

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



**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO CON VIGA
BENKELMAN – MODELO MATEMÁTICO, CARRETERA
CAÑETE-CHUPACA - SISTEMATIZACIÓN DEL PROCESO Y
PROPUESTA DEL MANUAL.**

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

WALTER HERRY DOMINGUEZ PINEDO

Lima- Perú

2011

DEDICATORIA:

A mis queridos padres Walter y Olinda por su amor y sus sabios consejos que ayudaron a delinear mi vida.

A mi esposa Magali y mis hijas Astrid y Ariana, por su amor, paciencia y constante aliento.

ÍNDICE

ÍNDICE	1
RESUMEN	3
LISTA DE CUADROS	4
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE SIGLAS	6
INTRODUCCIÓN	7
GENERALIDADES	9
CAPÍTULO I: VIGA BENKELMAN	13
1.1. Antecedentes.....	13
1.2. Viga Benkelman.....	19
1.3. Fundamento teórico.....	19
1.4. Descripción de la metodología.....	22
1.5. Análisis del proceso.....	25
1.5.1 Factores que influyen en el proceso de medición.....	26
1.6. Optimización y recomendaciones del proceso.....	27
1.7. Tratamiento de los datos recogidos.....	28
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DEL CÁLCULO INVERSO Y DIRECTO ...	34
2.1. Antecedentes.....	34
2.2. Cálculo inverso.....	35
2.3. Módulo de la subrasante basado en el modelo de Hogg	36
2.3.1 Método de cálculo directo.....	36
2.3.2 Metodo calculo directo – yonapave.....	39
2.4. Determinación de la rigidez de la superficie basado en el método del área.....	41
2.5. Determinación del módulo de la capa intermedia.....	43
2.6. Cálculo mediante el uso de software.....	43
2.6.1 Michback.....	43

2.6.2 Michpave.....	45
CAPÍTULO III: APLICACIÓN DEL CÁLCULO INVERSO Y DIRECTO.....	47
3.1. Panorama del uso.....	47
3.2. Usos de las hojas de cálculo y Software.....	48
3.3. Análisis de los resultados.....	49
3.4. Directivas para generar un manual de trabajo.....	51
CONCLUSIONES.....	53
RECOMENDACIONES.....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXOS.....	56

RESUMEN

El presente informe de suficiencia contiene una guía metodológica para la evaluación estructural de un pavimento, mediante Ensayos No Destructivos (END) empleando para ello un equipo deflectométrico denominado Viga Benkelman, el cual mide las deflexiones en el pavimento a determinadas distancias bajo la acción de una carga rodante estándar. Estas deflexiones obtenidas de campo fueron evaluadas mediante el uso de modelos matemáticos basados específicamente en el modelo de Hogg.

La sectorización basada en las mediciones de deflexión tomadas en campo entre las progresivas 79+000 y 84+000 de la carretera Cañete – Yauyos - Chupaca, se realizó asumiendo una sectorización inicial del tramo, para luego proceder a evaluarlas mediante herramientas estadísticas, los cuales dieron como resultado una sectorización final del tramo.

Así mismo con los datos deflexión de campo se procedió a obtener los módulos elásticos del tramo mencionado por medio de procesos matemáticos denominados Cálculo Inverso y Cálculo Directo, los cuales se realizaron mediante el uso de un paquete informático denominado Michback (Para el Cálculo inverso) y Michpave (Para el Cálculo Directo).

Como resultado del procesamiento se encontró 4 sectores que presentaban similares condiciones deflectométricas.

Con relación a la evaluación estructural realizado con los software Michback y Michpave, se observó que el tramo evaluado se encontraba en condiciones similares a las observadas en el año 2008, lo que nos indica que el tramo fue intervenido mediante un tratamiento superficial lo ha permitido su buen comportamiento tanto estructural como superficial.

LISTA DE CUADROS

Cuadro No 1	Tramos y condición de carretera.....	11
Cuadro N° 1.1.	Datos recogidos de campo.....	27
Cuadro N° 1.2.	Deflexiones calculadas de campo.....	27
Cuadro N° 2.1.	Coefficientes para el modelo de Hogg.....	39
Cuadro N° 3.1.	Módulos Resilientes de tramo evaluado.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.	Mapa de Ubicación.....	10
Figura N° 1.1.	Viga Benkelman de doble brazo.....	13
Figura N° 1.2.	Deflectómetro móvil de California.....	14
Figura N° 1.3.	Deflectómetro Lacroix.....	14
Figura N° 1.4.	Equipo Dinaflex.....	15
Figura N° 1.5.	Equipo Road Rater.....	15
Figura N° 1.6.	Representación de deflectómetro de impulso.....	16
Figura N° 1.7.	Representación de acción de FWD.....	16
Figura N° 1.8.	Deflectómetro de rueda rodante.....	17
Figura N° 1.9.	Metodología de medida.....	17
Figura N° 1.10.	Método de análisis espectral del sistema SASW.....	18
Figura N° 1.11.	Equipo SASW – SPA.....	18
Figura N° 1.12.	Representación del efecto de la carga NDT.....	20
Figura N° 1.13.	Correlación Viga Benkelman y FWD.....	21
Figura N° 1.14.	Correlación Viga Benkelman y Dynaflect.....	21
Figura N° 1.15.	Correlación Viga Benkelman y Road Rater.....	21
Figura N° 1.16.	Esquema y principio de Viga Benkelman.....	22
Figura N° 1.17.	Configuración Geométrica del sistema de carga.....	23
Figura N° 1.18.	Esquematización del proceso de medición.....	24
Figura N° 1.19.	Grafica deflexión Vs tiempo en EEUU.....	27
Figura N° 1.20.	Deflectograma carril izquierdo.....	29
Figura N° 1.21.	Prueba de normalidad.....	30
Figura N° 1.22.	Histograma tramo 1.....	31

Figura N° 1.23.	Comparación de métodos.....	32
Figura N° 1.24.	Sectorización de tramo evaluado.....	33
Figura N° 2.1.	Diagrama de flujo del proceso de cálculo inverso...	35
Figura N° 2.2.	Módulo de la subrasante según Hogg.....	37
Figura N° 2.3.	Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión máxima.....	37
Figura N° 2.4.	Longitud Característica de la curva de deflexion.....	37
Figura N° 2.5.	Relación entre la rigidez por carga puntual y carga distribuida.....	37
Figura N° 2.6.	Geometría del modelo de Hogg.....	40
Figura N° 2.7.	Rigidez de la losa (pavimento).....	40
Figura N° 2.8.	Longitud Característica.....	40
Figura N° 2.9.	SN _{eff} Según AASHTO.....	40
Figura N° 2.10.	SN _{eff} reemplazando la simplificación de Hogg.....	40
Figura N° 2.11.	Relación entre deflexiones FWD y VB.....	41
Figura N° 2.12.	Área del cuenco de deflexiones vs. L0, para $h_0/l_0 = 10$	42
Figura N° 2.13.	Factor de deflexión máxima, para diferentes valores de h_0/l_0	42
Figura N° 2.14.	Factor de Deflexión Máxima.....	42
Figura N° 2.15.	Modulo de la base no consolidada, usando la relación de Dormán y Metcalf.....	43

LISTA DE SIGLAS

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation officials
FWD	Falling Weight Deflectometer
IMDA	Índice Diario Medio Anual
END	Ensayos No Destructivos
m.s.n.m.	Metros sobre nivel del mar
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
N.T.P.	Norma Técnica Peruana
PERT	Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes
FHWA	The Federal Highway administration
LTPP	The Long-Term Pavement Performance
WASHO	Western Association of State Highway Organizations

INTRODUCCIÓN

El estado por medio de nuevos contratos de conservación y mantenimiento, pretende mantener las principales vías del Perú en buenas condiciones de tránsito y serviciabilidad.

En consecuencia las carreteras que periódicamente son rehabilitadas permiten la dinamización de la economía local y regional y evolución positiva de la calidad de vida de los pobladores de las diferentes zonas a la que sirve la carretera.

La evaluación realizada en la carretera Cañete – Yauyos - Chupaca, entre las progresivas 79+000 y 84+000, pretende mostrar ser una guía metodológica para la evaluación estructural de un pavimento por medio de un enfoque matemático lo que evita la realización tradicional de perforaciones que alteren las condiciones mecánicas in situ de las capas estructurales de la vía.

La evaluación de las necesidades estructurales de una vía, requiere de metodologías que ayuden a garantizar un proceso eficiente en la recolección de datos de campo, y su posterior procesamiento mediante modelos matemáticos confiables.

El presente informe presentará las pautas del proceso de evaluación estructural, mediante el uso de métodos matemáticos basados específicamente en el modelo de Hogg, que representa una losa infinita sustentada por una subrasante elástica de espesor finito o infinito.

La descripción de estos métodos matemáticos está referida al proceso del cálculo inverso y el cálculo directo. Ambos métodos permitirán representar las condiciones estructurales del pavimento.

Con el método del Cálculo Directo se tiene como datos de entrada los valores de los módulos y espesores de las capas de un pavimento luego empleando programas de computador se obtienen como respuesta las tensiones y deformaciones del pavimento. La solución a la que se llega de esta manera es única.

Cuando se tiene que estimar la capacidad estructural de un pavimento en servicio se recurre a medir las deflexiones verticales del pavimento bajo una carga estándar predeterminada; esta estimación se realiza conociendo datos de espesor y deflexiones en varios puntos de la vía, con estas deflexiones y espesores se determinan los valores de los módulos de los materiales que constituyen el pavimento; a este proceso se denomina Cálculo Inverso. La solución de esta manera no es exacta ni única se requiere de varias iteraciones y criterios del ingeniero para ajustar la solución definitiva.

Los capítulos desarrollados a continuación se resumen en:

Capítulo I, describe los conceptos relacionados a la evaluación estructural de un pavimento usando una Viga Benkelman, así mismo se describe las ventajas y desventajas propias del uso de este equipo.

Capítulo II, describe los métodos de cálculo para la evaluación de las necesidades estructurales de pavimentos flexibles mediante el uso del Cálculo Inverso y el Cálculo Directo.

Capítulo III, muestra el panorama de uso, hojas de cálculo, software que se pueden emplear y un análisis sobre los resultados obtenidos.

GENERALIDADES

La carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, que recorre los departamentos de Lima y Junín con una variación altitudinal de 500 a 4,360 m.s.n.m. se encuentra enmarcada dentro del programa de desarrollo vial “Proyecto Perú”, el cual, Mediante Resolución Ministerial N° 223-2007-MTC/02, se crea con la finalidad de mejorar las vías de integración de corredores económicos, conformando ejes de desarrollo sostenible con el fin de elevar el nivel de competitividad de las zonas rurales, en la Red Vial Nacional, Departamental y Vecinal. Dicho programa se caracteriza por contratos que se controlan por niveles de servicio y plazos mayores o iguales a los 3 años.

Con fecha 16 de Octubre de 2007 se realiza la Convocatoria para el Concurso Público “Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio de la Carretera Cañete- Lunahuaná - Pacarán - Chupaca y Rehabilitación del tramo Zúñiga. Dv. Yauyos – Ronchas”, por un periodo de 5 años.

Con fecha 17 de Diciembre 2007 se firma el contrato con el CONSORCIO GESTIÓN DE CARRETERAS, por un monto que asciende en S/. 131'589,139.71, por la conservación vial de 271.73 Km. En los términos de referencia señalan que se debe dar una solución básica a aplicar sobre la superficie actual de la vía, previamente conformada, no se deben realizar cambios en la geometría ni trazo de la vía existente.

El mejoramiento de la vía es un factor decisivo en el incremento del flujo vehicular, disminución de tiempos de tráfico, dinamización de la economía local y regional y evolución positiva de la calidad de vida de los pobladores de las diferentes zonas que sirve la carretera.

Actualmente la carretera Cañete – Yauyos - Chupaca se encuentra en trabajos de rehabilitación y mantenimiento.

OBJETIVOS

El objetivo principal del presente informe es:

- Desarrollar una metodología para el correcto uso de los procesos que involucran la evaluación estructural de un pavimento.

El objetivo específico del presente informe es:

- Analizar, describir y proponer mejoras en el uso del método de la viga Benkelman, usada en la obtención de datos de deflexiones en una vía.
- Analizar y describir la metodología del cálculo inverso y calculo directo.
- Proponer directivas técnicas para generar un manual de trabajo.

UBICACIÓN DE LA CARRETERA

La carretera de penetración y enlace entre Cañete-Yauyos-Chupaca, se encuentra ubicado en los departamentos de Lima y Junín, entre las provincias de Cañete, Yauyos y Chupaca.

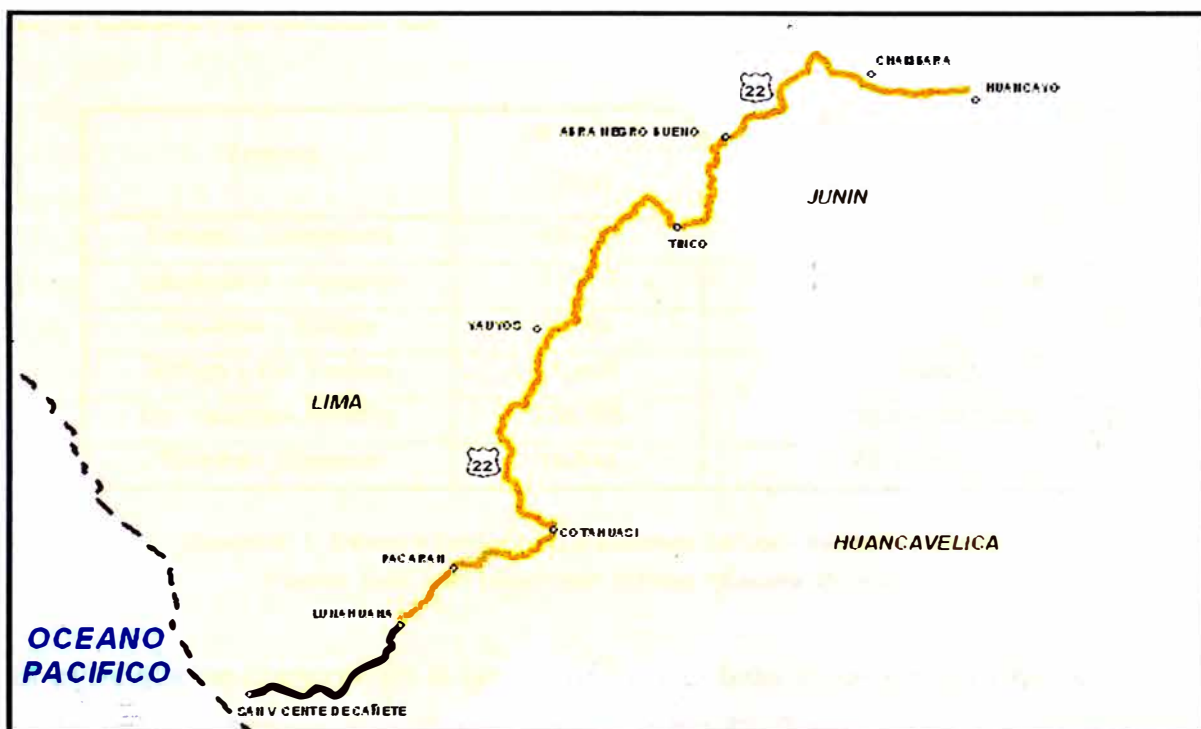


Figura N° 1. Mapa de ubicación. Carretera Cañete – Yauyos – Chupaca.

(Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. <http://www.mtc.gob.pe>)

El tramo evaluado se encuentra ubicado entre las progresivas 79+000 y 84+000, cerca al poblado de Catahuasi.

CARACTERÍSTICAS DE LA CARRETERA

La carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, es una carretera de tercer orden y pertenece al corredor vial No 13, los cuales recorren varios poblados como se muestra en la figura No 1.

El punto de inicio de la carretera se encuentra ubicado en la ciudad de Cañete progresiva 1+805 a una altitud de 71 m.s.n.m. y como punto de término el poblado de Chupaca en la progresiva 273+531 a una altitud de 3270 m.s.n.m. La carretera tiene una Longitud de 271.73 km y se encuentra dentro de la cuenca del río Cañete, presentando pendientes que van desde el 2% al 8%, esta ultima especialmente en la zona alta.

La carretera se encuentra dividida en seis tramos de los cuales dos se encuentran pavimentadas el resto se encuentra con tratamiento superficial. En el cuadro 1 se detallan las condiciones.

Tramo	Longitud (km)	Tipo de Superficie
Cañete – Lunahuaná	40.950	Carpeta Asfáltica
Lunahuaná – Pacaran	11.907	Tratamiento Superficial
Pacaran – Zúñiga	3.743	Slurry Seal
Zúñiga – Dv. Yauyos	70.400	Monocapa
Dv. Yauyos – Roncha	128.185	Monocapa y Afirmado
Roncha - Chupaca	16.541	Afirmado

Cuadro N° 1. Tramos y condición de la Carretera Cañete – Yauyos – Chupaca.
 (Fuente: Tesis Julio Cesar Pedro Grimani Villasante, Pagina 13)

El clima que se presenta en la vía es variable debido a que su recorrido se inicia en la costa a 71 m.s.n.m. y termina en la sierra a 3270 m.s.n.m. Presentando zonas con temperaturas de 20°C a 27°C (cotas menores a 2300 m.s.n.m.) y temperaturas de -4°C a 29°C (cotas entre los 2300 y 3500 m.s.n.m.).

La carretera presenta una topografía sinuosa a media ladera, la cual cambia a agreste a medida que se interna en la cordillera de los andes.

El ancho de la carretera varía desde los 3.5 m hasta los 8.00 m.

La geomorfología de la carretera presenta unidades sedimentarias volcánicas y metamórficas. En cuanto a las formaciones geológicas se encuentran la formación Cañete, Cerro Negro, Torán, Cocachacra y Pariatambo.

La composición de los suelos presenta un 49% de material suelto, 33% de roca suelta y 18% de roca fija en el tramo de Lunahuaná a Yauyos y en el tramo de Yauyos a Chupaca presenta 53% de material suelto, 32% de roca suelta y 15% de roca fija.

CAPÍTULO I

VIGA BENKELMAN

1.1 ANTECEDENTES

Dentro de la variedad de equipos usados en los ensayos No destructivos (END) con fines de evaluar los requerimientos para el mantenimiento de una vía se encuentra la Viga Benkelman, pero este equipo no es el único que nos puede ayudar a evaluar los pavimentos y por ello presentamos a continuación los diferentes equipos que existen en el mercado de acuerdo a la condición de trabajo, así se tiene:

Equipos Estáticos:

- Viga Benkelman.



Figura N° 1.1. Viga Benkelman de doble brazo.

<http://gestalta.net/index.php?key=Benkelman>

- Deflectómetro móvil de california.



Figura N° 1.2. Deflectómetro móvil de california.

<http://gestalta.net/index.php?key=Benkelman>

- Deflectógrafo Lacroix:

Presenta las siguientes características:

Velocidad de ensayo de 3-4 km/h.

Obtención de datos en dos líneas de medida.

Distancia entre puntos de ensayo de 5 metros.

En cada punto de ensayo se toman del orden de 60 lecturas de deflexión (permitiendo la obtención de la línea de influencia de la deflexión), siendo la longitud total de medida de 1,5 m.

La recogida y tratamiento de datos se efectúa por ordenador



Figura N° 1.3. Deflectógrafo Lacroix.

<http://www.cedex.es/cec/document/auscul.htm>

Equipos Vibratorios:

- Dynaflect



Figura N° 1.4. Equipo Dynaflect.

<http://www.dynaflect.com/spanish/power.htm>

- Road Rater (Evaluador de carretera – existen 3 modelos).



Figura N° 1.5. Equipo Road Rater.

http://www.pavementinteractive.org/index.php?title=Image:Road_rater2.jpg

Equipos de Impulso:

- Falling Weight Deflectometer (Deflectómetro de Impacto)

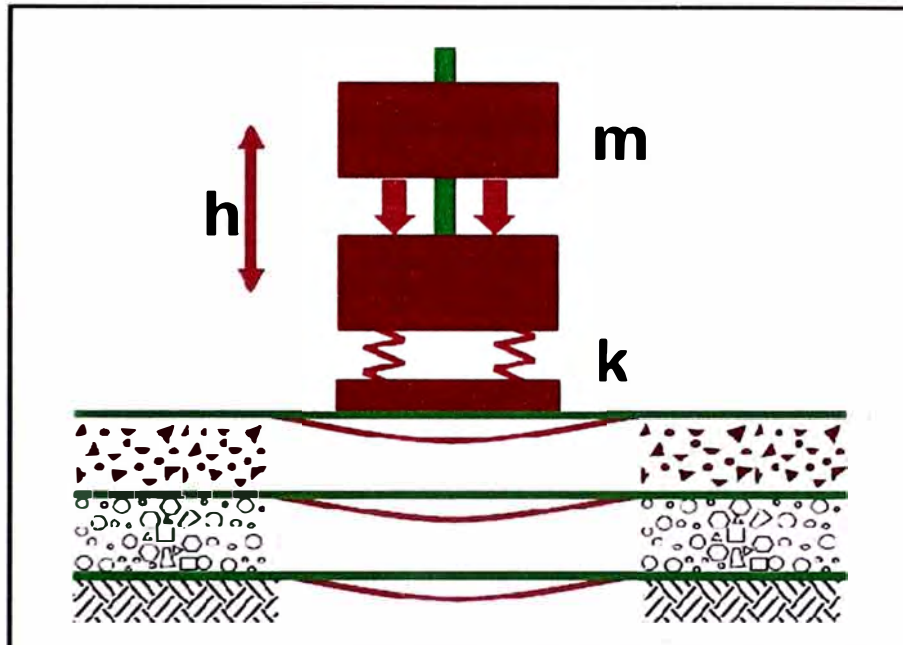


Figura N° 1.6. Representación de deflectómetro de impulso.

Fuente: Elaboración propia

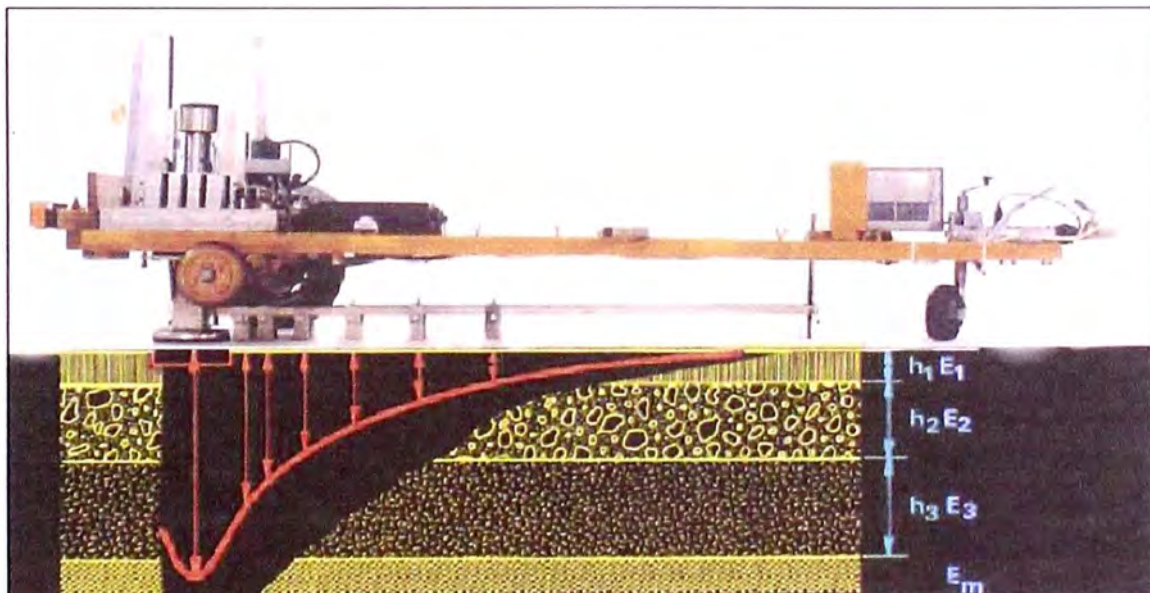


Figura N° 1.7. Representación de acción de FWD.

Fuente: Monty Wade "Adquisición e interpretación de información no destructiva (NDT)"

Rolling Wheel Deflectometer:

Deflectómetro de rueda rodante de alta velocidad, es un semi tráiler con un eje sencillo de ruedas gemelas. Cuenta con 4 láseres montados en una viga debajo del tráiler, de los cuales 3 láseres miden la superficie no cargada y el cuarto está entre las ruedas gemelas y mide el perfil del pavimento bajo una carga de 18,000 libras.

Este equipo brinda una medida continua de deflexión y su uso es apropiado para la aplicación del sistema de gestión de pavimentos en escala de red.

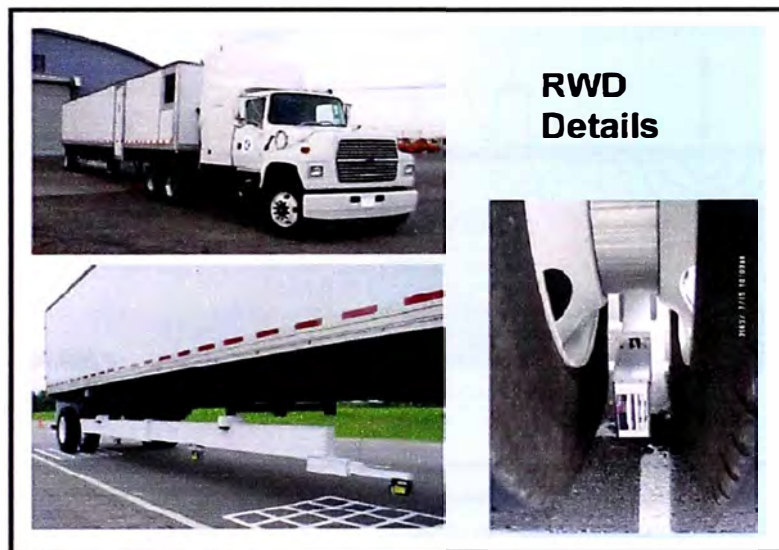


Figura N° 1.8. Deflectómetro de rueda rodante.

Fuente: Monty Wade "Adquisición e interpretación de información no destructiva (NDT)"

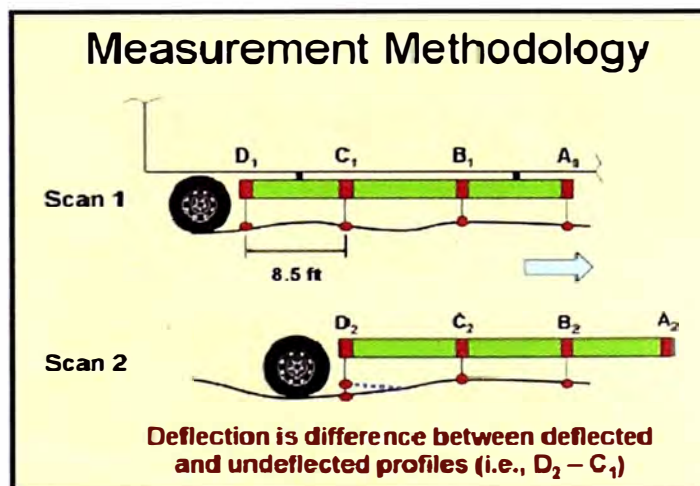


Figura N° 1.9. Metodología de medida.

Fuente: Monty Wade "Adquisición e interpretación de información no destructiva (NDT)"

Equipos de Propagación de ondas superficiales:

Tenemos el método SASW, el cual mide la velocidad, amplitud y longitud de onda.

El dispositivo o equipo más común es el Seismic Pavement Analyzer.

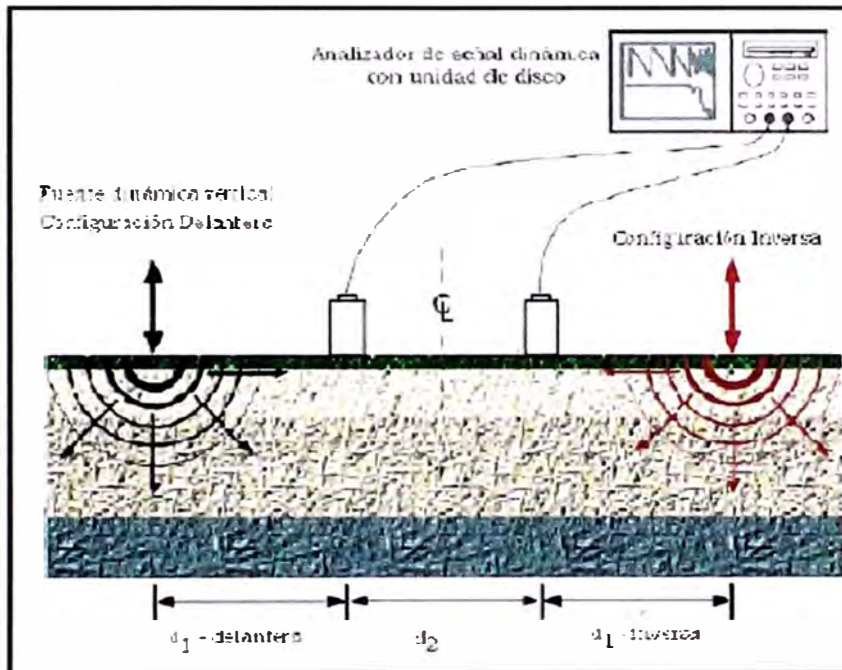


Figura N° 1.10. Método de análisis espectral del sistema SASW.

Fuente: Monty Wade "Adquisición e interpretación de información no destructiva (NDT)"



Figura N° 1.11. Equipo SASW - SPA.

Fuente: Monty Wade "Adquisición e interpretación de información no destructiva (NDT)"

1.2 VIGA BENKELMAN

La medida de las deflexiones, como respuesta de un pavimento flexible ante la aplicación de una carga sobre la superficie del pavimento, es la base de la mayoría de los procesos de evaluación estructural. Aun que existen otras medidas que pueden dar una idea del estado estructural del pavimento, la deflexión en superficie es, sin duda la que ofrece las posibilidades de análisis más amplio.

El cuenco de deflexiones se puede utilizar para determinar los módulos de las distintas capas que componen el pavimento, incluido el modulo resiliente de la explanada, mediante la técnica llamada "Calculo Inverso" o Backcalculation.

1.3 FUNDAMENTO TEÓRICO

El ensayo con viga Benkelman permite determinar la deflexión vertical y puntual de una superficie bajo la acción de una carga normalizada, transmitida por medio de las ruedas gemelas de un camión de eje simple.

Este ensayo permite evaluar la línea de influencia de la deformada originada por la carga, midiendo las deflexiones para diferentes posiciones del punto de aplicación de la carga, con relación al punto de medida fijo en el que se quiere hacer la determinación de la línea de influencia.

La deflexión es la deformación vertical y puntual de una superficie bajo la acción de una carga. Esta deflexión así definida se denomina deflexión total (d_t). En los materiales viscoelásticos cuando la sollicitación aplicada deja de actuar la recuperación del pavimento no es total, quedando este material con deflexión residual o deflexión remanente (d_r). La diferencia entre la deflexión total y remanente se denomina deflexión elástica recuperada (d_e):

$$d_t = d_e + d_r$$

Siendo:

d_t : deflexión total

d_e : deflexión elástica recuperada

d_r : deflexión remanente

La deflexión elástica recuperada es el valor que se utiliza para el cálculo del refuerzo del pavimento.

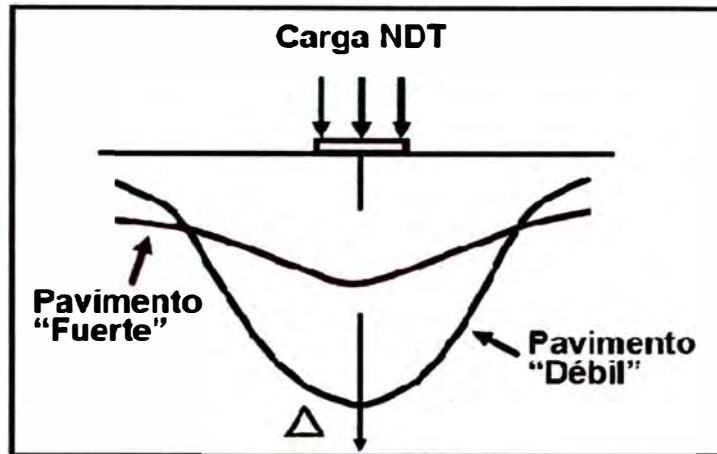


Figura N° 1.12. Representación del efecto de la carga NDT sobre un pavimento.

Fuente: Propia

Según los diferentes estudios realizados por los departamentos de transportes e instituciones ligadas a la evaluación de pavimentos se han desarrollado correlaciones entre las medidas tomadas con la viga Benkelman y los otros dispositivos de medición.

En general hay que resaltar que las correlaciones entre los dispositivos de medición se deben utilizar con precaución ya que muchas de ellas se desarrollan para un conjunto específico de condiciones que pueden o no estar presentes. Lo mejor siempre será obtener los parámetros con los dispositivos necesarios.

A continuación se muestra algunas correlaciones desarrolladas:

Viga Benkelman - FWD

Basado en datos no publicados y recopilados por el departamento de transporte del estado de Washington – material de laboratorio de 1982 – 1983.

$$BB = 1.33269 + 0.93748(FWD)$$

Figura N° 1.13. Correlación Viga Benkelman y FWD

Donde:

BB: Deflexiones de la Viga Benkelman (pulg x 10⁻³)

FWD: FWD deflexión central (pulg x 10⁻³) corregidas a 9000 lb. Carga aplicada a 11.8 pulg de diámetro del plato.

$$R^2 = 0.86$$

Error Estándar = 3.2 mils

Viga Benkelman - Dynaflect

Basado en Hoffman y Thompson - 1981

$$BB = 20.63(D)$$

Figura N° 1.14. Correlación Viga Benkelman y Dynaflect.

Donde:

BB: Deflexiones de la Viga Benkelman (pulg x 10⁻³)

D: Dynaflect deflexión central (pulg x 10⁻³)

$$R^2 = 0.72$$

Viga Benkelman - Road Rater

Basado en Hoffman y Thompson - 1981

La comparación se hizo con una carga en la viga Benkelman de 9000 libras en los neumáticos de eje doble con 80 PSI de presión de inflado y el equipo Road Rater con 8000 libras de carga de pico a pico a 15 Hz en una placa de 12 pulg de diámetro en un pavimento estabilizado.

$$BB = 2.57 + 1.27(RR)$$

Figura N° 1.15. Correlación Viga Benkelman y Road Rater.

Donde:

BB: Deflexiones de la Viga Benkelman (pulg x 10⁻³)

RR: Road Rater (modelo 2008) deflexión central a 8,000 pounds y 15 Hz (pulg x 10⁻³)

$$R^2 = 0.66$$

1.4 DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍA

El ensayo con viga Benkelman se realiza usando los siguientes equipos y materiales:

- Vehículo de carga: camión de dos ejes simples, donde el eje trasero consta de ruedas gemelas las cuales presentan una presión de inflado de 80 PSI. La carga estándar es de 8.2 toneladas.
- Viga Benkelman: Deflectómetro mecánico, el cual para nuestro caso fue de brazo doble.
- Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0.01 mm.
- Balanza portátil para pesaje del camión, con capacidad de 10 toneladas.
- Termómetro: equipo digital de precisión con escala en grados centígrados.
- Cinta métrica: de 50 m. de longitud.
- Cincel y martillo: herramientas adecuadas para practicar un orificio en el pavimento de hasta 5 cm de profundidad.
- Varios: Cuña de madera para las paradas del camión, tiza y pintura para marcar el pavimento, glicerina o aceite para la toma de temperatura del pavimento.

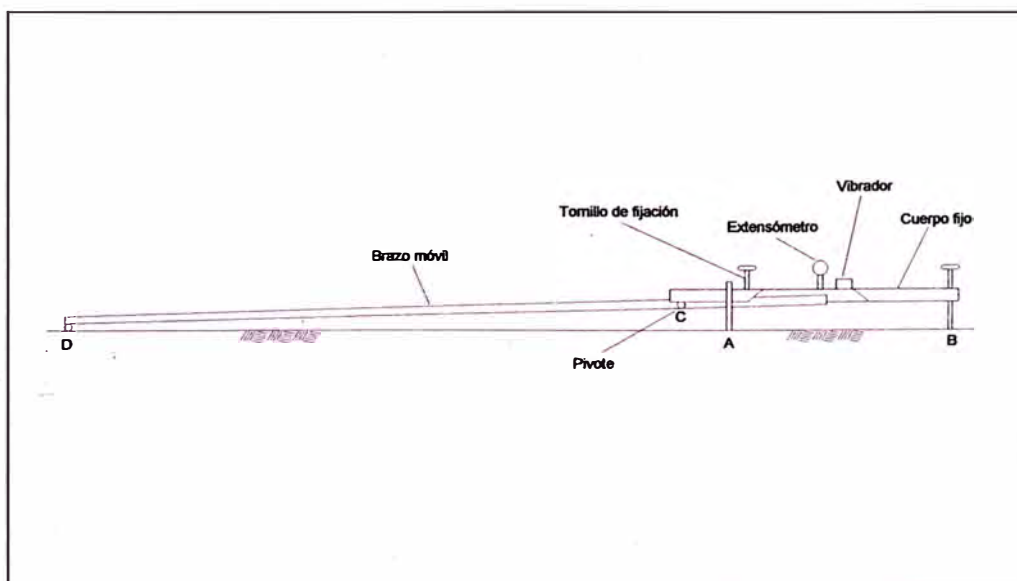


Figura N° 1.16. Esquema y principio de operación de viga Benkelman.

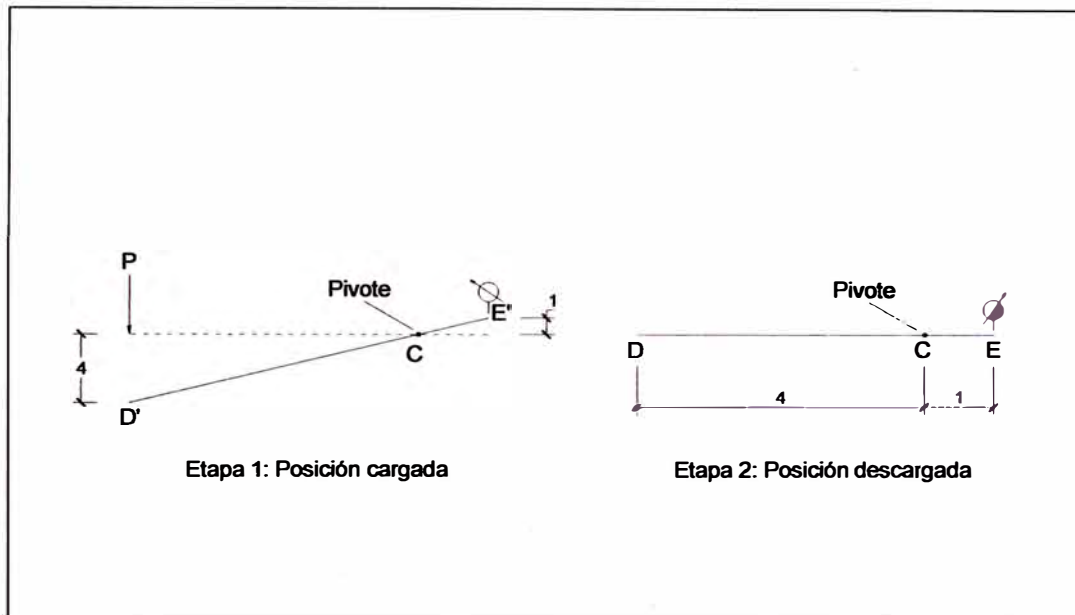


Figura N° 1.17. Configuración geométrica del sistema de carga en ensayo.

El procedimiento de medición de las deflexiones con la viga Benkelman se describe a continuación.

- Se procede a marcar en el pavimento los puntos donde se tomarán las medidas de las deflexiones. (Para nuestro caso esta se hizo cada 200 m entre las progresivas 74+000 y 84+000).
- Se colocara en la parte trasera del camión una regla de metal, la cual servirá de plomada y nos ayudara a visualizar en qué momento el camión pasa por los puntos de lectura en los brazos de la viga Benkelman.
- Se marcara en el brazo de la viga Benkelman los puntos para la medición de la deflexión (Para nuestro ensayo se ubico a 0, 25, 50, 75 centímetros).

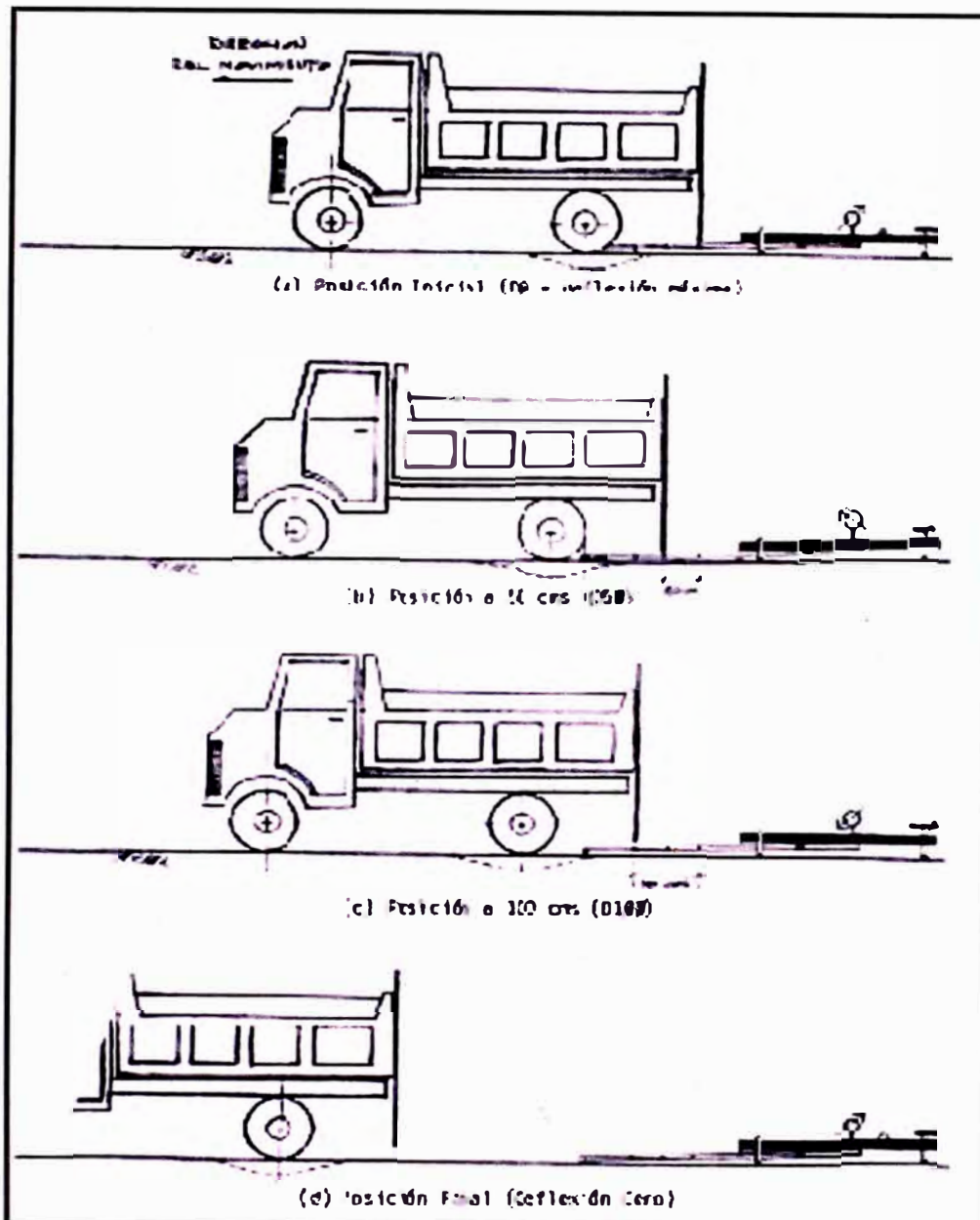


Figura N° 1.18. Esquematización de proceso de medición.

- La rueda trasera del camión se ubicara sobre el primer punto seleccionado.
- Se colocara la viga Benkelman de modo que se sitúe sobre el punto de medida y entre las dos ruedas del camión. Perpendicularmente al eje de carga.
- Se retira la traba de la regla y la base se ajusta por medio del tornillo trasero de modo tal que el brazo de medición quede en contacto con el vástago del dial.

- El extensómetro se ajusta de modo tal que el vástago tenga un recorrido libre de 4 a 6 mm. Se gira la esfera del extensómetro hasta que la aguja quede en cero y se verifica la lectura golpeando suavemente su superficie.
- Establecida la lectura inicial en cero, un operador indicara al conductor del camión que inicie el movimiento lentamente y la mantenga con una velocidad constante y no mayor a 3 km/h.
- Un operador ubicado frente al punto de medición indicara el momento exacto en la cual la regla colocada en la parte posterior del camión se ubique en los puntos marcados en la viga Benkelman.
- El operador encargado de leer los datos de la viga, indica a su anotador las medidas indicadas por el extensómetro.
- Paralelamente se hace una perforación en el pavimento, se vierte sobre este orificio la glicerina o aceite y se coloca el termómetro para la toma de temperatura respectiva.
- Se mide el ahuellamiento en el punto de ensayo mediante una regla de aluminio y se toman fotografías de la zona ensayada, así como las anotaciones de las condiciones superficiales observadas.
- Todo el proceso de medición deberá ser supervisado por un ingeniero de campo con experiencia quien verificara los valores que se obtienen.
- Se repite todo el proceso para el siguiente punto de evaluación.
- Toda la información de campo se procede a calcular y con ello se evalúa la intervención en el pavimento con fines de rehabilitación.

1.5 ANÁLISIS DE PROCESOS

La viga Benkelman es un equipo que fue desarrollado durante el ensayo de la "Western Association of State Highway Organizations" (WASHO) en 1952. Se trata de un dispositivo bastante simple, que funciona aplicando la conocida "regla de la palanca". Este equipo se usa junto con un camión cargado que para nuestro caso es de 8.2 toneladas, el ensayo se realiza colocando el extremo de la viga entre las dos ruedas gemelas del camión, midiendo la recuperación vertical de la superficie del pavimento cuando el camión avanza y se retira.

La principal ventaja de este método de evaluación con Viga Benkelman es que se trata de un ensayo bastante económico; no obstante, es muy laborioso, para la obtención del cuenco de deflexiones.

La medición que se realiza en los diferentes puntos marcados en la viga, son tomados por medio de tres operadores uno que indica el momento de medir, otro que lee las lecturas registradas en el dial del extensómetro y otro que anota las lecturas, esta forma de medición incluye un gran factor de error humano a la hora de ordenar medir, leer y escribir los datos del ensayo.

Es necesario tener en cuenta, para determinar el tiempo de aplicación de la carga, la velocidad del camión que se emplea con el equipo para ello se ha considerado una velocidad de avance del camión de aproximadamente 1 km/h.

La medición de las deflexiones nos ayuda a identificar tramos para rehabilitación, sitios para muestreo o ensayos adicionales, caracterización de las propiedades de los materiales in situ, fundamento racional para la asignación de capacidad estructural, localización de vacíos.

1.5.1 Factores que influyen en el proceso de medición

Durante el proceso de medición de las deflexiones con la Viga Benkelman existen algunos factores que se tienen que tomar en cuenta, ya ellos influyen en las medidas a tomar:

Factores debido a la carga

La sensibilidad al esfuerzo, debido a que una carga mayor o menor a la establecida como medida patrón (8.2 tn) distorsionara los resultados de la evaluación del pavimento.

Factores debido al pavimento

Como el daño existente, la ubicación transversal, discontinuidades de la superficie, variaciones subsuperficiales, vacíos subyacentes.

Factores climáticos

Como la Humedad, temperatura, profundidad de congelamiento.

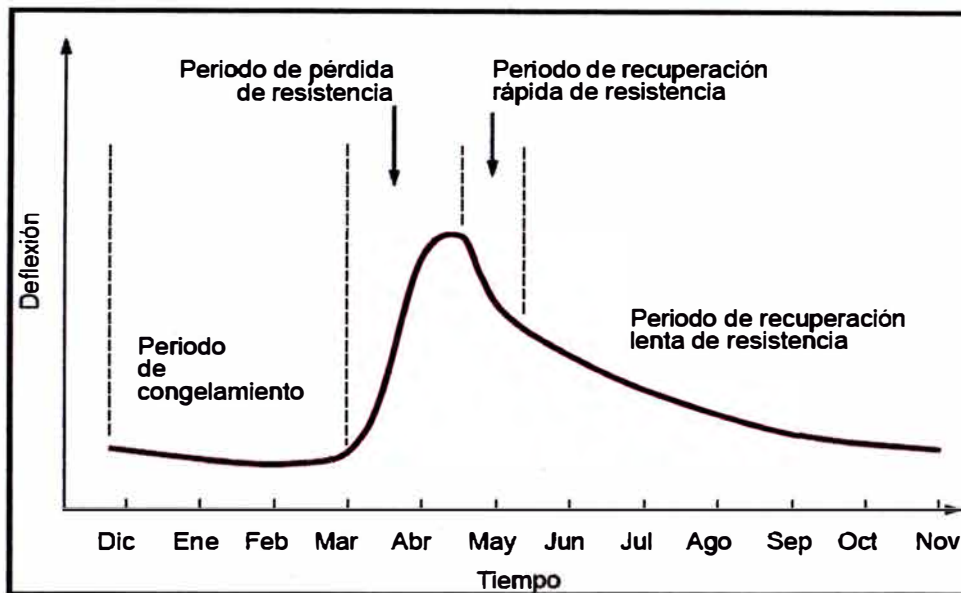


Figura N° 1.19. Grafica deflexión Vs tiempo en EEUU.

Factores humanos

Debidos a las lecturas realizadas, la escritura o toma de los datos.

1.6 OPTIMIZACIÓN Y RECOMENDACIONES DEL PROCESO

El uso de la Viga Benkelman para la evaluación estructural de un pavimento, en la actualidad prácticamente ya no existe en EEUU, muy a pesar que fue el país donde se creó el equipo. Sin embargo en Latinoamérica aun se sigue usando este equipo debido a su bajo costo.

En la actualidad se emplea el deflectómetro de impacto (FWD), tecnología que debido a su alto costo no ha permitido su difusión masiva.

Revisando los procesos de medición con la Viga Benkelman se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La medida de la temperatura se debe hacer en múltiples puntos, tanto en el aire como en el pavimento.
- La velocidad de traslado del camión no debe ser mayor a 3 km/h.
- Reducir las deflexiones medidas a una temperatura de referencia (20°C).
- Una vez normalizadas las deflexiones se puede asignar el valor del modulo de acuerdo con la condición de la capa.

- Los intervalos de medición deben ser tomados de tal manera que se represente mejor las condiciones de la vía.
- Se debe tomar las deflexiones en ambas direcciones, es decir en la huella interna y externa de la vía.
- La toma de datos de las deflexiones debería ser acondicionada mediante el uso de algún equipo electrónico, que permita minimizar los errores humanos.

1.7 TRATAMIENTO DE LOS DATOS RECOGIDOS

La data de deflexiones recogida mediante el uso del deflectómetro denominado Viga Benkelman, entre las progresivas 74+000 y 84+000, de la carretera Cañete-Chupaca, las cuales fueron tomadas tanto para el carril derecho como el izquierdo, fueron procesadas y sectorizadas siguiendo los siguientes pasos:

- Una vez recogidos las lecturas de campo realizadas con la Viga Benkelman se procede al cálculo de las deflexiones. En los cuadros 1.1 y 1.2 se muestra a manera de ejemplo el cálculo de las deflexiones de un tramo de la vía.

Nº	Progresiva (km)	Carril	Lecturas de Campo (10-2mm)					Espesor (mm)	Ahuell (mm)	Temp (°C)
			Li	L25	L50	L75	Lmáx			
1	74+000	Izquierdo	0	1	2	3	4	20	0	31.90
2	74+200	Izquierdo	0	2	5	8	12	20	0	32.50
3	74+400	Izquierdo	0	1	3	4	8	20	0	33.00
4	74+600	Izquierdo	0	1	2	3	4	20	0	33.50
5	74+800	Izquierdo	0	4	8	11	14	20	0	30.00
6	75+000	Izquierdo	0	1	4	7	9	20	0	30.50

Cuadro N° 1.1. Datos recogidos de campo progresiva 74+000 a 75+000

Nº	Progresiva (km)	Carril	F.C.	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS			
				Deflexiones Corregidas (mm)			
				0	25	50	75
1	74+000	Derecha	0.977	0.20	0.12	0.08	0.04
2	74+200	Derecha	0.976	0.47	0.31	0.23	0.16
3	74+400	Derecha	0.975	0.19	0.12	0.08	0.04
4	74+600	Derecha	0.974	0.31	0.16	0.08	0.04
5	74+800	Derecha	0.980	0.35	0.24	0.12	0.04
6	75+000	Derecha	0.979	0.35	0.24	0.12	0.04

Cuadro N° 1.2. Deflexiones calculadas progresiva 74+000 a 75+000

- Realizar una tramificación o partición del tramo evaluado (en nuestro caso se hizo cada kilómetro, a cada lado de la vía). En la figura 1.20 se muestra el deflectograma del carril izquierdo y derecho.

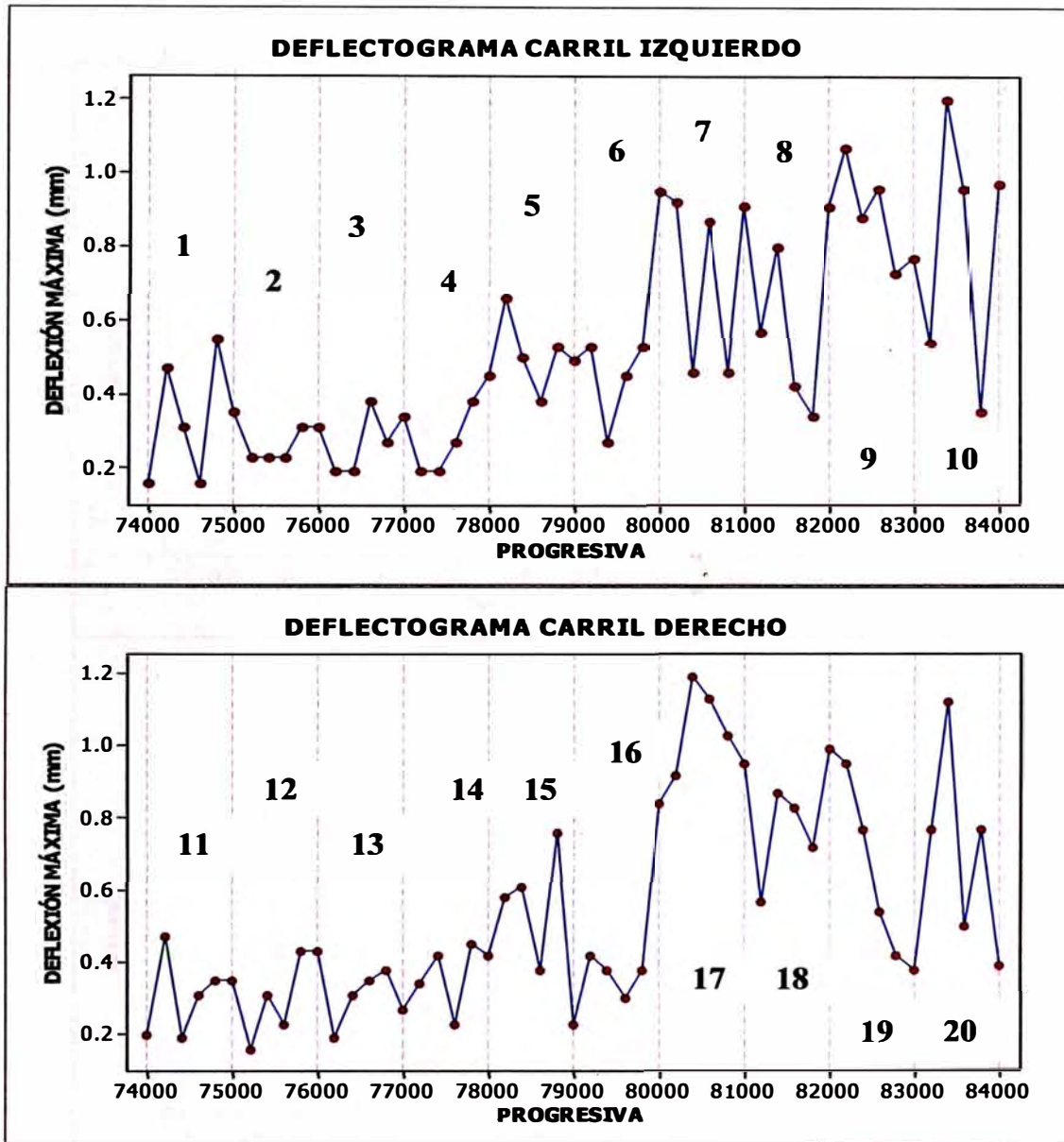


Figura N° 1.20. Deflectograma del carril izquierdo progresiva 74+000 a 84+000.

- Realizar la prueba de normalidad mediante la prueba de Shapiro – Wilk, sobre los datos en cada tramo, lo que para nuestro caso son 10 tramos por cada carril, es decir tenemos 20 tramos en total con 6 datos por tramo, ya que se tomo el último dato un tramo como el primero del siguiente tramo.

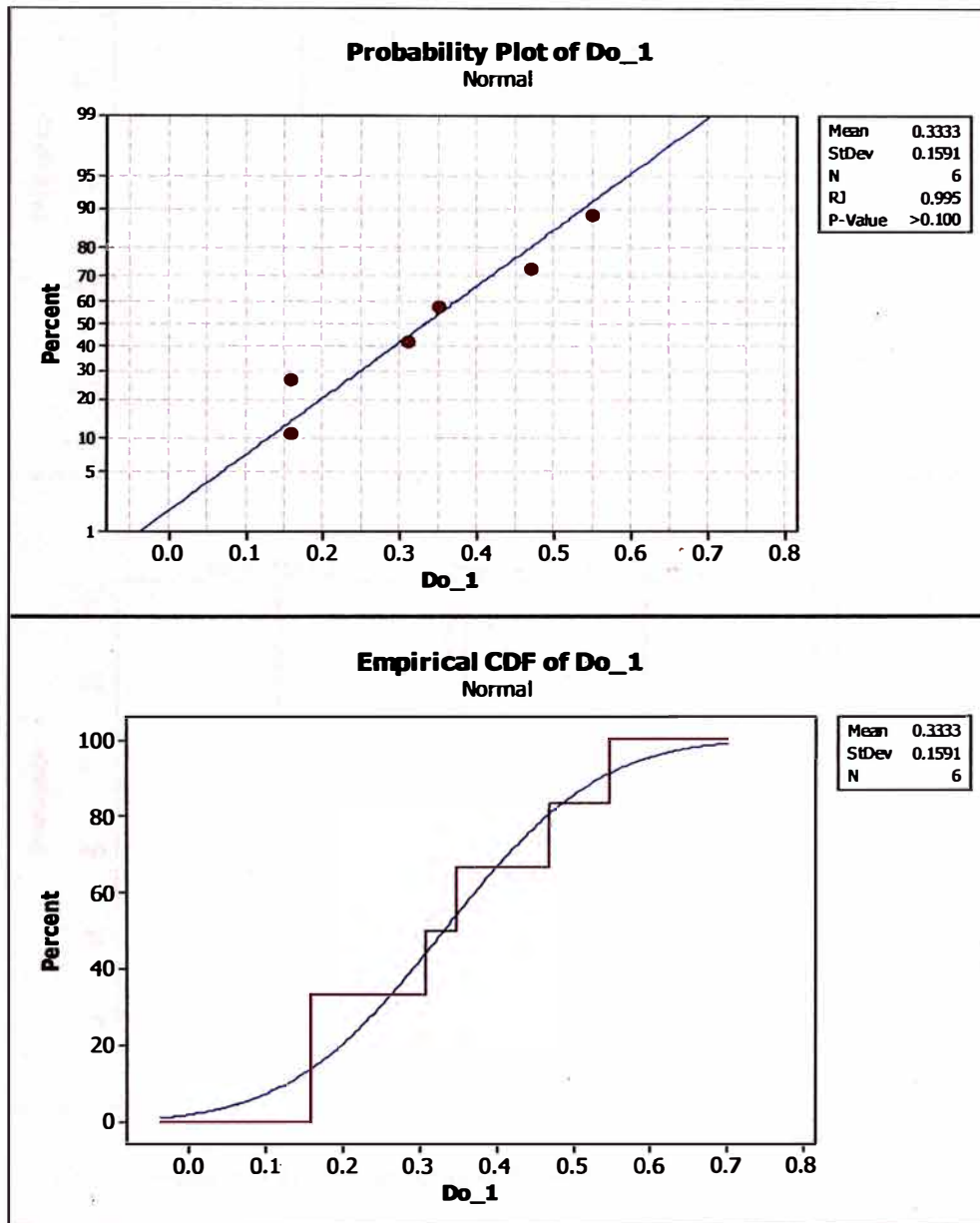


Figura N° 1.21. Prueba de normalidad progresiva 74+000 a 75+000.

- Aplicación del programa Bootstrap, para normalizar la muestra y calcular la deflexión media, desviación estándar y la deflexión característica.

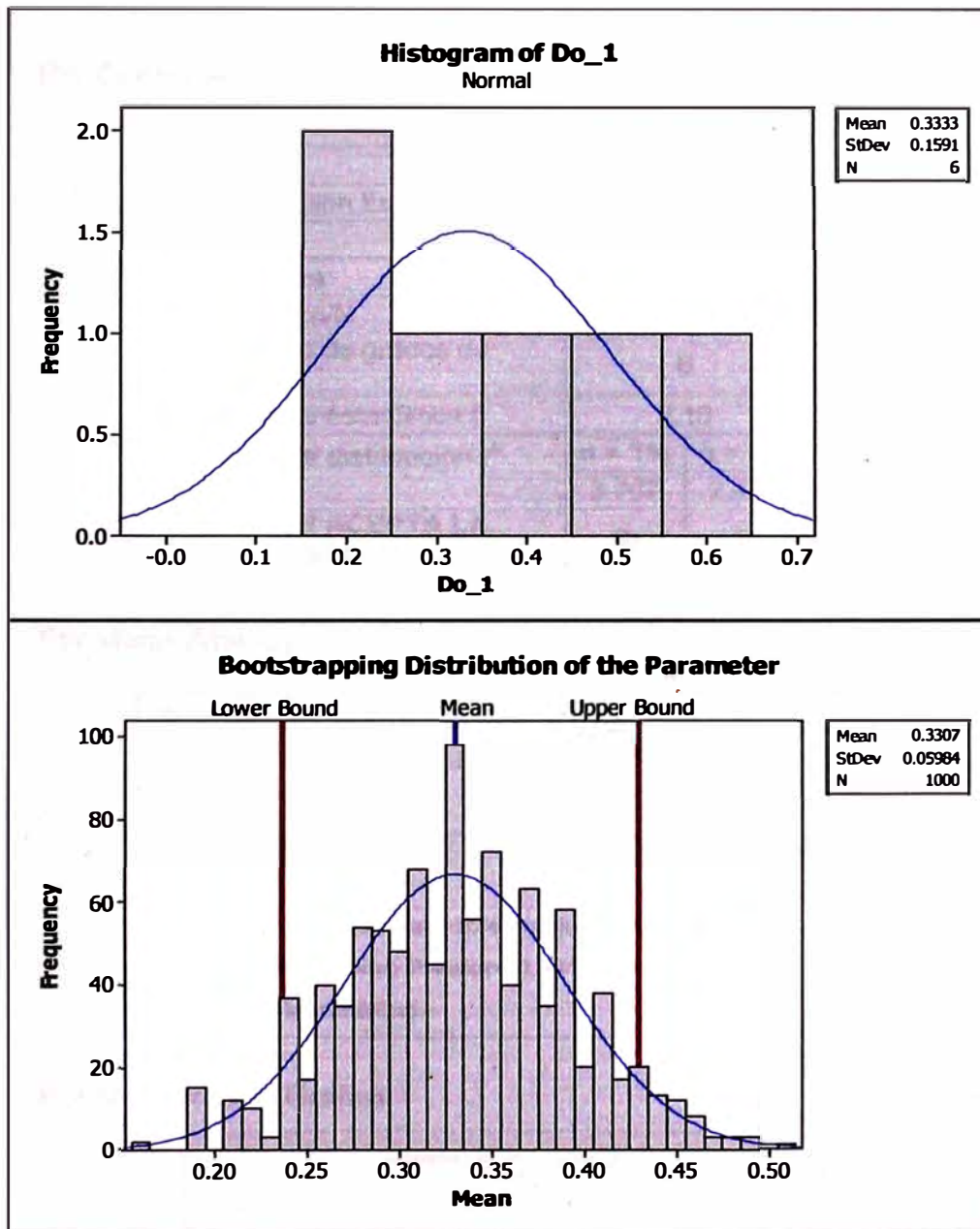


Figura N° 1.22. Histograma tramo 1 – progresiva 74+000 a 75+000.

- Realización de las pruebas de similitud con los métodos Conreval, Mann Whitney y Curva de distribución acumulada.

Se muestra a manera de ejemplo las pruebas del tramo 1 y 2.

Por Conreval:

Sector	1	2
Media	0.3307	0.2766
Desviación Estándar	0.0598	0.0196
N	6	6
Varianza	0.0036	0.0004
Varianza/N	0.0006	0.0001
Número de grados de libertad	6	
Variable estadística t'	2.10	
Valor de distribución t* (tabla)	$\alpha = 1\%$ 3.707	$\alpha = 5\%$ 2.447
SE ACEPTA LA SIMILITUD?	SI	SI

Por Mann Whitney:

Point estimate for ETA1-ETA2 is 0.0600
 95.5 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-0.1499,0.2399)
 W = 42.5
 Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 not = ETA2 is significant at 0.6310
 The test is significant at 0.6248 (adjusted for ties)
Observación: como P-valor= 0.6310 > 0.05, entonces se acepta la similitud.

Por comparación Grafica:

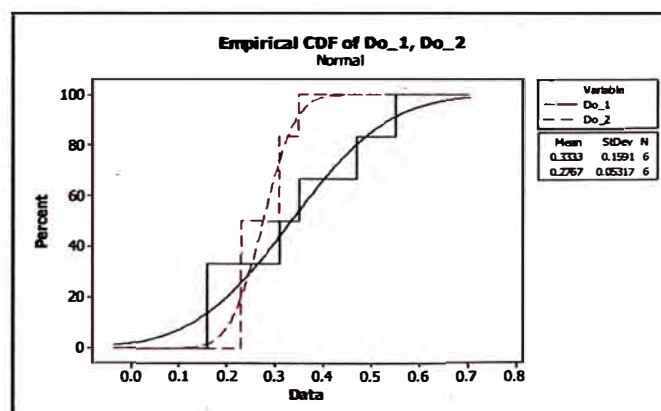


Figura N° 1.23. Comapración de métodos progresivas 74+000 a 76+000.

- Reagrupamiento o sectorización final.

En la figura N° 1.24 se muestra la sectorización inicial asumida y la sectorización final luego de las pruebas de similitud.

En ella se puede ver que luego de la evaluación estadística los 20 sectores asumidos finalmente se convirtieron en 4 sectores de similar condición deflectométrica.

SECTORIZACIÓN INICIAL DEL TRAMO km 74 + 000 - km 84 + 000

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

SECTORIZACIÓN FINAL DEL TRAMO km 74 + 000 - km 84 + 000

HOMOGENEIZACIÓN

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figura N° 1.24. Sectorización de tramo evaluado.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍAS DEL CÁLCULO INVERSO Y DIRECTO

2.1 ANTECEDENTES

El cálculo inverso ha creado grandes oportunidades para el analista encargado de obtener los parámetros de los módulos elásticos de las capas de un pavimento basadas en el uso de un equipo de deflectometría.

Cada programa desarrollado para el cálculo inverso tiene sus propios puntos fuertes así como sus debilidades, tanto es así que dos programas no dan exactamente el mismo conjunto de resultados. Con suerte, los resultados de dos diferentes programas de cálculo inverso pueden estar cerca uno del otro.

Un enfoque llamado cálculo directo ha sido desarrollado a través de la Administración Federal de Carreteras (FHWA).

Este procedimiento de cálculo puede ser empleado para detectar otros métodos de determinación de las propiedades elásticas de las capas o como un método independiente de la determinación de las propiedades capas elásticas para el diseño de la rehabilitación del pavimento.

Se presenta un criterio de selección para la revisión y evaluación de los módulos obtenidos con el método de cálculo inverso. Este enfoque, permite al usuario elegir cualquier programa de cálculo inverso, y comparar los resultados de los dos métodos de evaluación.

Lo ideal sería que, si estos enfoques dan similares (pero no idéntico) resultados, se puede estar razonablemente seguro de que los resultados obtenidos a través de cualquier método serán razonables y sostenibles para su posterior utilización en la evaluación de pavimentos y su diseño de rehabilitación.

2.2 CÁLCULO INVERSO

El cálculo inverso es una evaluación mecánica de las deflexiones de la superficie de un pavimento, las cuales son generadas por una carga estándar y medidas con un equipo patrón.

El proceso del cálculo inverso como se puede observar en la figura 2.1 infiere la toma de una medida de deflexión la cual trata de igualarla (basándose en un error tolerable) con una deflexión superficial generada desde una estructura de pavimento idéntica usando un modulo de elasticidad asumido.

Estos módulos asumidos en el cálculo directo son ajustados en un proceso iterativo hasta que se produzca la deflexión superficial que se aproxime a la deflexión medida.

De esta manera una vez que se llega a la deflexión deseada, el juego de módulos asumidos en el último paso de la iteración es asumido como el real de campo para cada capa de la estructura.

Este proceso iterativo se realiza mediante el uso de un software de computadora.

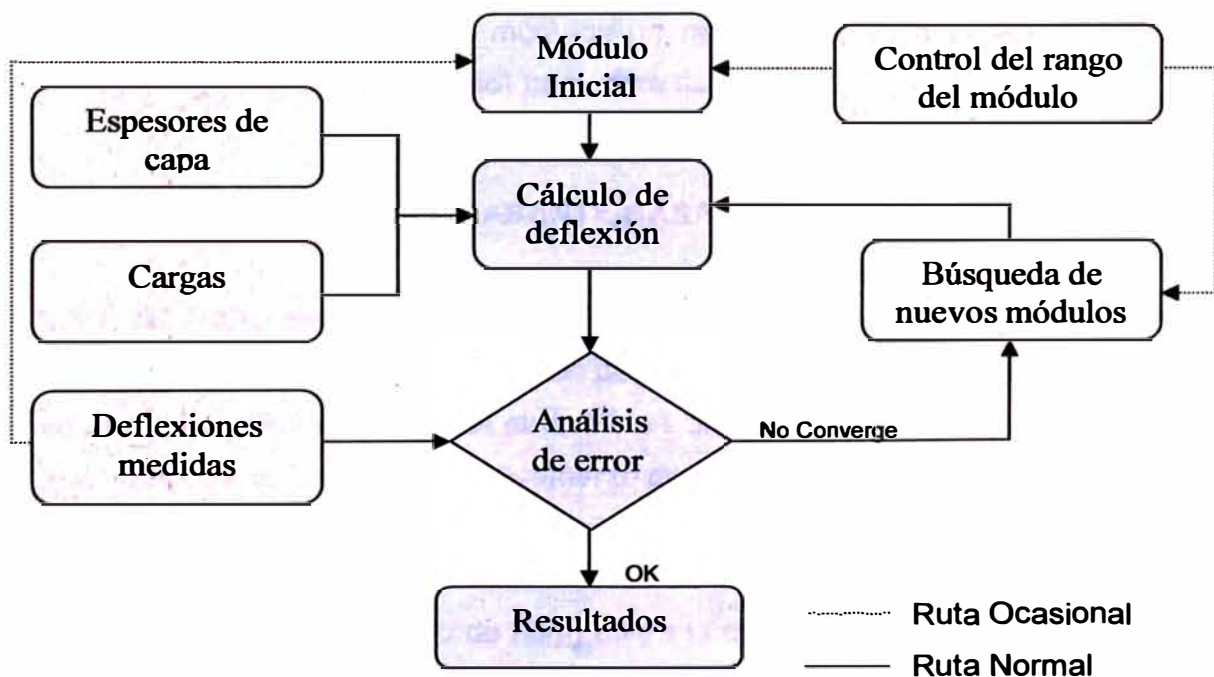


Figura 2.1. Diagrama de flujo del proceso de Cálculo Inverso

La figura 2.1, como se indico anteriormente describe el proceso del cálculo inverso, a continuación se detalla el concepto de cada ítem:

- Deflexiones medidas: Deflexiones superficiales medidas en campo y asociadas a las cargas.
- Espesores y carga: Espesor de cada capa y niveles de carga para un ensayo específico.
- Modulo inicial: Es el modulo inicial usado en el programa de computo para calcular las deflexiones. Usualmente estos módulos son estimados de la experiencia o de algunas ecuaciones existentes.
- Calculo de deflexiones: Generalmente se utilizan programas de cómputo de sistemas de capas lineales para determinar el bulbo de deflexiones.
- Chequear error: Este elemento compara las deflexiones medidas y las calculadas. Existen varias medidas del error que pueden ser utilizados para la comparación.
- Nuevos módulos: Se emplean varios métodos en los diferentes programas de cómputo de cálculo inverso para converger a un juego de módulos de elasticidad que produzcan un error aceptable entre los bulbos de deflexiones medidos y calculados.
- Control de rango de módulos: Con el fin de evitar que el programa converja a valores de módulos no razonables, es necesario definir un rango (mínimo y máximo) para cada capa.

2.3 MÓDULO DE LA SUBRASANTE BASADO EN EL MODELO DE HOGG

2.3.1 METODO DEL CÁLCULO DIRECTO

Un metodo para determinar el modulo de la subrasante, bajo una carga impuesta es el modelo de Hogg. El cual se basa en un sistema hipotetico de dos capas que consisten en una placa relativamente delgada sobre una base elastica.

El metodo simplifica el tipico sistema elastico de varias capas en una equivalente de dos capas.

El procedimiento del modelo de hogg utiliza la deflexion en el centro de la carga y una de las deflexiones adicionales fuera del punto inicial de la aplicación del

punto de carga. Dependiendo de la selección de valores a lo largo de la curva de deflexión usada para calcular el módulo de la subrasante, existirá la posibilidad de sobre o subestimar el módulo de elasticidad.

Hogg mostró que la distancia radial donde la deflexión es aproximadamente la mitad de la deflexión bajo el punto inicial de carga, era eficaz para eliminar la tendencia de valoración o error estadístico de los parámetros.

Se consideran variaciones en el espesor del pavimento y la relación entre la rigidez del pavimento y la rigidez de la subrasante, ya que la distancia en donde la deflexión es la mitad de la desviación máxima está controlada por estos factores.

Las ecuaciones para este cálculo son:

$$E_0 = I \frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2(1 - \mu_0)} \left[\frac{S_0}{S} \right] \left(\frac{p}{\Delta_0 l} \right)$$

Figura N° 2.2. Módulo de la subrasante según Hogg.

$$r_{50} = r \frac{(1/\alpha)^{1/\beta} - B}{\left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\Delta_0}{\Delta_r} - 1 \right) \right]^{1/\beta} - B}$$

Figura N° 2.3. Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión máxima.

$$l = y_0 \frac{r_{50}}{2} + [(y_0 r_{50})^2 - 4m a r_{50}]^{1/2}$$

$$\text{Si } \frac{a}{l} < 0.2, \text{ entonces } l = (y_0 - 0.2m) r_{50}$$

Figura N° 2.4. Longitud Característica de la curva de deflexión.

$$\left(\frac{S_0}{S} \right) = 1 - \bar{m} \left(\frac{a}{l} - 0.2 \right)$$

$$\text{Si } \frac{a}{l} < 0.2, \text{ entonces } \frac{S_0}{S} = 1.0$$

Figura N° 2.5. Relación entre la rigidez por carga puntual y carga distribuida.

Donde:

E_0 = Módulo de elasticidad de la subrasante

μ_0 = Coeficiente de Poisson de la subrasante

S_0 = Rigidez Teórica por carga puntual

S = Rigidez del pavimento = p / Δ_0 (carga distribuida)

p = Carga aplicada

Δ_0 = Deflexión en el punto inicial de carga (Deflexión máxima)

Δ_r = Deflexión a la distancia radial r

r = Distancia radial del punto inicial de carga

r_{50} = Distancia radial para la cuál $\Delta_r / \Delta_0 = 0.5$

h = Espesor de la subrasante

I = Factor de Influencia — ver Tabla 1

α = Coeficiente de ajuste de curva—ver Tabla 2.1

β = Coeficiente de ajuste de curva—ver Tabla 2.1

B = Coeficiente de ajuste de curva—ver Tabla 2.1

y_0 = Coeficiente para la longitud característica—ver Tabla 2.1

m = Coeficiente para la longitud característica—ver Tabla 2.1

\bar{m} = Coeficiente para la relación de rigideces—ver Tabla 2.1

Wiseman y Greenstein, señalaron 3 casos que implementaba el modelo de Hogg. Uno era para una fundación infinita elástica y los otros dos casos son para un estrato finito elástico con un espesor efectivo que se asume aproximadamente igual a 10 veces la longitud característica.

En el cuadro N° 2.1 muestra los valores establecidos para las constantes usadas en los 3 casos del modelo de Hogg.

El uso del caso II, es recomendado para la obtención de los valores reales de diseño, y ha sido ampliamente utilizado para el cálculo del módulo de la subrasante para el propósito de evaluación de pavimentos usando el cálculo directo.

El caso II del modelo de Hogg se ha usado ampliamente y ha mostrado tener buenos resultados ante una variedad de tipos de pavimentos y lugares. Este caso II presenta una alta correlación con los módulos de subrasantes halladas con el cálculo inverso. La diferencia de valores de los módulos de la subrasante obtenidas con el cálculo inverso y el cálculo directo se debe generalmente a la no linealidad de la subrasante, así como al cálculo de una profundidad finita del estrato igual a 10 veces l_0

ECUACION	CASOS		I	II	III
		Profundidad del estrato rígido	h/l_0	10	10
	Coefficiente de Poisson	u_0	0.50	0.40	Todos
1	Factor de Influencia	l	0.1614	0.1689	0.1925
2	Valor de Δ_r/Δ_0		> 0.70	> 0.426	Todos
	$r_{50}=f(\Delta_r/\Delta_0)$	α	0.592	0.548	0.584
		β	2.460	2.629	3.115
		B	0	0	0
	Rango Δ_r/Δ_0		< 0.70	< 0.426	
	$r_{50}=f(\Delta_r/\Delta_0)$	α	0.219	0.2004	
β		371.1	2283.4		
B		2	3		
3	$l=f(r_{50},a)$	y_0	0.620	0.602	0.525
		m	0.183	0.192	0.180
4	$S_0/S=f(a/l)$	\bar{m}	0.52	0.48	0.44

Cuadro N° 2.1. Coeficientes para el modelo de Hogg. Fuente: Guidelines for Review and Evaluation of Backcalculation Results, The Federal Highway Administration (FHWA), 2006.

2.3.2 MÉTODO DEL CÁLCULO DIRECTO (YONAPAVE)

Otra forma de medición de las necesidades estructurales de un pavimento es el método denominado YONAPAVE.

Es un método simple y directo para calcular el número estructural efectivo del pavimento (SN_{eff}), basándose en el análisis de curvas o cuencos de deflexiones, empleando el concepto del área del cuenco de deflexión.

Para la aplicación de este método no se requiere saber o conocer el espesor del pavimento y no se necesita un software para su cálculo.

El método se basa en el modelo de Hogg, que representa una losa infinita sustentada por una subrasante elástica de espesor finito o infinito.

A continuación se muestra los parámetros y las definiciones del modelo, en la cual se asume los valores de $u_p=0.25$ y $u_{sg}=0.5$:

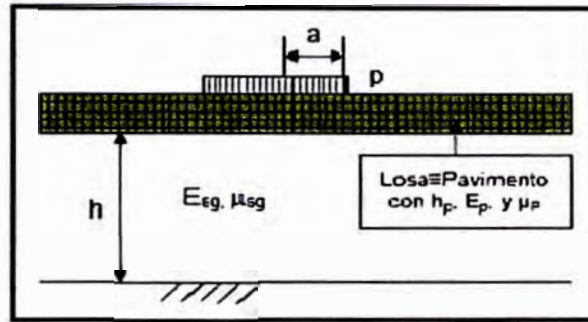


Figura N° 2.6. Geometría del modelo de Hogg.

Donde:

E_p = Modulo de pavimento.

E_{sg} = Modulo de subrasante.

u_p = Coeficiente de Poisson del pavimento.

u_{sg} = Coeficiente de Poisson de la Subrasante.

$$D = \frac{E_p h_p^3}{12(1 - \mu_p^2)}$$

Figura N° 2.7. Rigidez de la losa (pavimento)

$$l_0 = \sqrt[3]{\frac{D}{E_{sg}} \times \frac{(1 - u_{sg})(3 - 4u_{sg})}{2(1 - u_{sg})}}$$

Figura N° 2.8. Longitud Característica.

La relación del SN_{eff} , el espesor y la rigidez en la guía AASHTO es:

$$SN_{eff} = 0.0045 h_p^3 \sqrt[3]{E_p}$$

Figura N° 2.9. SN_{eff} Según AASHTO.

Donde:

h_p = espesor total de la capa de pavimento por encima de la subrasante (pulg)

E_p = Modulo de pavimento por encima de la subrasante (psi).

La ecuación de la figura N° 2.8 se representa un sistema pavimento subrasante real, que al ser reemplazado por medio de la simplificación de Hogg se convierte:

$$SN_{ef} = 0.0182 l_0^3 \sqrt[3]{E_{sg}}$$

Figura N° 2.10. SN_{eff} reemplazando la simplificación de Hogg.

Donde:

l_0 = Longitud característica (cm).

E_{sg} = Modulo de elasticidad de la subrasante (Mpa).

El problema se reduce a determinar la Longitud Característica (l_0) y Modulo de elasticidad de la subrasante (E_{sg}) de la interpretación del cuenco de deflexiones con el Falling Weight Deflectometer (FWD).

2.4 DETERMINACIÓN DE LA RIGIDEZ DE LA SUPERFICIE BASADO EN EL MÉTODO DEL ÁREA.

El área del cuenco de deflexiones se calcula en base a la siguiente expresión:

$$AREA = 6 * [1 + 2 (D_{30}/D_0) + 2 (D_{60}/D_0) + (D_{90}/D_0)]$$

Donde:

ÁREA = Área del cuenco de deflexiones (pulg)

$D_0, D_{30}, D_{60}, D_{90}$ = Deflexiones del FWD para $r=0, 30, 60, 90$ cm respectivamente.

Como nuestra evaluación de campo se realizo con la Viga Benkelman procedemos a convertir las deflexiones halladas con Viga Benkelman (Def_{VB}) a deflexiones con el FWD (Def_{FWD}), mediante La correlación de deflexiones FWD y Viga Benkelman:

$$Def_{FWD} = \frac{Def_{VB}^{1/1.382}}{0.176}$$

Figura N° 2.11. Relación entre deflexiones FWD y VB.

En la siguiente figura N° 2.12. Puede verse que la longitud característica se determina directamente del valor del área del cuenco de deflexiones para un valor seleccionado de h_0/l_0 .

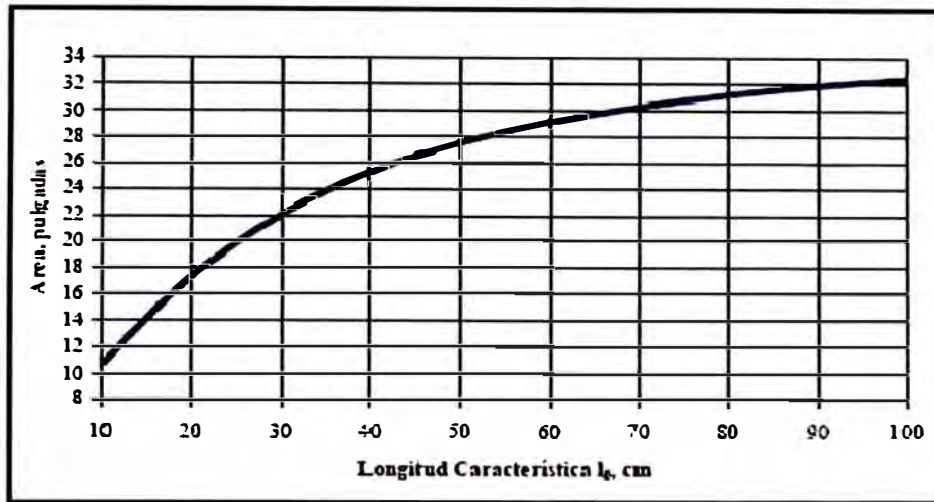


Figura N° 2.12. Área del cuenco de deflexiones vs. L_0 , para $h_0/l_0 = 10$.

En la figura N° 2.13. Se muestra la variación del Factor de deflexión máxima en función de la longitud característica para diferentes de h_0/l_0 .

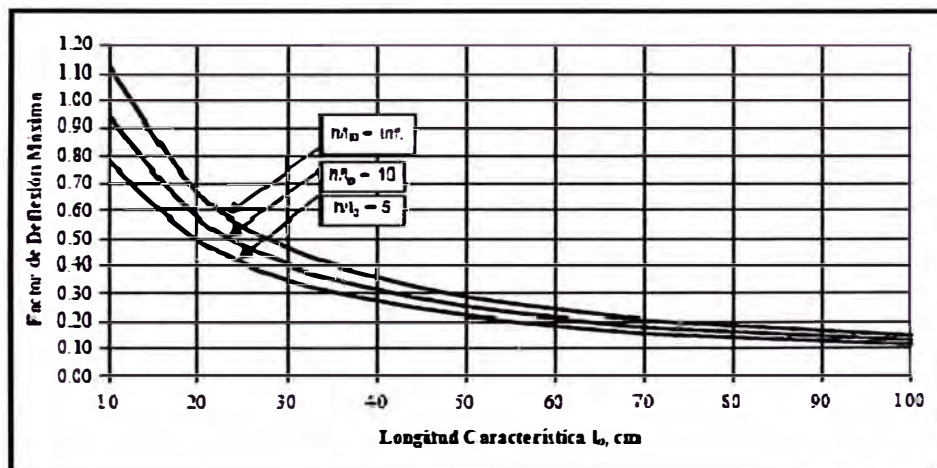


Figura N° 2.13. Factor de deflexión máxima, para diferentes valores de h_0/l_0 .

El valor de la deflexión máxima se define:

$$\text{Factor Deflexion Maxima} = \frac{D_0 E_{sg}}{pa}$$

Figura N° 2.14. Factor de Deflexión Máxima.

Donde:

D_0 = Deflexión máxima bajo el plato de carga circular del FWD de 12 pulgadas de diámetro, en unidades de longitud.

E_{sg} = Módulo de Elasticidad de la subrasante, en unidades de carga/superficie.

p = Presión en el plato de carga del FWD, en las mismas unidades de E_{sg} .

a = radio del plato de carga del FWD, en las mismas unidades de D_0 .

De la fórmula de la figura N° 2.14. Se despeja E_{sg} y se obtiene el valor deseado, como se tiene los valores de l_0 y E_{sg} , se procede a reemplazar en la fórmula de la figura N° 2.9. Obteniendo así el SN_{eff} .

2.5 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE LA CAPA INTERMEDIA

Como se muestra en las dos secciones anteriores, se puede calcular el módulo de cualquier capa intermedia a través del uso de relaciones modulares.

Por ejemplo la relación de módulos desarrollado por Dorman y Metcalf, entre dos capas adyacentes de los materiales se puede utilizar si las capas de base y sub-base no están consolidadas.

$$E_{base} = 0.2 \times h_2^{0.45} \times E_{sub}$$

Figura N° 2.15. Módulo de la base no consolidada, usando la relación de Dorman y Metcalf.

Donde:

E_{base} = Módulo de la base de Dorman y Metcalf. (MPa)

h_2 = espesor de la capa de base intermedia (mm)

E_{sub} = Módulo de Subrasante (MPa)

2.6 CÁLCULO MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE

Los datos evaluados se procesaron mediante el uso de dos programas computacionales denominados Michback y Michpave, el primero se usa para el Cálculo Inverso y el segundo para el Cálculo Directo.

2.6.1 Michback

El MICHBACK es un programa informático para el Cálculo Inverso de las propiedades de la capa de un pavimento flexible y compuesto a partir de datos obtenidos con un deflectómetro el falling weight deflectometer (FWD).

El desarrollo de MICHBACK fue realizado por el Departamento de Transporte de Michigan y la Universidad de Michigan.

MICHBACK tiene muchas características de fácil uso y ventajas sobre otros programas de Cálculo Inverso de las cuales podemos mencionar los siguientes:

- Está basada en menús
- Cuenta con formularios que aparecen en pantalla para facilitar la entrada de datos, con un error de captura
- Permite el uso de unidades en el sistema inglés y unidades en el SI.
- Puede acomodar hasta 10 sensores del FWD.
- Puede leer los archivos creados por el FWD KUAB o archivos con formato ASCII.
- Muestra una vista previa gráfica de los datos del sensor que figuran en los archivos de FWD.
- Permite pre-procesamiento de datos FWD.
- Detecta e informa sospechosos datos FWD.
- Puede realizar el cálculo inverso con cualquier número de estaciones en un solo procedimiento, utilizando una deflexión representativa o la desviación media.
- Puede realizar el cálculo la capa rígida profundidad o un espesor de capa, además de los módulos de capa.
- Gráfica y muestra los perfiles de los módulos calculados.

MICHBACK utiliza un método modificado de Newton para el cálculo inverso de las propiedades de las capas de un pavimento utilizando los datos de FWD. Además de los módulos de las capas, la profundidad de una capa rígida o el espesor de una capa también pueden ser calculadas.

Las deflexiones de la superficie se calculan utilizando una versión ampliada del programa denominado CHEVRON. La cuadratura numérica en el programa original de Chevron se ha mejorado para que las deflexiones de los pavimentos rígidos se calculen con precisión.

Los detalles del método de Cálculo Inverso se pueden encontrar en las siguientes publicaciones:

- Harichandran, R. S., Mahmood, T., Raab, A., and Baladi, G. Y. (1993). "A modified Newton algorithm for backcalculation of pavement layer properties." *Transportation Research Record*, 1384, 15-22.
- Harichandran, R. S., Mahmood, T., Raab, A., and Baladi, G. Y. (1994). "Backcalculation of pavement layer moduli, thicknesses and bedrock depth using a modified Newton method." In *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli (Second Volume)*, ASTM STP 1198, H. L. Von Quintas, A. J. Bush and G. Y. Baladi (eds.) American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 68-82.

2.6.2 Michpave

MICHPAVE es programa con menús fácil de usar, no lineal que usa elementos finitos para el análisis de pavimentos flexibles.

El programa calcula los desplazamientos, tensiones y deformaciones en el pavimento debido a la carga de una sola rueda circular, y es capaz de explicar el comportamiento de las tensiones de las capas de suelo granular y cohesivo en la sección transversal de un pavimento.

La respuesta computarizada se puede mostrar de forma gráfica. La Información práctica de diseño tales como resistencia a la fatiga también se estima mediante ecuaciones empíricas.

El desarrollo de MICHPAVE versión 1.0 para DOS fue apoyado por el Departamento de Transporte de Michigan.

MICHPAVE tiene muchas características de fácil uso y ventajas sobre otros programas no lineal de elementos finitos.

- Está basada en menús
- Cuenta con formularios que aparecen en pantalla para facilitar la entrada de datos, con una captura de errores.
- Ha incorporado en los modelos no lineales materiales específicos para suelos granulares y cohesivos.

- Utiliza un límite inferior flexible para mejorar la precisión, mientras que al mismo tiempo, acelera los cálculos.
- Utiliza la interpolación para estimar con mayor precisión las tensiones en las interfaces de la capa.
- Predice la resistencia a la fatiga y los espesores mediante el uso de modelos empíricos calibrados con datos de campo (Baladi 1989).
- Puede graficar y mostrar las respuestas calculadas.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DEL CÁLCULO INVERSO Y DIRECTO

3.1. PANORAMA DEL USO

Tradicionalmente se ha recurrido a los sondeos de exploración directa con la finalidad de conocer las características estructurales de un pavimento, mediante el ensayo en laboratorio de las muestras que se obtuvieron en campo para poder conocer sus propiedades mecánicas y posteriormente se incorporaban al modelo del pavimento, esta metodología es costosa, lenta y de carácter destructivo.

La alternativa a la metodología tradicional es la propuesta de los ensayos no destructivos (END) las cuales consideran las deflexiones que se generan en un pavimento al ser sometidas a una carga patrón.

En la actualidad los ensayos no destructivos han tomado gran importancia en la evaluación estructural de un pavimento debido a su rapidez, economía y carácter no destructivo del pavimento.

Una forma de calcular los módulos de un pavimento en servicio es mediante el cálculo inverso.

En resumen tanto el cálculo inverso como el cálculo directo pueden ser usados, para la evaluación estructural de una carretera. Está en el analista el considerar cuál de estas dos metodologías representa mejor las condiciones estructurales del pavimento.

Aunque la metodología del cálculo directo se muestre de fácil desarrollo y práctico, se puede decir que está diseñado para el control rutinario de un proyecto y para fines de selección de los datos iniciales para el proceso del cálculo inverso, es decir determinar si al realizar el cálculo inverso para hallar los módulos, las estimaciones calculadas sean razonables ya que dos métodos muy diferentes no deberían producir resultados muy diferentes para un mismo tramo a evaluar.

3.2. USOS DE LAS HOJAS DE CÁLCULO PARA EL CÁLCULO DIRECTO

Se presenta a continuación el uso de una hoja de cálculo realizado en Excel, para pavimentos flexibles con unidades en el Sistema Internacional (SI) proporcionada por el LTPP, el cual puede ser solicitado por medio del siguiente correo ltppinfo@fhwa.dot.gov. La hoja de cálculo se adjunta en un CD.

Cabe indicar que existen limitaciones en la utilización de esta hoja de cálculo. Una de ellas es que está diseñada para el FWD y con un máximo de 7 lecturas. Para pavimentos flexibles tres de las siete lecturas elegidas deben ser colocadas en la ubicación 0, 8", 12" o 0,200 y 300 mm.

Además estos 3 valores deben ser ordenados como los 3 primeros de los 7 datos.

El uso de estas posiciones hace que sea posible calcular el término área.

El resto de datos deben ser elegidos de tal manera que abarquen la región del cuenco de deflexiones de los cuales uno es aproximadamente la mitad de la deflexión en el centro.

Al utilizar las técnicas del cálculo directo el operador considerara un máximo de 3 capas para cada cuenco de deflexiones, siendo ellas la superficie, base y subrasante.

Los pasos para usar la hoja de cálculo se indican a continuación:

Cargar la hoja de cálculo y habilitar los macros.

Una vez cargado guárdela con un nuevo nombre para que la plantilla no se pierda.

Todas las zonas con sombra deben ser llenadas con los datos de entrada correcta.

En la celda I-2, escriba un nombre o un identificador para el proyecto.

En la celda C-8 hasta la celda R-8 y hasta un máximo de 1000 filas ingresar los datos de deflexión.

Los datos desde la columna C a la J, son datos de identificación.

En la celda U-5, rellene el radio de la placa, tenga en cuenta como se indica en la celda U-6, que solo hay dos radios posibles.

En la celda W-5 a AB-5, rellene la posición del sensor. Tenga en cuenta que en la celda V-5 (=0).

La constante de la celda AO-5, solo es necesario si desea ejecutar un cálculo de tensiones, deformaciones y desviaciones después de los módulos de capa obtenidos.

En la celda AH-8 a AH-xxx, ingresar el espesor de la capa de rodadura.

Para las hojas de cálculo flexible se usan las celdas de AV-8 a AV-xxx, están disponibles para emplear la relación de Dorman y Metcalf, siempre que la base y sub-base estén constituidos por materiales no consolidados.

3.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para el uso del cálculo inverso se dividió la estructura de la carretera en 3 capas: La primera está constituida por el tratamiento superficial o slurry seal y la base mejorada con emulsión asfáltica en frío, el espesor considerado para esta primera capa es de 15 cm.

La segunda y tercera capa corresponden a la subrasante y tienen características similares, con la diferencia que la tercera capa presenta un modulo resiliente menor a la segunda. El espesor de la segunda capa se asumió en 10 cm mientras que la tercera capa tiene espesor infinito.

Este cálculo inverso se realizo con el software ya antes mencionado MICHBACK, mientras que el cálculo directo se realizo con el software denominado MICHPAVE.

En el cuadro 3.1 se puede observar los módulos resilientes calculados entre las progresivas 74+000 y 84+000, en ella se puede observar que los resultados obtenidos para el año 2008 y los resultados del año 2010 no presentan mayor variación, lo cual podemos asumir que esta mínima variación se deba a que durante este periodo la vía ha recibido un tratamiento superficial que ha mejorado su condición.

N	PROGRESIVA	2008	2010	N	PROGRESIVA	2008	2010
1	74+000	1472.8	1450.0	27	79+200	952.0	378.0
2	74+200	390.5	534.7	28	79+400	577.6	781.3
3	74+400	649.7	851.0	29	79+600	623.0	444.2
4	74+600	662.8	1450.0	30	79+800	590.5	364.3
5	74+800	663.5	432.5	31	80+000	513.5	145.0
6	75+000	290.4	756.6	32	80+200	784.9	103.2
7	75+200	613.4	1099.2	33	80+400	157.2	534.7
8	75+400	358.0	1146.8	34	80+600	160.6	179.0
9	75+600	458.4	997.5	35	80+800	158.4	498.0
10	75+800	863.6	844.0	36	81+000	197.7	141.0
11	76+000	848.1	916.3	37	81+200	601.4	389.0
12	76+200	795.6	1261.3	38	81+400	225.0	189.5
13	76+400	839.5	1346.3	39	81+600	183.2	547.3
14	76+600	631.4	684.7	40	81+800	256.8	801.8
15	76+800	682.6	968.0	41	82+000	222.8	113.4
16	77+000	953.0	754.0	42	82+200	237.3	93.3
17	77+200	795.6	1346.3	43	82+400	272.9	151.2
18	77+400	704.3	1261.3	44	82+600	912.3	102.4
19	77+600	952.8	968.0	45	82+800	795.6	236.1
20	77+800	638.8	563.5	46	83+000	292.7	222.5
21	78+000	595.5	606.0	47	83+200	757.7	412.4
22	78+200	418.7	318.9	48	83+400	645.4	86.1
23	78+400	918.5	497.0	49	83+600	704.3	108.4
24	78+600	522.8	508.0	50	83+800	953.8	751.5
25	78+770	598.7	306.5	51	84+000	952.8	143.0
26	79+000	738.8	484.0				

Cuadro N° 3.1. Módulos Resilientes entre las progresivas 74+000 y 84+000 de la carretera Cañete - Chupaca.

Después de haber llevado a cabo el procesamiento y obtener los resultados, se debe comprobar la razonabilidad de los resultados, antes de ser usados para fines de rehabilitación o diseño.

3.4. DIRECTIVAS PARA GENERAR UN MANUAL DE TRABAJO

La evaluación de la capacidad estructural de un pavimento se puede resumir en los siguientes pasos:

- Realizar la medición de las deflexiones usando un equipo que mida la deformación del pavimento bajo una carga patrón, pudiendo ser este equipo una viga Benkelman, un deflectómetro de Impacto (FWD), etc.
- Realizar una sectorización longitudinal inicial de la carretera basada en las deflexiones que se hallaron en campo usando para ello un deflectograma que en su eje de abscisas muestre la progresiva y en el eje de las ordenadas la deflexión máxima.
- Una vez dividida en sectores se realiza una prueba de normalidad sobre el conjunto de datos para determinar su similitud con una distribución normal. Para nuestro caso se usó la prueba de Shapiro – Wilk.

- Si los datos evaluados no se asemejan a una distribución normal, se utiliza el método Bootstrap, el cual ajustara una muestra no normal a una normal. Así mismo el método nos muestra como respuesta a su análisis el cálculo de la deflexión media, desviación estándar y deflexión característica con un intervalo de confianza del 95%.
- Se procede a realizar luego la prueba de similitud mediante el uso de varios métodos como pueden ser; el método "t" Student (Conrevial), Mann Whitney, curva de distribución acumulada, etc.
- Los sectores inicialmente sectorizados, se reagrupan mediante las pruebas de similitud, obteniéndose una sectorización final del tramo.
- La obtención de los módulos elásticos de las capas constitutivas de un pavimento se puede realizar por medio de la metodología de la FHWA denominado cálculo inverso.
- La obtención de los valores de deflexión pueden ser calculados por medio de la metodología de la FHWA, denominado calculo directo, también mediante la metodología Yonapave.
- Ambas metodologías llámese cálculo directo como el inverso se pueden calcular mediante el uso de un software que para nuestro caso fue el Michback (cálculo inverso) y Michpave (cálculo directo).
- Se recomienda el uso de este software por que integra tanto el cálculo directo como el inverso.

CONCLUSIONES

En el presente informe se presenta una metodología para el uso del cálculo inverso y directo los cuales permiten evaluar estructuralmente una vía mediante el uso de métodos matemáticos como el modelo de Hogg.

Dentro de este contexto podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- La proceso de toma de datos de las deflexiones mediante el uso de la viga Benkelman resulta poco confiable debido al alto porcentaje de error humano que se observo en campo debido a la Sincronización entre las personas involucradas llámese chofer, operario que indique la toma de datos, operario que lee los datos (retiene en la memoria 4 datos por toma) y operario que escribe los datos.
- La sectorización inicial, asumida de 20 sectores se redujo mediante una evaluación estadística a 4 sectores de similar condición deflectométrica lo que permite una mejor programación de los mantenimientos a realizar.
- Las deflexiones que fueron halladas mediante el uso del Cálculo Directo (Michpave) se usaron para iterar y hallar los módulos de las capas de un pavimento mediante el uso del cálculo inverso (Michback).
- De los los módulos resilientes calculados entre las progresivas 74+000 y 84+000, se puede observar que los resultados obtenidos para el año 2008 y los resultados del año 2010 no presentan mayor variación, lo cual podemos asumir que esta mínima variación se deba a que durante este periodo el tramo de carretera ha recibido un tratamiento superficial que ha mejorado su condición.
- Debido a su bajo costo el uso de la Viga Benkelman se sigue dando en Latinoamérica, pero se tendría que evaluar el beneficios que se obtendría con la medición sistemática de los cuencos de deflexión a nivel de la red nacional mediante el uso de nuevas tecnologías como el FWD o deflectómetro de impacto, aunque su elevado costo haga desistir sobre su uso, esta tecnología no debería evaluarse solo por su costo sino por el beneficio que conlleva su uso.

RECOMENDACIONES

- Se requiere de equipos de evaluación de ensayos no destructivos de alto rendimiento, que permitan una rápida evaluación de la vía, lo que conlleva a una pronta respuesta (Mantenimiento) evitando así el mayor deterioro de la vía.
- Se requiere sistematizar la recopilación de datos, para poder almacenarlos adecuadamente y ser usados para su análisis en los momentos que se requieran.
- Se debe contar con la mayor información analizada, para así acceder a una apreciación visual que englobe toda la problemática del pavimento es decir su comportamiento estructural y el estado superficial.
- Se debería evaluar el uso de nuevas tecnología como el deflectómetro de impacto (FWD), para evaluar el comportamiento estructural del pavimento de una vía pero no en base a su costo si en función a su beneficio.

BIBLIOGRAFÍA

- GUTIÉRREZ LÁZARES, José Wilfredo, Modelación geotécnica de pavimentos flexibles con fines de análisis y diseño en el Perú, Tesis de maestría, UNIFIC. Perú. 2007
- LEGUA PEREZ, Carlos Rolando, Evaluación estructural de la carretera Cañete-Yauyos-Chupaca con viga Benkelman. Método matemático. Tramo km 69+000 – 74+000, Informe de Suficiencia UNIFIC. Perú. 2009.
- SAMANIEGO QUICHICA, José Luis, Evaluación estructural de la carretera Cañete-Yauyos-Chupaca con viga Benkelman - método matemático tramo KM 74+000 al KM 79+000 Informe de suficiencia, Universidad Nacional de Ingeniería Civil, 2009-II.
- Jiang Y.J., Lukanen E.O., Stubstad R.N., Guidelines for Review and Evaluation of Backcalculation Results, The Federal Highway Administration (FHWA), 2006.

ANEXOS 1

SUGERENCIA DE METODOLOGÍA PARA UN ESTUDIO DE REHABILITACIÓN.

A continuación se describe una metodología desarrollada para el estudio de un proyecto de rehabilitación de pavimentos.

Recopilación y análisis de los antecedentes y tránsito de la vía en estudio

Identificar el lugar del emplazamiento y su vinculación con otras vías de enlace. Demarcación de la zona de influencia y su ubicación dentro de la región que atraviesa.

Recopilar antecedentes constructivos y/o intervenciones para recomponer el paquete estructural (tipo de capa, espesor, fecha de ejecución). Antecedentes de tránsito, TMDA (Tránsito medio Diario Anual) en el MTC, estaciones de peaje, censos vehiculares.

Número "N" de ejes equivalentes en efecto destructivo a ejes de 8.2 tn.

Crecimiento anual acumulativo en función de la historia y del impacto de la rehabilitación. Período de diseño.

Procesamiento y análisis de las auscultaciones del estado superficial y estructural del pavimento.

Inspección visual, consiste en una o varios recorridos para tomar conocimiento sobre el estado actual del pavimento y sus características más relevantes vinculadas con el deterioro de la superficie.

Registros fotográficos ilustrativos de este recorrido.

Medición de la deformación longitudinal y transversal de la vía.

Medición de deflexiones, normalizada por carga, corrección por temperatura y por espesor asfáltico. Gráfica de diferencias acumuladas que posibilita la identificación de los subtramos atendiendo a diferentes respuestas estructurales.

Extracción de testigos para comprobar la estructura existente y apertura de calicatas.

Aplicación de métodos de diseño racional mecanicistas – Calculo Inverso.

Se obtiene un modelo multicapa teórico que representa la estructura del pavimento a través del espesor, modulo de deformación y coeficiente de Poisson de cada una de sus capas componentes.

Mediante un programa se realiza un proceso iterativo en el cual establecidos los espesores y propiedades elásticas de cada capa se determina las deflexiones hipotéticas que sufriría el modelo en las mismas condiciones de carga con que se ha ejecutado la medición de las deflexiones en el campo.

Se modela la estructura en función a sus valores característicos de las deflexiones considerando los ensayos realizados.

Análisis de las distintas alternativas.

Con la consolidación de toda la información recabada y analizada mediante los métodos de cálculo, ya sea en valores absolutos o con algún criterio de penalización se puede efectuar el diagnóstico de la vía.

Este diagnóstico engloba la problemática desde un punto de vista estructural y superficial.

Luego del análisis se indica si la rehabilitación es meramente superficial o es necesario hacer refuerzos o reconstrucciones de algunas capas del paquete estructural.