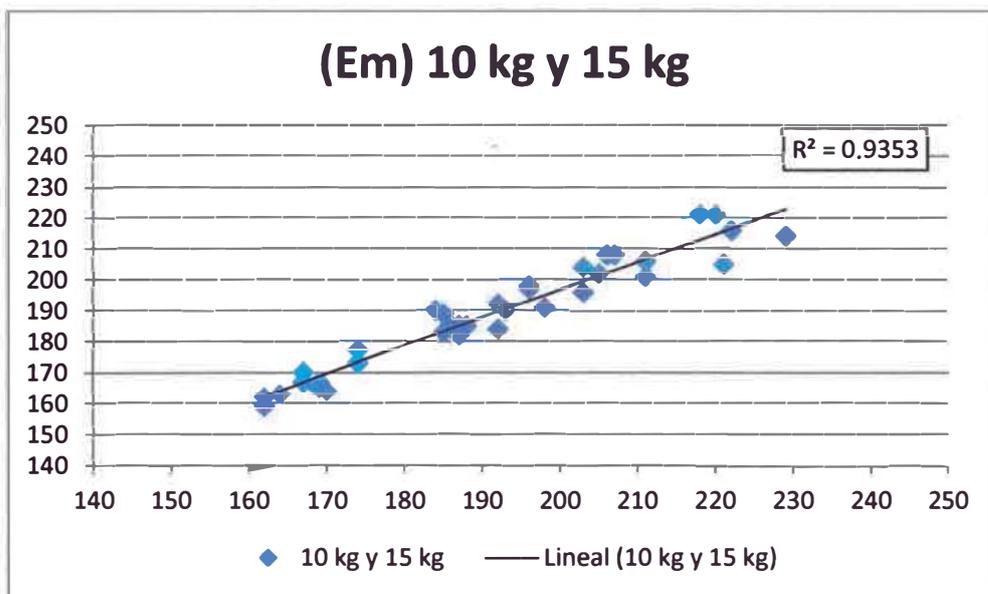


Figura 12- Correlación de Em para 10 y 15 kg

Fuente: Elaboración propia

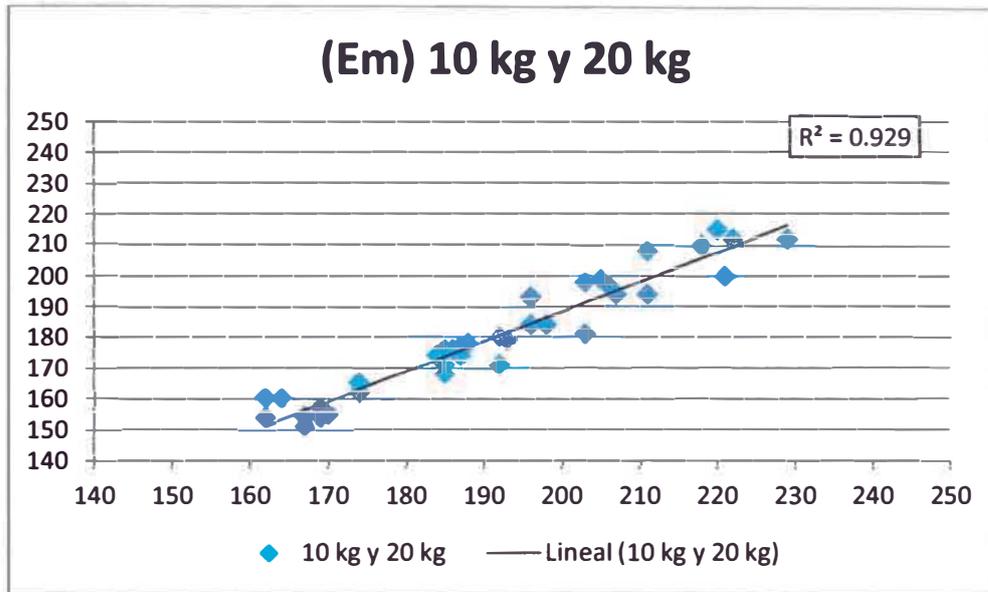


Figura 13.- Correlación de Em para 10 y 20 kg  
Fuente: Elaboración propia

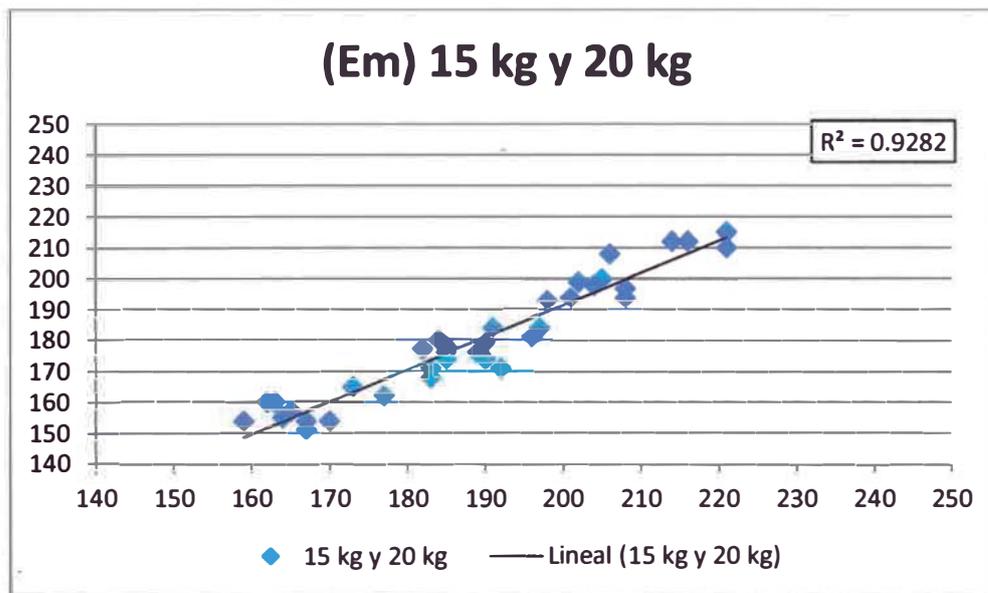


Figura 14- Correlación de Em para 15 y 20 kg  
Fuente: Elaboración propia

Tenemos el siguiente resumen de resultados de coeficientes de correlación obtenidos que se muestra en el cuadro N°4.

Cuadro 4.- Coeficientes de correlación obtenidos

Módulos	Cargas	Coef. R <sup>2</sup>
Eo (Base)	10 kg y 15 kg	0,9617
	10 kg y 20 kg	0,9733
	15kg y 20 kg	0,9767
	<b>Promedio</b>	<b>0,9706</b>
Em (Subrasante)	10 kg y 15 kg	0,9353
	10 kg y 20 kg	0,9290
	15kg y 20 kg	0,9282
	<b>Promedio</b>	<b>0,9308</b>

Fuente: Elaboración propia

Los datos de los coeficientes de correlación R<sup>2</sup> varían, para el caso de subrasante son aceptables hasta un 93% y para la base en un 97%; lo cual resulta algo lógica la menor diferencia en los valores de base en comparación con los de subrasante ya que en la base se encuentra un material seleccionado y relativamente uniforme en comparación con la subrasante.

## CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE CAPAS GRANULARES IN SITU

### 4.1 UBICACIÓN

La evaluación estructural de capas granulares para fines de este informe se realizó con el Deflectómetro de impacto liviano LWD realizado para el Servicio de Gestión Vial por Niveles de Servicio de la Red N°03 del Proyecto de Redes Viales Regionales Integrando el Cusco, para un sector de avance del proyecto, ubicado en el departamento del Cusco, provincia de Calca, distritos de Calca y Yanatile; el tramo evaluado fue el correspondiente a la Red 3A Tramo V: Colca – La Quebrada – Quellouno – Cháhuares.

### 4.2 EVALUACIONES IN SITU

Se realizaron las evaluaciones in-situ sobre la capa de base, distribuyendo los puntos evaluados a cada 200m a lo largo de la vía y alternando en lados derecho, izquierdo y eje, realizando todos los ensayos sobre una superficie lo más plana posible para asegurar la mejor distribución del esfuerzo transmitido de la placa a la capa de base granular.

El equipo empleado para las mediciones fue el Deflectómetro de Impacto Liviano o Light Weight Deflectometer (LWD) modelo 3031 de Dynatest, que es un sistema de evaluación de placa de carga dinámica, que se usa típicamente para la medición de la capacidad portante en capas de subrasante, subbase y base.

La evaluación realizada estuvo comprendida dentro del Tramo V (Colca – Quebrada – Quellouno – Cháhuares) y comprendió las progresivas de la vía entre los km 0+000 al km 83+810.

Se realizaron las mediciones con una carga dinámica de 20kg, que generó en promedio una carga de 10.9 kN sobre el plato de carga de 300mm de diámetro, generando un esfuerzo promedio sobre la superficie de rodadura de 154 kPa.

En general se realizaron 6 golpes de medición en cada punto y se realizaron evaluaciones en un total de 412 puntos, repitiéndose en algunos puntos el ensayo para confirmar la data. Todos los ensayos se realizaron usando el

plato de carga de 300 mm de diámetro y se utilizó solamente el geófono central sin geófonos adicionales.

#### **4.3 DATOS SEMILLA**

Se tomaron de referencia para tener una idea de la capacidad del material de subrasante, los resultados de ensayos CBR de subrasante del proyecto, y un CBR para material de base de 80% como un dato inicial o semilla para el cálculo, así como el espesor de capa de la base granular que en este caso es de un espesor de 170 mm pero las mediciones se realizaron sobre una capa de mortero asfáltico (Slurry Seal) de 10 mm de espesor que se le añadió en algunos sectores y otros con monocapa, considerando entonces un espesor de 180 mm pero teniendo en cuenta que no es un aporte estructural.

#### **4.4 PROCESAMIENTO DE DATOS**

Se depuro la data descartando las mediciones repetidas de menor aproximación y analizando los datos más fiables, quedando un total de 412 puntos evaluados.

El factor de distribución de carga utilizado fue de  $f=2$  que corresponde a materiales granulares.

También se ingresó un valor de relación de Poisson de 0.35 correspondiente a un suelo granular.

#### **4.5 RESULTADOS OBTENIDOS**

Se presentan los resultados de deflexiones, módulos de superficie y módulos de subrasante, que en resumen estadístico dieron resultados como se muestran en los cuadros N°5 y N°6.

Cuadro 5.- Estadística de deflexiones

Valores estadísticos	Deflexiones (um)
Valor Mín.	18
Valor Máx.	314
Promedio	121
Desv. Estándar( $\sigma$ )	44
Coef. Variación $\square$ (%)	36

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 6.- Estadística de Módulos

Valores estadísticos	Módulo de Subrasante Em (Mpa)	Módulo de Base Eo (Mpa)
Mín.	59	124
Máx.	1122	3033
Prom	281	395
Desv. Estándar( $\sigma$ )	149.5	213.0
Coef. Variación $\square$ (%)	53.2	53.9

Fuente: Elaboración propia

En los anexos se adjunta la data descargada al detalle con 6 datos por punto, y se presentan los datos obtenidos del procesamiento con el promedio de los tres últimos datos de cada punto evaluado.

Los gráficos de deflexiones, módulos de superficie y subrasante respectivamente se presentan a continuación.

**Deflectometría Red 3A**  
**Tramo 5: Dv. Chahuares - Quellouno - Quebrada - Colca**  
**(Km 0+000 - Km 83+810)**

◆ Def. (um)

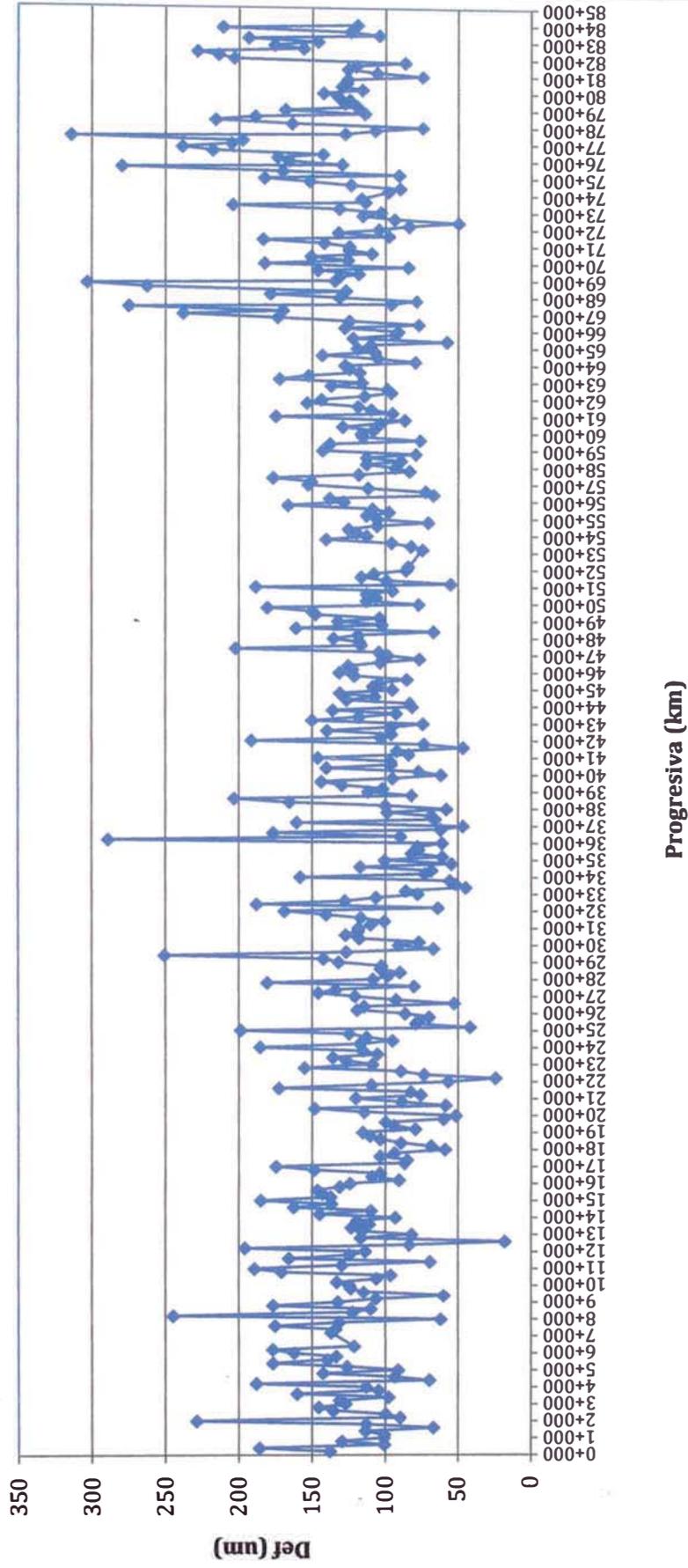


Figura 15.- Gráfico de deflectometría (km 0+000 – km 83+810)

Fuente: Elaboración propia

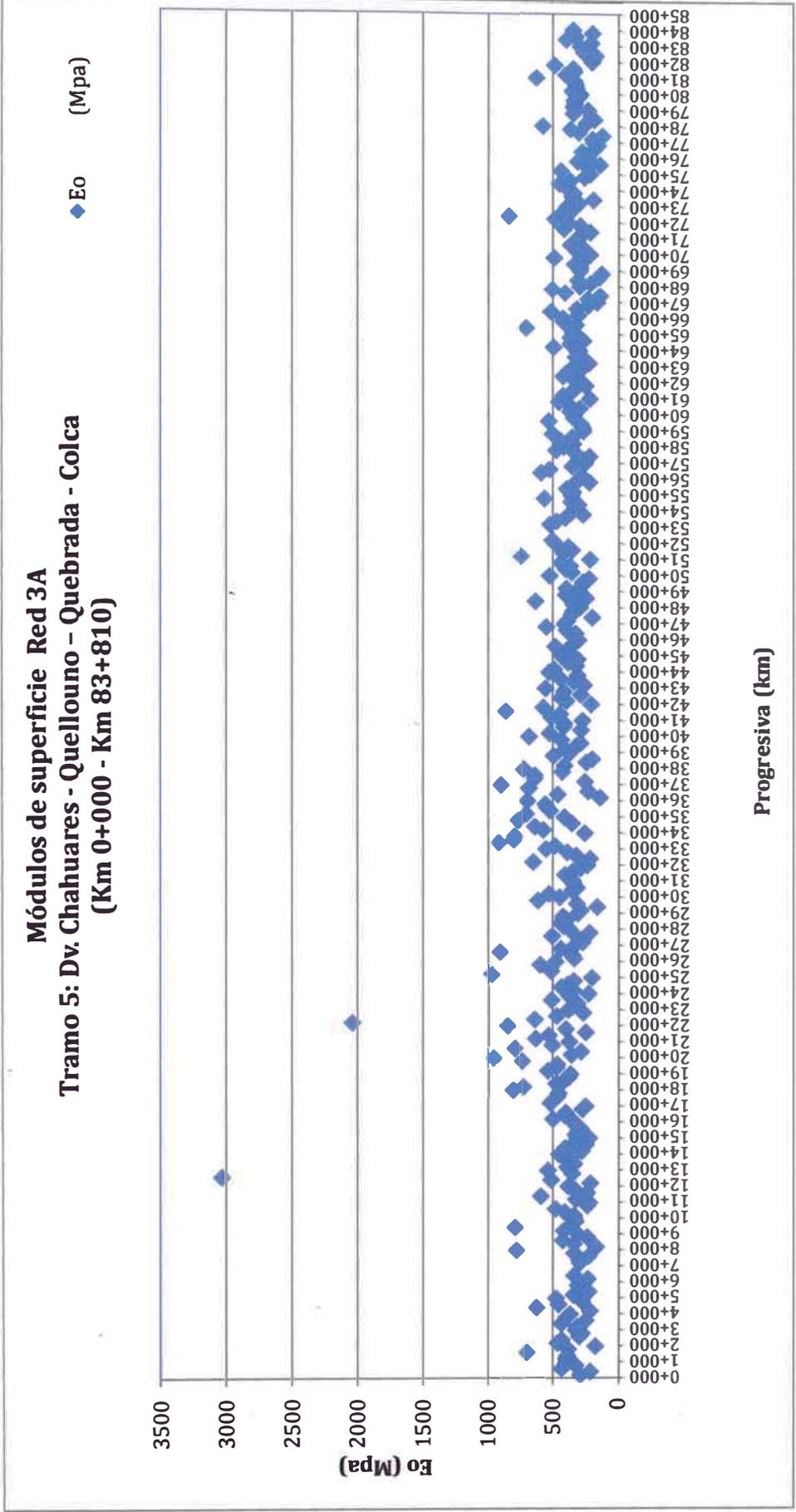


Figura 16.- Gráfico de módulos de superficie (km 0+000 – km 83+810)

Fuente: Elaboración propia

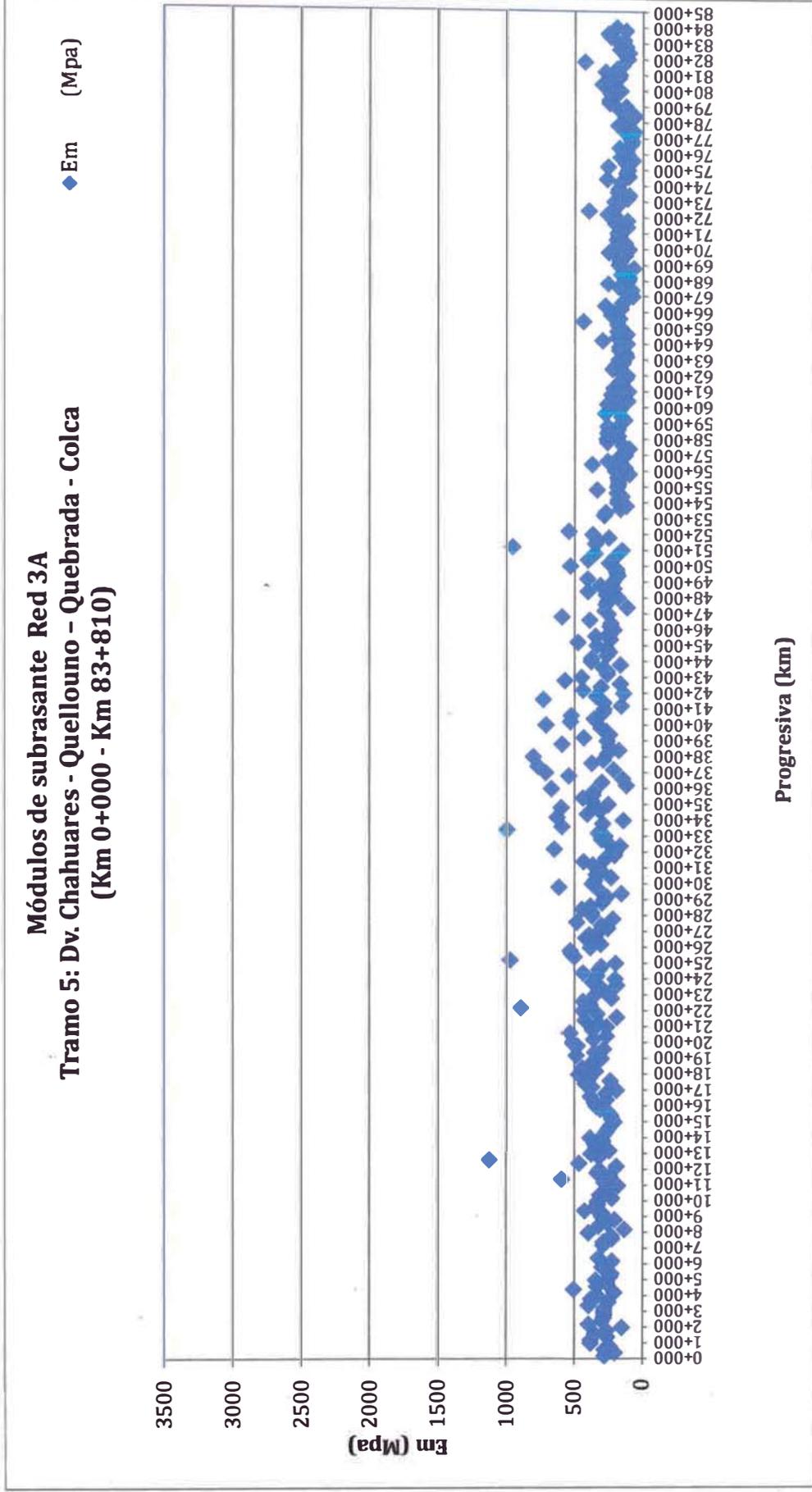


Figura 17.- Gráfico de módulos de subrasante (km 0+000 – km 83+810)

Fuente: Elaboración propia

En el procesamiento de datos se pudo observar valores aislados en donde las deflexiones y módulos varían del resto considerablemente y guardan relación de ocurrencia en el mismo punto, es decir si en ese punto la deflexión fue muy alta, los módulos tendrán valores muy bajos y viceversa, dichos puntos de observación se muestran en el cuadro N°7 donde se describe su posible razón.

Cuadro 7.- Puntos observados

Progresiva (km)	Deflexión (um)	Mod. SR	Mod. Superficie	Observación
12+600	18	1122	3033	Subyace afloramiento rocoso
22+200	25	890	2038	Subyace afloramiento rocoso
68+600	303	96	149	Posiblemente baja compactación
77+400	314	65	124	Posiblemente baja compactación

Fuente: Elaboración propia

Valores muy altos de los módulos hacen suponer la existencia de una subrasante muy compacta o densa, o presencia de roca subyacente lo cual se pudo apreciar en algunos puntos visualmente ante la presencia de talud de roca.

Valores muy bajos de módulo de superficie hacen suponer una mala compactación del material superficial o presencia de un suelo blando en subrasante, en estos casos haciendo la equivalencia según el ábaco de la Guía Aashto 1993 para material de base, se relaciona el valor de CBR y módulo obtenido, así para el km 68+600 su valor de 149 MPa, correspondería a un CBR de 38%, y para el km 77+400 el valor de 124 MPa, correspondería a un CBR de 27% los cuales son bajos comparados con el 80 % mínimo requerido para este proyecto y que corresponde a 193 MPa.

A continuación se presenta en el cuadro N°8, los promedios de los módulos obtenidos según la sectorización por CBR de subrasante del proyecto.

Cuadro 8.- Módulos promedio por sectores

Sectores según CBR de subrasante					Mod. SR (prom)	Mod. Sup (prom)	e base (mm)
					LWD (Mpa)	LWD (Mpa)	
TRAMO 5: COLCA – LA QUEBRADA – QUELLOUNO - CHAHUARES	km 0+000 - km 83+810	1	00+000	16+800	11.3%	307	180
		2	16+800	28+600	12.2%	376	
		3	28+600	34+200	20.1%	357	
		4	34+200	56+700	10.3%	326	
		5	56+700	63+100	14.9%	181	
		6	63+100	83+700	18.8%	170	

Fuente: Elaboración propia

Estos datos promedios referenciales obtenidos son datos que nos permiten verificar si es que cumplen con las condiciones del proyecto, que en este caso exige que se cumpla con un número estructural  $SN \geq 0.87$  para la capa de base granular.

Para verificar que se cumpla esa condición fue necesario recurrir al siguiente ábaco de la Guía Aashto 1993 como se muestran en la figura N°18; mediante el cual podemos obtener el coeficiente estructural de la capa de base conociendo el valor del módulo resiliente o el valor de CBR, en este caso el dato inmediato que se tiene es el valor del Mr.

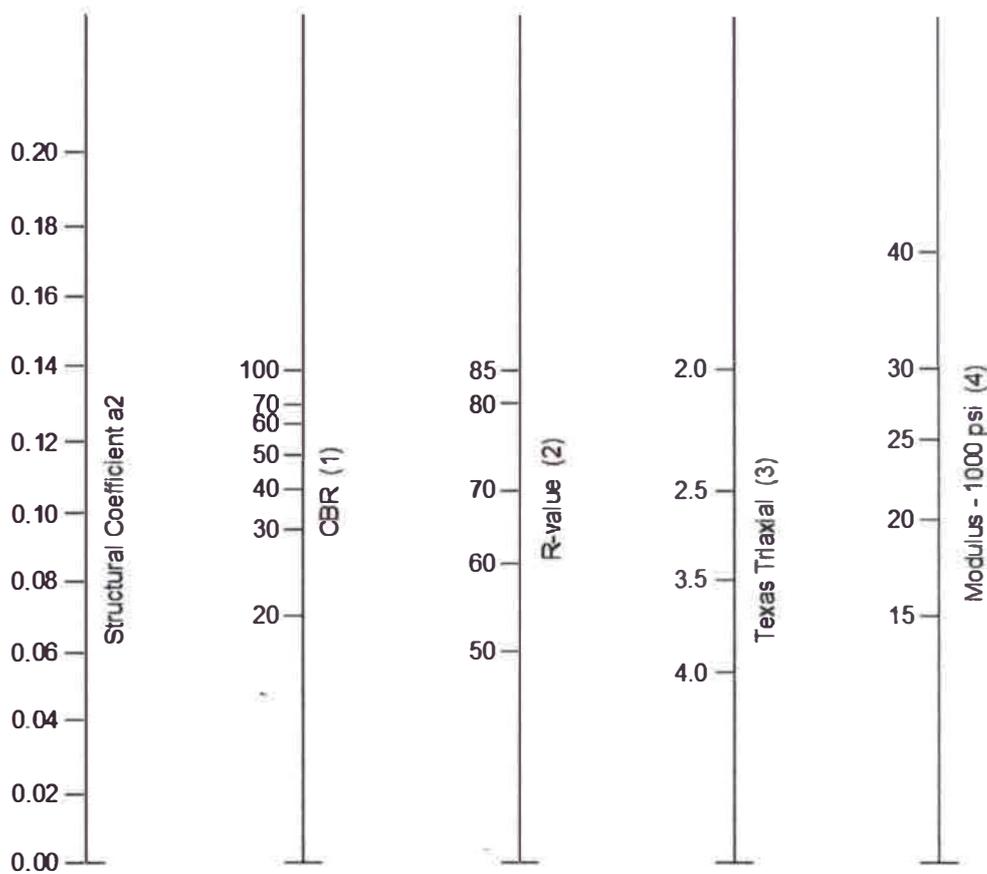


Figura 18 .- Abaco de diseño Aashto, coeficiente estructural a2 para base granular

Si comparamos con los valores que resultan de aplicar la fórmula indicada en la Guía Aashto hay una ligera variación con los valores gráficos del ábaco.

Aplicando la fórmula:

$$a_2 = 0.249 * (\log_{10} E_{BS}) - 0.977$$

Donde:

$a_2$  = Coeficiente estructural de capa de base (in/in)

$E_{BS}$  = Módulo de la capa de base (psi)

Tenemos los siguientes resultados para los módulos marcados en el ábaco, como se muestra en el cuadro N°9.

Cuadro 9.- Módulos y Coeficiente  $a_2$  del ábaco Aashto

Módulo		Coef. $a_2$ (in/in)
$E_{BS}$ (psi)	$E_{BS}$ (Mpa)	
40000	276	0.169
30000	207	0.138
25000	172	0.118
20000	138	0.094
15000	103	0.063

Fuente: Elaboración propia

Según la fórmula referida al ábaco, podemos verificar si los valores de la evaluación estructural con el equipo LWD estarían cumpliendo con el número estructural requerido en los términos de referencia del proyecto, para esto es necesario conocer el coeficiente estructural  $a_2$  de la base según el valor promedio de los módulos, y el espesor de la capa de base granular para verificar el número estructural con la siguiente ecuación.

$$SN_2 = a_2 * e$$

Donde:

$SN_2$  = Número estructural de la capa de base

$a_2$  = Coeficiente estructural de capa de base (cm/cm)

$e$  = Espesor de capa de base en cm

Tomando los valores promedios de los módulos de superficie que están referidos a la capa de base generamos el cuadro N°10.

Sectoros según CBR de Subrasante					E <sub>bs</sub> Prom. (MPa)	E <sub>bs</sub> Prom. (psi)	Coef. a2 (in/in))	Coef. a2 (cm/cm))	e base (cm)	SN <sub>2</sub>
TRAMO 5: COLCA – LA QUEBRADA – QUELLOUNO - CHAHUARES	km 0+000 - km 83+810	1	00+000	16+800	11.3%	394	57140	0.207	18	1.47
		2	16+800	28+600	12.2%	490	71132	0.231		1.64
		3	28+600	34+200	20.1%	430	62362	0.217		1.54
		4	34+200	56+700	10.3%	421	61129	0.215		1.52
		5	56+700	63+100	14.9%	346	50179	0.193		1.37
		6	63+100	83+700	18.8%	318	46162	0.184		1.31

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar los valores del número estructural SN<sub>2</sub> calculados, superan por gran diferencia el SN=0.87 especificado para el proyecto, en estas condiciones se estaría cumpliendo los términos de referencia al respecto.

En este caso los valores de coeficiente estructural de base comparados en el ábaco estarían dando valores de CBR muy por encima del 100%.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- La medición con el equipo LWD es un método no destructivo, no requiere de mediciones de referencia y proporciona una alternativa sencilla y rápida para la obtención de módulos de capas granulares, la evaluación de un punto demora aproximadamente 1 a 2 minutos y ofrece resultados inmediatos en campo.
- Su mejor uso es para verificar la calidad y control en capas estructurales, subrasante y pavimentos flexibles delgados, pudiendo verificar el número estructural (SN) de la capa, con la ayuda de los ábacos de la Guía Aashto 1993, y verificar según diseño o términos de referencia.
- . Es utilizable también para identificar los puntos débiles a lo largo del pavimento, dando lugar a nuevas pruebas y otras técnicas de análisis de materiales.
- El Mr se determina en un ensayo con carga dinámica repetida, que simula los efectos del tráfico en el interior de un pavimento. El módulo resiliente conceptualmente es el comportamiento elástico final del suelo.
- Los módulos resilientes de un pavimento se estiman mayormente por medio de correlaciones indirectas, en gran parte a través del ensayo CBR, este ensayo mide la capacidad de soporte de un suelo para condiciones de suelo estándares que no representan las condiciones in-situ, pues estos varían según su compactación y humedad siendo el mismo material.
- Los datos de los coeficientes de correlación en el área de prueba para verificar la confiabilidad del equipo varían; para el caso de subrasante son aceptables hasta un 93% y para la base en un 97%; estos resultados refieren que en la base se encuentra un material seleccionado y relativamente uniforme en comparación con la subrasante.

- El Mr varía según las condiciones de densidad y humedad en un mismo material, además puede aumentar su valor si hay mejor soporte lateral de confinamiento.
- Una de las técnicas que se están utilizando principalmente en la evaluación de pavimentos es la deflectometría de impacto.
- Se puede evaluar una sectorización de un tramo de carretera evaluando las deflexiones y módulos obtenidos, pudiendo optar por mejoramientos de material o recargas según sea el caso.
- Es posible la evaluación con el equipo LWD directamente sobre superficies de subrasante en puntos que presenten superficies lisas.
- Las mediciones in-situ sobre una capa de mortero asfáltico Slurry Seal o una monocapa, no tienen un aporte estructural significativo ya que solo brindan una protección superficial la capa de base colocada.
- Esta evaluación permite poder calcular el aporte estructural real de las bases al momento de ser terminadas con la obtención del módulo resiliente.
- El módulo resiliente no es una propiedad constante del material, si no que depende de muchos factores, que condicionan su valor como lo es su condición de compactación.
- La metodología actual para diseño de pavimentos utilizada por el método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) considera que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales constitutivos de la sección de una carretera es el parámetro denominado módulo resiliente.
- La obtención de módulos resilientes con el equipo LWD, nos puede ayudar a tener una data más real de las condiciones in situ del material existente y generar un mejor diseño del pavimento desde el punto de vista de la optimización de recursos.
- Es muy importante saber el tipo de material sobre el cual se está realizando el ensayo pues el coeficiente de Poisson puede variar considerablemente, si estos son suelos estabilizados químicamente.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar mediciones periódicas de evaluación a fin de monitorear puntos y evaluar su comportamiento en el tiempo.
- Es recomendable en base a los resultados con el LWD realizar sectorizaciones, las cuales se pueden complementar con ensayos destructivos más selectivos que permitirán efectuar una sectorización final que nos ayude a proponer estructuras de pavimento más adecuadas a las condiciones in situ.
- Se recomienda también obtener datos directos con el LWD sobre la superficie inmediata inferior a la capa granular a evaluar, con el fin de obtener un dato de referencia in- situ de la capa inferior para su comparación y como un dato semilla a ingresar para el cálculo del  $M_r$  de la capa superficial, como se observa en los siguientes gráficos.

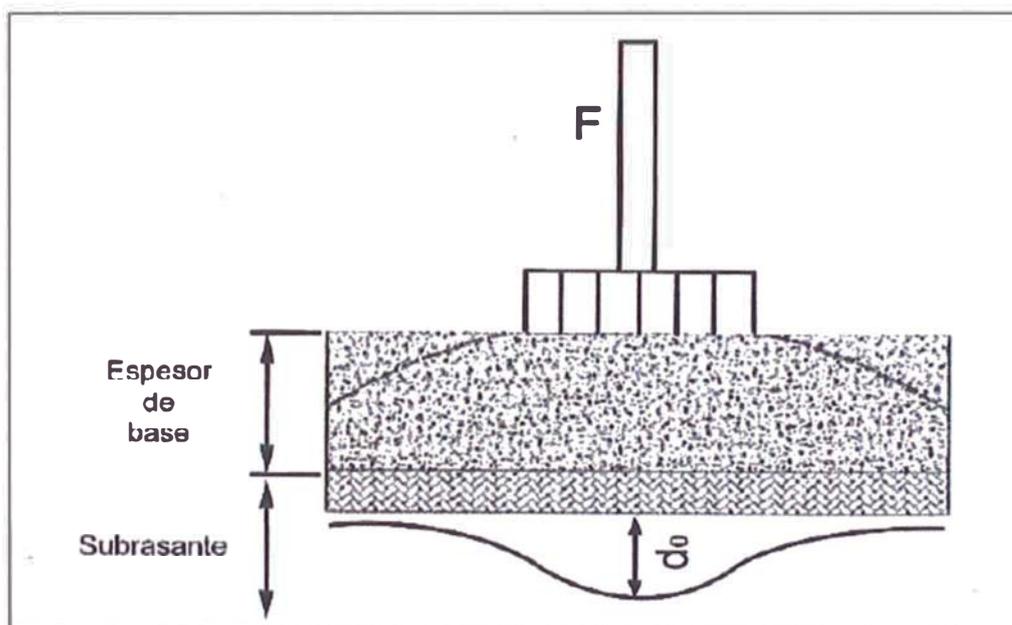


Figura 19.- Medición del módulo en la capa superficial

Fuente: Revista Infraestructura Vial, Vol. 16/N°27, Marzo, 2014

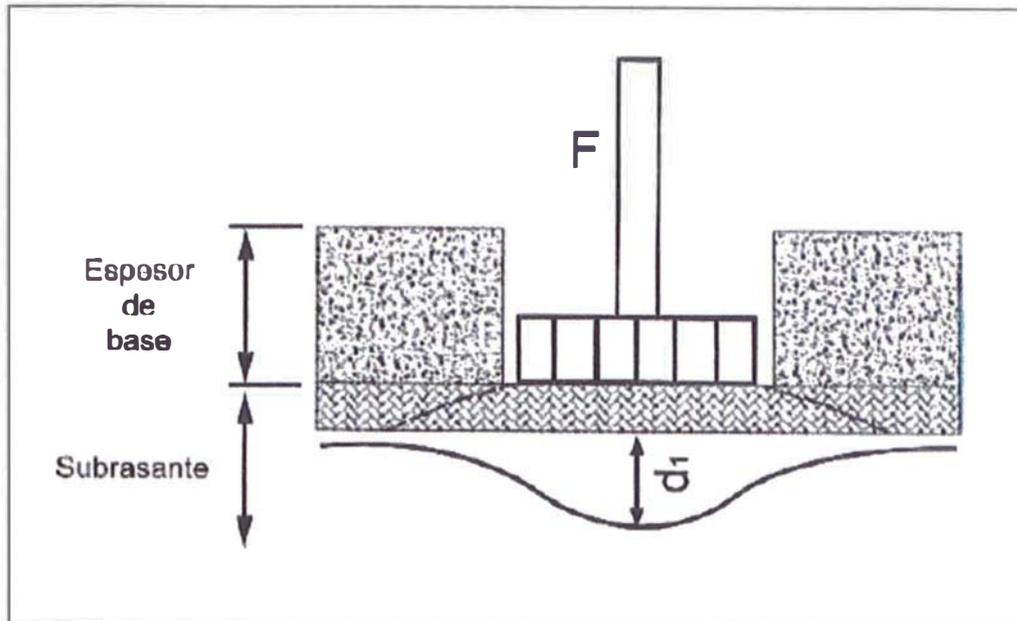


Figura 20.- Medición del módulo en la superficie de la capa subyacente

Fuente: Revista Infraestructura Vial, Vol. 16/N°27, Marzo, 2014

- Se debería obtener una mayor cantidad de datos para evaluar una sección de carretera, no solo tomando datos en las huellas si no, distribuirlo en el ancho de la sección a fin de tener más datos, y en todo caso un promedio en la sección.
- Es recomendable tener el dato de los espesores de las capas y la clasificación del material, estas se pueden obtener a partir de los registros de construcción o por sondeos en el pavimento existente, también verificar la posible existencia de estratos de roca.

## BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993.
- Angelone, Silvia y Martínez, Fernando, "Módulo Resiliente de Suelos y Materiales Granulares no Tratados". XXV Reunión del Asfalto, Córdoba, 1988.
- Del Águila Rodríguez, Pablo, Determinación del Módulo Resiliente del Suelo de Fundación Mediante Método Mecánico - Empírico. Método Hogg Simplificado XIV Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto. La Habana, Cuba, 2007.
- Gutiérrez Lázares, José Wilfredo, Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú. Lima, Perú 2007.
- Limaymanta Mendoza, Felicita Marlene, "Ensayo de Módulo Resiliente". XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil – Iquitos 2003.
- Manual, "Dynatest 3031 LWD Light Weight Deflectometer". Owner's Manual Versión 1.0.3 – 2010.
- Pérez Salazar, Alfonso, Paul Garnica, Anguas, José Antonio Gómez López Guadalupe, Itandehui Evangelina, Martínez Peña; "Uso y Calibración de Deflectómetros de Impacto en la Evaluación Estructural de Pavimentos", Publicación Técnica No 252 Sanfandila, Qro, 2004; Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte.
- Pérez Valcarcel, Juan, Reconocimiento de Suelos. E.T.S. Arquitectura de la Coruña – Departamento de la Tecnología de la Construcción.
- Revista Infraestructura Vial / LanammeUCR / ISSN: 1409-4045 / Volumen 16 / Número 27 / p.p. 4-14. Diseño de Pavimentos Urbanos por Retrocálculo según Guía Aashto 93 mediante la utilización del Deflectómetro Liviano de Impacto.