

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



**“ ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EVALUACIÓN DE
PAVIMENTOS POR MEDIO DE LA VIGA BENKELMAN Y EL
DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FALLING WEIGHT
DEFLECTOMETER, FWD) ”**

**PRESENTADO POR:
KERIN ALEXANDER ESCOBAR AGUIRRE
ALBERTO ALONSO GARCÍA GARCÍA
CARLOS ROLANDO GUZMÁN LÓPEZ**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DE 2007

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :
MSc. Rufino Antonio Quezada Sánchez

SECRETARIO GENERAL:
Lic. Douglas Vladimir Alfaro Chávez

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :
Ing. Mario Roberto Nieto Lovo

SECRETARIO :
Ing. Oscar Eduardo Marroquín Hernández

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DECANO:
Ing. Luis Rodolfo Nosiglia Durán

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:
INGENIERO CIVIL

Título:

**“ ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EVALUACIÓN DE
PAVIMENTOS POR MEDIO DE LA VIGA BENKELMAN Y EL
DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FALLING WEIGHT
DEFLECTOMETER, FWD) ”**

Presentado por:

**kerin Alexander Escobar Aguirre
Alberto Alonso García García
Carlos Rolando Guzmán López**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

**Ing. Mauricio Ernesto Valencia
Ing. Dilber Antonio Sánchez Vides**

SAN SALVADOR, DICIEMBRE DE 2007

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA

ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VÍDES

DEDICATORIA:

A DIOS TODOPODEROSO: Por darme vida, salud, fortaleza y sabiduría para afrontar los obstáculos, y ahora para culminar mis estudios universitarios.

A MIS PADRES: Juan Francisco Escobar y Adilia Aguirre, por su amor, su apoyo, esfuerzos y sacrificios para formar una persona de bien; este logro es la cosecha de lo que han sembrado en mi.

A MIS HERMANOS: Renan y Mirna Escobar, por estar siempre pendiente de mí, animándome para seguir adelante luchando por mis propósitos.

A MI FAMILIA: Por sus constantes muestras de apoyo y cariño durante mis años de estudio universitario.

KERIN ESCOBAR

DEDICATORIA:

A DIOS TODOPODEROSO: por que sin el nada soy, porque me ha permitido llegar a esta meta iluminando mi camino y animándome en los momentos difíciles, al mismo tiempo que me pide poner estos talentos al servicio de los demás.

A MIS PADRES: mi papá, Luís Alonso García Aldana y a mi mamá, Gilma Dinaly García de García; por su amor, comprensión, aliento, consejos, sacrificios, que sin la ayuda de ellos, este logro no hubiese sido posible.

A MI ESPOSA: Marcia Sofía Martínez de García, por animarme con su paciencia, confianza y compañía en el desarrollo de este trabajo.

A MI HIJO: Luís Alberto, porque el es mi inspiración a seguir adelante, a esforzándome a ser cada día mejor.

A MI HERMANOS: Aurora Beatriz, Gilma Raquel y Luís Mario, por el apoyo y confianza que siempre me han brindado, de forma incondicional.

A MIS ABUELOS: Teresa, Gilma, Alonso y Arturo (que esta en el cielo), quienes con su sabiduría y experiencia en la vida, han dado un aporte importante de valores morales y cristianos a mi vida.

A MIS COMPAÑEROS: con quienes compartimos muchas alegrías y dificultades durante la carrera.

A MIS PROFESORES: que con todos sus conocimientos y enseñanzas contribuyeron con mi formación profesional.

A MIS ASESORES: quienes me asistieron en todo el transcurso de este trabajo, y me brindaron su consejería y por tenerme muchísima paciencia. Por haberme dedicado un poco de su tiempo, para proporcionarme información y sugerencias valiosas, que contribuyeron para la elaboración de éste trabajo de graduación.

A TODOS LOS PROFESIONALES Y DEMÁS PERSONAS: a todos los que colaboraron con el desarrollo de éste trabajo, muchas gracias.

ALBERTO GARCIA

DEDICATORIA:

A DIOS TODOPODEROSO Y LA VIRGEN: Porque con su ayuda, iluminación y amor infinito me mostraron poco a poco el camino a seguir y me dieron las fuerzas necesarias para continuar a pesar de cualquier adversidad.

A MIS AMADOS PADRES: José Claudio Guzmán Paz y Bernarda de Guzmán quienes han estado siempre a mi lado y fueron aquellos pilares que cimentaron mi vida y forjaron mi carácter y dedicación.

A MI ESPOSA Y A MI HIJA AMADA: Elizabeth Ruiz de Guzmán y Mónica Alejandra Guzmán por llenar cada día con amor, ternura, comprensión, sacrificio, compañía y sobre todo apoyo incondicional en las decisiones que he tomado y la felicidad que comparto cuando estoy con ellas.

A MIS HERMANAS: Yaneth Guzmán, Claudia Guzmán y Sandra Guzmán por haberme brindado su apoyo, cariño y firmeza para completar hoy esta gran presea.

A MI PRIMO: Rogelio Ventura López... Mi hermano, a ti por tu amistad tu cariño y compañía y como muestra que "Si se puede" te dedico este triunfo y recuerda "Adelante".

A MIS TIOS: Fidelia López de Ventura y Guillermo Ventura por brindarme su colaboración en los momentos mas difíciles de mi vida para ustedes una muestra de agradecimiento mas.

A MI ABUELA: Concepción Rochac, por ser modelo de tenacidad, fuerza pero también de amor y dedicación te agradezco todo lo que soy porque fuiste y serás para mi una madre mas.

A MIS ASESORES: Ing. Mauricio Valencia y Dilber Sánchez, por el voto de confianza puesto en nosotros y brindarnos la oportunidad de mostrarles que aún no siendo especialista en una rama todo se logra con tenacidad, esfuerzo y dedicación.

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS: Alberto García y Kerin Alexander por ser tan buenos compañeros en las buenas y en las malas.

A MIS AMIGOS: Por ser lo que son por su ayuda y comprensión por las alegrías y tristezas; Gracias y para ustedes van estos agradecimientos también y la dedicación de mi triunfo.

CARLOS GUZMAN LOPEZ

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES:

A nuestros asesores:

Ing. Mauricio Valencia.

Ing. Dilber Sánchez.

Queremos expresar nuestros profundos agradecimientos, por su guía, paciencia, dedicación, esmero, amistad y comprensión en la realización satisfactoria de este trabajo de graduación.

A la Escuela de Ingeniería Civil, por su disposición efectiva, en las presentaciones de esta investigación.

Al Ing. Frank Dowe, por facilitarnos los medios para realizar la auscultación con la Viga Benkelman y por su valiosa asesoría.

Al Ministerio de Obras Públicas, por facilitarnos información importante para el desarrollo del proceso de investigación.

INDICE

CAPITULO I.....	1
ANTEPROYECTO	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.3. ALCANCES GLOBALES.	5
1.4. OBJETIVOS.	6
1.4.1. OBJETIVO GENERAL:.....	6
1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:	6
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	7
CAPITULO II.....	8
MARCO TEORICO	8
2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.	9
2.1. SOLICITACIONES PRINCIPALES DE UN PAVIMENTO.....	11
2.1.1. TRÁNSITO.	11
2.1.2. CLIMA.	13
2.2. MODELOS DE COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO.	15
2.3. MÉTODOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL.	18
2.3.1. MÉTODOS DIRECTOS DE AUSCULTACIÓN.	19
2.3.2. MÉTODOS INDIRECTOS DE AUSCULTACIÓN	
ESTRUCTURAL.....	21
2.4. METODO AASHTO	34
2.4.1. PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	35
2.4.2. PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	36
CAPITULO III.....	37
AUSCULTACION ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.....	37
3 AUSCULTACION ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS	38
3.1. AUSCULTACIÓN UTILIZANDO EL EQUIPO DE LA	
VIGA BENKELMAN.....	38
3.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA VIGA BENKELMAN.....	38
3.1.2. PROCEDIMEINTO DEL ENSAYO DE LA VIGA	
BENKELMAN.	40
3.1.3. PERSONAL Y EQUIPO NECESARIO PARA REALIZAR	
ENSAYO CON VIGA BENKELMAN.....	45

3.2.	AUSCULTACIÓN UTILIZANDO EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO.	48
3.2.1.	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO CON DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD).	48
3.2.2.	CARACTERÍSTICAS DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (Según Norma ASTM D4694-96).	50
3.3.	RETROCALCULO.	52
3.3.1.	DETERMINACION DEL NUMERO ESTRUCTURAL (SN) CON LA VIGA BENKELMAN.	52
3.3.2.	DETERMINACION DEL NUMERO ESTRUCTURAL (S _{Nef}) CON EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD).	52
3.3.3.	DETERMINACION DEL MODULO RESILIENTE (MR).	54
	CAPITULO IV.	55
	ANALISIS DE RESULTADOS.	55
4.1.	IDENTIFICACION Y LOCALIZACION DE RUTA A EVALUAR.	56
4.2.	MEDICION DE DEFLEXIONES CON LA VIGA BENKELMAN.	57
4.3.	MEDICION DE DEFLEXIONES CON DEFLECTOMETRO DE IMPACTO (FWD).	69
4.4.	CORRELACIÓN DE DATOS.	70
4.5.	ESTUDIO DE HOMOGENEIDAD Y ZONAS DEBILES.	80
4.6.	CAPACIDAD ESTRUCTURAL.	88
4.7.	CONCLUSIONES.	90
4.8.	RECOMENDACIONES.	91
4.9.	BIBLIOGRAFIA.	94
4.10.	ANEXOS.	95

CAPITULO I
ANTEPROYECTO

1.1. ANTECEDENTES.

La evaluación estructural de los pavimentos, aumenta a medida que se completa el período de diseño, su construcción, y la necesidad de preservarlo y rehabilitarlo.

En un principio la determinación de las características de los materiales que conforman la estructura de pavimento fue realizado mediante la perforación de pozos a cielo abierto denominados calicatas de los cuales se extraían muestras que serían analizadas en los laboratorios. Cuando se vio que este tipo de evaluación era lenta, cara y destructiva se empezaron a desarrollar los modelos no destructivos lo que se conoce como modelos teóricos tales como los desarrollados por Burmister, Boussinesq (1885) y Hogg (1944), el ultimo de estos desarrolló lo que se conoce como Modelo de Hogg que representa al pavimento como una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, sustentada por una capa elástica homogénea e isotrópica, de espesor infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa¹; dicha metodología se fundamenta en la forma y dimensión de la curva de deflexiones.

Ante la alternativa de evaluar la capacidad estructural de los pavimentos por medio del estudio de las deflexiones en el pavimento y tomando en cuenta las metodologías no destructivas tal como el Modelo de Hogg, que se desarrolló en los años 50. Los primeros equipos de deflectometría; la Viga Benkelman fue el resultado de estos primeros estudios y el primer equipo adoptado de forma extensa para la obtención de deflexiones. Los bajos rendimientos del equipo y las innovaciones tecnológicas abrieron dos vías de desarrollo dentro de los equipos de deflectometría, por un lado se inició el desarrollo de equipos basados en el mismo principio de la Viga Benkelman, pero que permitiera una

¹ Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexión.
Mario S. Hoffman – Pablo M. del Águila

operación continua y mecanizada con mejores rendimientos, y por otro se comenzó a trabajar con los equipos tipo impacto, que aplican un impulso de carga de corta duración para simular el paso de una rueda móvil a alta velocidad.

El desarrollo de los equipos tipo impacto, (deflectómetros de impacto, en inglés Falling Weight Deflectometer FWD) comenzó a mediados de la década de los 60 en Dinamarca y Holanda. En la década de los 80 la utilización del deflectómetro de impacto se generalizó en un buen número de países.

En El Salvador, las evaluaciones estructurales han sido desarrolladas hasta el día de ahora por el Ministerio de Obras Públicas y la empresa privada; en vista que la mayoría de empresas privadas dedicadas a la construcción de carreteras, no cuenta con equipos de auscultación estructural de pavimentos, las mayoría de evaluaciones estructurales son realizadas mediante métodos empíricos de diseño, basados en la resistencia de los suelos y materiales que conforman al pavimento (Valor Soporte California CBR), métodos que aun no están desfasados encierran consigo un nivel de aproximaciones mayores a los métodos mecánico – empírico.

Debido a lo anterior, a datos mas confiables y de mejor calidad el Ministerio de Obras Públicas por medio de la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial (UIDV) adquirió en el año 2003 un Deflectómetro de impacto, FWD 8000, utilizado generalmente para recolectar datos que permiten determinar la capacidad estructural del pavimento.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En El Salvador la evaluación estructural de pavimentos realizada mediante ensayos no destructivos “NDT”(en inglés: non destructive test), ha sido a través de diferentes equipos de deflectometría, entre los cuales se tiene la viga Benkelman el cual pertenece a la rama de los equipos de deflexión estática. Más reciente se tienen los equipos de tipo impacto, como el Deflectómetro (FWD), de impacto que aplican una carga que simula el tráfico real sobre el pavimento.

En nuestro país el Ministerio de Obras Públicas cuenta con un equipo de tipo impacto FWD 8000 para realizar sus evaluaciones estructurales. En vista que el costo para adquirir el FWD es alto en comparación al costo de la Viga Benkelman o al acceso a esté equipo, se considera necesario evaluar, verificar o comparar los resultados de ambos equipos, a partir de lo cual pueda obtener alguna correlación, por medio de la Metodología AASHTO 93 y que ayude sustancialmente a la interpretación y manipulación de los datos recolectados.

1.3. ALCANCES GLOBALES.

Evaluar el resultado de la auscultación estructural de los pavimentos flexibles y rígidos, por medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (FWD), para establecer una comparación y establecer una correlación de los resultados en un tramo específico de carretera.

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. OBJETIVO GENERAL:

Determinar una correlación entre los datos obtenidos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (FWD), a partir de la medición de deflexiones.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Comparar resultados de evaluación estructural utilizando el equipo de la viga Benkelman y el deflectómetro de impacto (FWD).
- Comparar la determinación de la capacidad estructural de pavimentos flexibles, por medio de la aplicación de cargas estáticas y cargas de impacto siguiendo la metodología de la guía de diseño de estructuras de pavimento AASHTO 93.

1.5. JUSTIFICACIÓN.

Actualmente el avance tecnológico de los equipos de auscultación estructural de pavimentos permite obtener información amplia y valiosa del comportamiento de los mismos, podrían hacer pensar en eliminar el uso de equipos predecesores.

Sin embargo los costos de esta nueva tecnología, para nuestros países, impiden su aplicación masiva, por lo que se hace necesario realizar estudios de comparación de resultados entre el deflectómetro de impacto y la viga Benkelman, partiendo de un punto común, que son las condiciones de trabajo (clima, estructura de pavimento, etc) y las metodologías.

Este estudio permitirá comprender, interpretar y comparar con mejor juicio los resultados obtenidos con ambos equipos y su uso para la evaluación estructural de pavimentos y preparar a los constructores, supervisores, diseñadores e investigadores.

CAPITULO II
MARCO TEORICO

2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.

La evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad resistente del sistema en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil o cuando el pavimento va a cambiar su función de demanda de tráfico.²

En general la evaluación estructural está comprendida por la auscultación estructural y el retrocálculo, entendiéndose por auscultación estructural las técnicas de recolección de información del pavimento (deflexiones) y la segunda la aplicación de la metodología a utilizar para definir los resultados finales de la evaluación estructural.

La auscultación estructural de los pavimentos ha ido variando con el tiempo en función de los avances tecnológicos, requiriendo cada vez un mejor rendimiento de trabajo, una recolección sistemática de los parámetros del pavimento y menor daño físico y operacional al pavimento en estudio. Dentro de las mediciones realizadas en la auscultación estructural habrá que considerar los siguientes aspectos ya que pueden inducir errores al interpretar los resultados:

Temperatura. Será necesario realizar ajustes en las deflexiones en base a la temperatura bajo las que se realizaron los ensayos y se observará cual es el comportamiento térmico del pavimento.

Humedad. Esta afecta a las bases, subbases y subrasantes, ya que algunos de los materiales componentes de las mismas tienen una gran susceptibilidad a dicha humedad.

² Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (Ensayos No Destructivos), Mario S. Hoffman, Ph.D., Pablo M. Del Águila, B.Sc. Octubre, 1985

Tiempo de carga. Esta condición tiene una gran influencia en los valores obtenidos de deflexión, por ejemplo:

- Materiales ligados con cemento asfáltico: Están fuertemente influenciados por el tiempo de carga debido a la naturaleza visco elástica del asfalto. Este efecto se reduce a bajas temperaturas.
- Materiales ligados con cemento hidráulico: El modulo dinámico para materiales cementados puede ser de aproximadamente el doble del modulo estático, si el tiempo de aplicación de carga es muy alta, este efecto se reduce a medida que el modulo aumenta.
- Suelos finos: Manifiestan mayor rigidez en respuestas a cargas dinámicas.

Con el análisis estructural se encuentran los estudios de vida remanente, capacidad estructural y rehabilitaciones. Para realizar todos estos estudios se utilizan diversos métodos, los cuales han sido orientados para predecir y solucionar fallas estructurales que ocurren en los pavimentos.

Los métodos se dividen en empírico y mecanicista empírico. Es importante que se escoja el método de evaluación estructural en base al método de diseño utilizado para entrelazar el estudio.

Muchos son los procedimientos empíricos que se basan en las condiciones tales como: tráfico, materiales, configuración de las capas y condiciones ambientales.

Actualmente la combinación de los métodos empíricos y mecanicistas han creado una nueva línea denominada métodos mecanicistas empíricos, en los que la parte mecanicista está dada por la respuesta estructural del pavimento en forma de tensiones, deformaciones y deflexiones, determinados a través del uso de modelos matemáticos y la parte empírica utilizada para relacionar estas respuestas con el comportamiento del pavimento in situ.

Al final, la evaluación estructural puede proveer resultados partiendo de las dos etapas importantes que lo componen como lo son la auscultación estructural y el retrocálculo (Fig. 2.1).

Para la evaluación estructural son tan importantes las condiciones actuales del pavimento como las condiciones bajo las que se concibió el mismo, entre las que se pueden mencionar: las solicitaciones principales del pavimento, modelos de comportamiento del pavimento, métodos de evaluación estructural, etc.

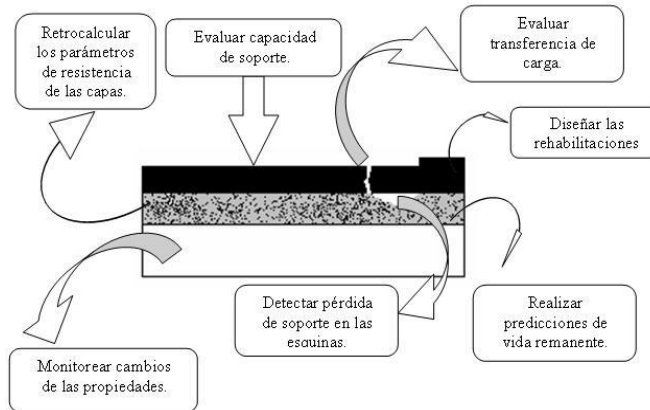


Fig. 2.1. Resultados de una evaluación estructural

2.1. SOLICITACIONES PRINCIPALES DE UN PAVIMENTO.

Las solicitaciones principales de un pavimento son el producto del tránsito y el clima. El tránsito visto como las cargas a las que está expuesto el pavimento y el clima como el agente natural del medio ambiente.

2.1.1. TRÁNSITO.

Se puede apreciar que el volumen de vehículos ha crecido en los últimos años, pero ese aumento ha sido aún mayor si se ve en términos de la carga que se transporta³, esta situación tiene una influencia significativa en el comportamiento de los pavimentos, a la hora de determinar o predecir el daño que sufrirá un pavimento en el tiempo.

El tránsito está compuesto por diferentes vehículos, de diferentes pesos y número de ejes (ver figura 2.2). Evaluar esta diversidad es un trabajo complejo, por tal razón, actualmente algunas metodologías definen la conversión del tránsito existente, proyectado o inducido en un número de ejes equivalentes identificado

³ Manual de la SIECA, Año 2002, Capítulo 1, Antecedentes

como ESAL's, el cual consiste en el número de repeticiones de carga equivalentes a 8.2 ton o 18 kips, durante la vida útil del pavimento.













LONGITUD Y PESO MAXIMO PERMISIBLE POR TIPO DE VEHICULOS									
TIPO DE VEH.	ESQUEMA DEL VEHICULO	1er EJE	2do EJE	3er EJE	4er EJE	5er EJE	6er EJE	PESO/MAXIMO EN TON. METR.	LONGITUD MAXIMA METROS
C-2		5.00	10.00					15.00	12.00
C-3		5.00	16.25					21.50	12.00
			8.25	8.25					
C-4		5.00	20.00					25.00	16.75
			6.67	6.67	6.66				
T2-S1		5.00	9.00	9.00				23.00	16.75
T2-S2		5.00	9.00	16.00				30.00	17.50
				8.00	8.00				
T2-S3		5.00	9.00	20.00				34.00	17.50
				6.67	6.67	6.66			
T3-S1		5.00	16.00		9.00			30.00	20.30
			8.00	8.00					
T3-S2		5.00	16.00		16.00			37.00	20.30
			8.00	8.00	8.00	8.00			
T3-S3		5.00	16.00		20.00			41.00	20.30
			8.00	6.67	6.67	6.67	6.66		
C2-R2		5.00	10.00	4.00				24.00	18.30
		5.00	10.00	4.50				26.50	
		5.00	10.00	7.00				29.00	
S3-R2		5.00	16.50		4.00	4.50		30.50	18.30
		5.00			4.50	4.50		33.00	
		5.00	8.25	8.25	7.00	7.00		35.50	
S3-R3		5.00	16.50		4.00	13.00		38.50	18.30
		5.00	8.25	8.25	6.50	6.50	6.50	41.00	

Fig. 2.2 Clasificación de Dimensión y Carga de Vehículos⁴

⁴ Clasificación del reglamento de transporte terrestre de carga de El Salvador, decreto legislativo n° 477, 19 de Octubre de 1995

El efecto de las cargas producidas por los vehículos en los pavimentos son la principal causa del deterioro de este, a lo cual se suma el efecto del clima, reduciendo así la capacidad del pavimento. (Ver figura 2.3)

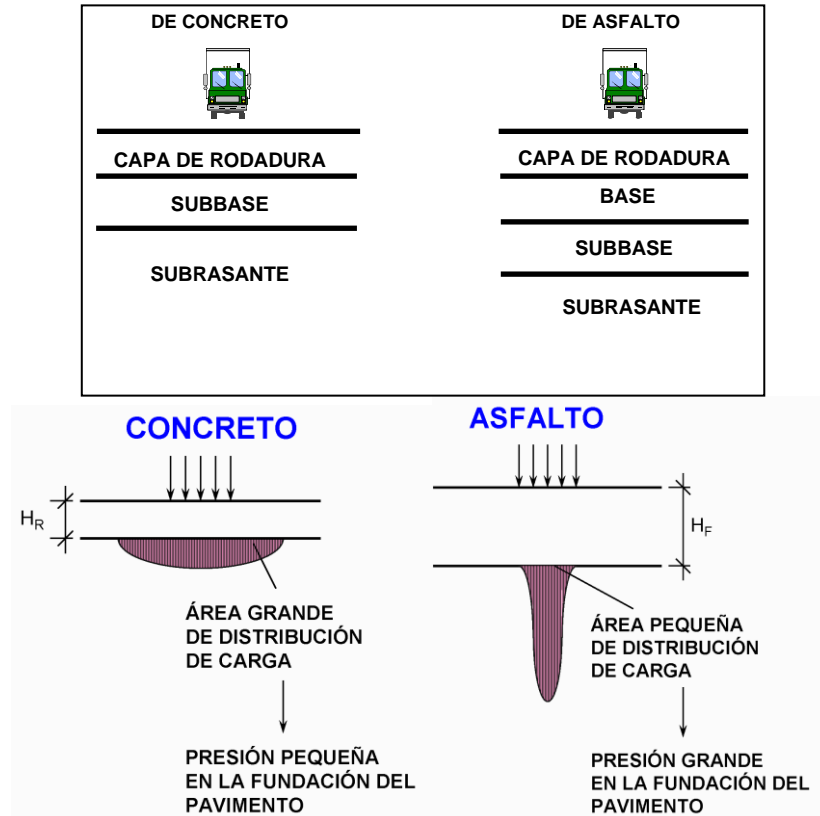


Fig. 2.3 Comparación de la distribución de cargas en pavimentos.

2.1.2. CLIMA.

Las condiciones del medio ambiente tienen efectos sobre el comportamiento de los pavimentos rígidos y flexibles. Factores externos tales como la precipitación, temperatura y la profundidad del nivel freático juegan un papel clave para definir las limitaciones que los impactos del medio ambiente pueden tener en el comportamiento del pavimento. Factores internos tales como la susceptibilidad de los materiales de pavimentos para la humedad, drenabilidad en las capas de pavimento, infiltración potencial del pavimento, etc.

En la estructura de pavimento, la humedad y la temperatura son dos de las variables que pueden significativamente afectar la capa de pavimento y las propiedades de la subrasante, y por lo tanto, su capacidad de soportar cargas.

A. Efectos de la temperatura.

Los cambios en la temperatura del medio ambiente originan variaciones en la temperatura de las estructuras de los pavimentos.

En pavimentos rígidos, como resultado del cambio de temperatura, se obtiene una desigual dilatación o contracción de las fibras paralelas a la superficie con la profundidad, lo que provoca el alabeo de la losa. Este movimiento está parcialmente impedido por el peso propio y reacciones en los dispositivos de transmisión de cargas entre losas, lo cual provoca tensiones; El alabeo altera el régimen de contacto de la losa con la sub-base, aumentando las tensiones producidas por el tránsito.

En pavimentos flexibles la temperatura producirá envejecimiento superficial de la capa de rodadura; además de ablandamiento y reducción de la viscosidad del asfalto y en presencia de bajas temperaturas se producirá pérdida de flexibilidad y grietas de contracción en el asfalto.

B. Efectos de la lluvia.

El contenido de humedad, provoca una considerable influencia sobre las propiedades de los materiales que constituyen la estructura de pavimentos y sobre su comportamiento. Si la base, subbase y subrasante no están bien protegidas de la acción del agua se ocasionan daños, algunos de ellos son:

- Pérdida de partículas de suelo, creando erosión.
- Saturación y exceso de subpresión o de fuerzas de filtración
- Pérdida de resistencia de la subrasante cuando esta se satura y permanece saturada durante un periodo largo de tiempo.
- Degradación de la calidad del material del pavimento por acción de la humedad.

2.2. MODELOS DE COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO.

Con el objeto de predecir el deterioro que puedan sufrir los pavimentos a lo largo de su vida útil, se han elaborado modelos de comportamiento. Cada modelo de comportamiento es un modelo matemático que permite predecir la posible evolución de deterioro del pavimento en la línea de tiempo, siempre y cuando se pueda definir las condiciones al momento de realizar el análisis como en la puesta de servicio del mismo.

Como la mayoría de procesos, los modelos de comportamiento en un principio fueron desarrollados de manera empírica hasta los actuales conocidos como procesos mecanicistas. La parte empírica se desarrolló basándose en las condiciones reales de los pavimentos existentes tales como: información general (tipo de pavimentos y espesores de sus capas), características de drenaje, datos de tránsito, clima y deterioro a lo largo de la vida útil.

Al determinar las variables que más influyen en el modelo, se realizará un análisis estadístico que da origen al modelo que predice el comportamiento del pavimento. Hay que tomar en cuenta que muy probablemente el modelo obtenido con estas variables, no podrá ser aplicado para otras condiciones particulares al proyecto. Por otra parte, el desarrollo de los modelos mecanicistas no sólo se basa en los datos del proyecto o datos reales, si no más bien en el comportamiento de las diversas capas y materiales que conforman el pavimento.

Técnicas para desarrollar Modelos de Comportamiento

Entre las principales técnicas para el desarrollo de los modelos se tiene:

Extrapolación lineal: se basa en dos puntos de condición del pavimento, generalmente se aplica a secciones individuales de pavimento por lo que se requiere que al menos se tenga una evaluación del pavimento, después de haber sido finalizado el proyecto, para comparar con la condición inicial y luego asumir que la tasa de deterioro será la misma.

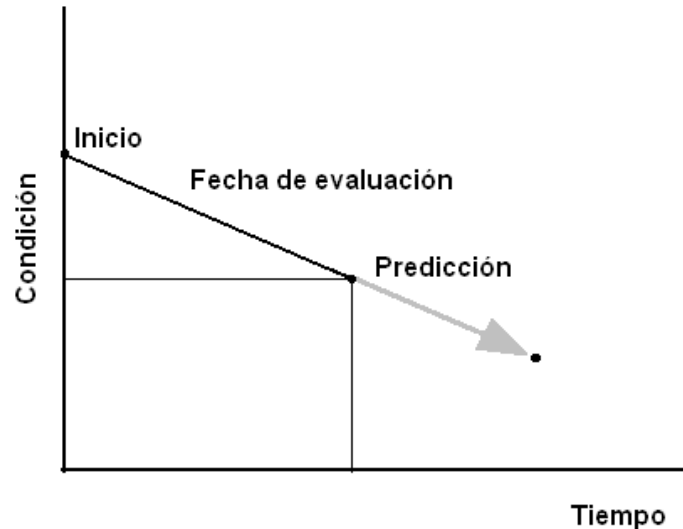


Fig. 2.4 Método de predicción por extrapolación lineal.

Esta metodología no podrá usarse en pavimentos nuevos, ni en pavimentos que han sido rehabilitados recientemente. Ya que para pavimentos nuevos no se cuenta con otra evaluación estructural para poder proyectar la línea del nivel de servicio. En el caso de las rehabilitaciones, el nivel de servicio aumenta debido al momento de colocar el refuerzo.

Regresión: Este análisis se usa para establecer una relación empírica entre dos o más variables. Cada variable es descrita en términos de su media y su variación.

Entre los diferentes tipos de regresión se tienen: regresión lineal, lineal múltiple y no lineal.

Modelo mecanicista empírico: Un modelo mecanicista empírico es aquel que a partir de los datos obtenidos de una evaluación y con ayuda de las técnicas de regresión, se puede definir la respuesta del pavimento con las condiciones reales. Las principales causas de variación de respuesta del pavimento son: cargas de tránsito, clima, o ambas. Los pavimentos en general presentan dos fases de deterioro:

Primera fase, es aquella que se produce en la puesta en marcha del proyecto inmediatamente después de la construcción y el momento en que se realiza cualquier tipo de rehabilitación.

Segunda fase, es aquella que va desde cualquier rehabilitación hasta el final de su vida útil o de cualquier otra intervención. Con cada rehabilitación se reduce o elimina el deterioro, por lo que el comportamiento del pavimento después de esta actividad es diferente de la primera fase porque el avance del deterioro es en menor grado que en la fase anterior.

A partir de este comportamiento gradual nace la necesidad de evaluar el desempeño por medio de lo que se conoce como evaluación estructural, herramienta que proporciona mediante diversos métodos de auscultación y retrocálculo, las características importantes que muestran el estado actual de los pavimentos. Estos métodos de auscultación se dividen en directos e indirectos; los primeros métodos de carácter destructivos y los otros, no destructivos.

2.3. MÉTODOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL.

Ante un problema de evaluación estructural, tradicionalmente se recurre a la perforación de calicatas, a la toma de muestras para ensayo en el laboratorio, y al análisis de cada uno de sus componentes (materiales) por separado, para incorporarlos luego al sistema denominado pavimento y deducir acerca de las características estructurales del mismo. Esta metodología es lenta y es "destruktiva".

En la actualidad se está aplicando nueva tecnología no destructiva "NDT" (non destructive test) basándose en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento. Su medición es simple, rápida, económica y lo más importante no altera el equilibrio de la estructura porque es una metodología "no destructiva". Esta metodología se fundamenta en la información valiosa que nos presta la curva o cuenco de deflexiones, para interpretar esta información de forma cuantitativa, se compara el sistema pavimento-subrasante con un modelo matemático.

Por lo tanto se puede mencionar que la metodología NDT, basada en la interpretación de deflexiones es un proceso de diseño inverso (retrocálculo) ya que se utiliza la respuesta del sistema (pavimento-subrasante) para establecer sus características estructurales.

El cálculo o análisis inverso puede considerar la aplicación de los equipos como el Deflectómetro de impacto que registran todo el cuenco de deflexión, por lo cual se puede determinar el módulo resiliente (M_r) de la subrasante y el módulo efectivo (E_p) de la capa del pavimento (rodadura + base y subbase) para establecer espesores de refuerzo a través del cálculo del número estructural (SN).

Es importante aclarar que al utilizar la metodología NDT, para la evaluación estructural de pavimentos a través de deflexiones no implica dejar de realizar ensayos destructivos como las calicatas, ya que cuando se está en presencia de evaluaciones estructurales de carreteras que no cuentan con antecedentes históricos de construcción y diseño, se procede a realizar calicatas para verificar

sus dimensiones, tipos de materiales y homogeneidad de las capas que conforman el pavimento.

2.3.1. MÉTODOS DIRECTOS DE AUSCULTACIÓN.

Los métodos directos de auscultación son métodos destructivos, que deterioran la estructura del pavimento.

El uso de los métodos directos, presentan las siguientes desventajas como la obtención de datos requiere mayor cantidad de tiempo, Costos más elevados, Mayores molestias en el tráfico, etc.

Entre los métodos directos de auscultación estructural utilizados en El Salvador se pueden mencionar:

- Calicatas o pozos a cielo abierto.
- Extracción de núcleos.

Calicatas o pozos a cielo abierto.

Las calicatas permiten la inspección directa del suelo que se desea estudiar, por lo tanto es un método de exploración confiable pero sacrifica la estructura del pavimento y tiene muy bajo rendimiento.

- El área que utilizan es más o menos un metro cuadrado y la profundidad varía según las exigencias de la investigación. Estas suelen realizarse, generalmente, centradas en la línea de borde de la carretera, frente a juntas o grietas (ver fig. 2.5)



Fig. 2.5. Elaboración de una calicata

Extracción de núcleos

Con la extracción de núcleos, se obtienen volúmenes muy pequeños de material físico del pavimento, en comparación con el volumen obtenido con las calicatas; son cilindros con diámetros entre los 10 a 15 cms, en los se puede verificar el espesor de las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento y los elementos que los componen a cada uno de ellos (ver fig. 2.6). Muchas veces es difícil la extracción de núcleos en base y subrasante cuando son materiales granulares ya que existe desprendimiento de material.

La extracción de núcleos suele tener un buen rendimiento, partiendo del estado en que se encuentre el equipo, la experiencia del operario y la toma de ensayos sea relativamente cerca. Por lo general los testigos son tomados en el borde exterior del carril en sentido del tráfico y en los hombros de la vía. Además se extraen núcleos sobre grietas para ver su alcance y si se trasmite a las capas inferiores.

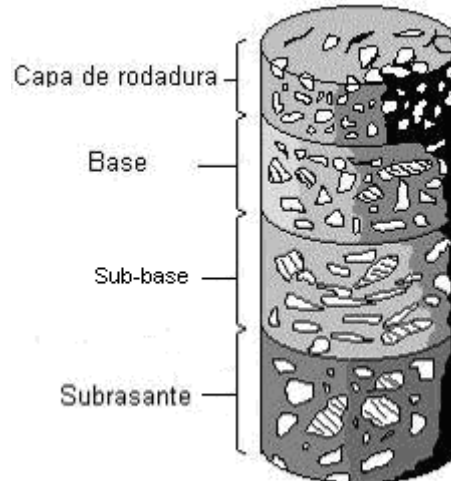


Fig. 2.6. Muestra típica de extracción de núcleo de pavimento.

2.3.2. MÉTODOS INDIRECTOS DE AUSCULTACIÓN ESTRUCTURAL

Se le puede llamar métodos indirectos de evaluación estructural, a aquellos métodos con los cuales se logra determinar la capacidad estructural del pavimento, sin tener que dañar la estructura, dichos métodos se basan en hipótesis y modelos matemáticos.

Estos métodos se realizan por medio de metodologías conocidas tales como no destructiva “NDT” (non destructive test), que se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de los pavimentos. Dicha metodología se fundamenta en que la forma y dimensión de la curva de deflexiones encierra una valiosa información a cerca de las características estructurales del pavimento y su subrasante, por lo que se puede mencionar que la metodología de evaluación estructural por medio de NDT, es un proceso de diseño inverso (retrocálculo) ya que se utiliza la respuesta del sistema (pavimento-subrasante) para establecer sus características estructurales.

Al definir el término deflexión, lo más acertado sería considerarlo como la medida de la deformación elástica que experimenta un pavimento, al paso de una carga en función del tipo y del estado del pavimento. El cuenco de deflexiones se define como el conjunto de deflexiones que se producen entre el punto de aplicación de la carga en un pavimento y sus alrededores (ver fig. 2.7).

Los equipos de deflectometría pueden registrar deflexiones en diferentes puntos lo que ayuda a definir completamente la caracterización de las deformaciones conocido como cuenco de deflexiones.

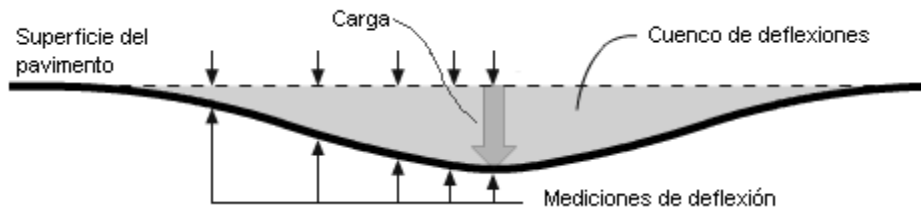


Fig. 2.7. Esquema ideal del comportamiento del cuenco de deflexiones

La caracterización del cuenco de deflexiones está basada en tres parámetros básicos, que si bien no otorgan un estado representativo de la estructura del pavimento, sirven para generar una visión y condición de homogeneidad del proyecto, entre ellos tienen:

- Deflexión máxima normalizada: corresponde a la deflexión medida por el sensor ubicado bajo el plato de carga y se normaliza por medio de la siguiente formula:

$$d_o \text{ normalizada} = d_o (\text{carga aplicada} / \text{carga normalizada})$$

Con esta normalización se pueden evaluar tramos sin que tenga influencia la variación de cargas entre ensayos e igualmente normalizar para temperatura.

- AREA: provee una estimación de la rigidez relativa de la sección del pavimento, particularmente de las capas ligadas, debido a que es muy insensible a la rigidez de la subrasante.
- Índice de curvatura de la superficie: refleja la rigidez relativa de las capas superiores de un pavimento.

De forma general, hay tres tipos de equipo para determinar las deflexiones del pavimento según metodologías no destructivas los cuales son:

- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas estáticas.
- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas vibratorias.

- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas de impacto.

Para cualquiera de ellos el principio es el mismo y consiste en aplicar una carga de magnitud conocida a la superficie del pavimento y medir las deflexiones.

Medición de deflexión estática o de movimiento lento.

Corresponde a la primera generación, básicamente originada con el desarrollo de la viga Benkelman. Estos equipos tipo viga, proveen la medida de deflexión en un punto, bajo una carga estática o de movimiento lento.

Los equipos más utilizados son:

Viga Benkelman: Desarrollada en el Road Test de la AASHO en 1952. Consiste en un dispositivo sencillo que opera por medio de una palanca suspendida de un bastidor que trasmite la deflexión vertical del punto de medida a un comparador (ver fig. 2.8 y 2.9). Este equipo debe ser usado con un camión cargado, normalmente con 80 KN en un eje, con llantas duales infladas a una presión de 0.48 a 0.55 Mpa (70 a 80 Psi). Las mediciones se realizan colocando la punta de la viga entre las dos ruedas y midiendo la deflexión cuando el vehículo se retira. Los resultados de las deflexiones se leen en un dial indicador.

Generalmente, la punta de la viga se coloca a 1.20m adelante del par de ruedas, se toma una lectura inicial y al retirar el camión, se toma la lectura máxima y una final del parámetro. Este equipo de bajo costo de utilización posee dos desventajas principales: la primera el bajo rendimiento de muestreo y segundo la falta de proveer un cuenco de deflexiones.



Fig. 2.8. Viga Benkelman

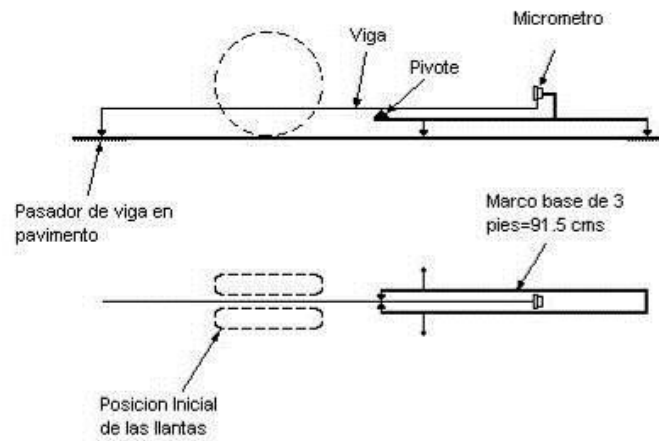


Fig. 2.9. Perfil y planta de Viga Benkelman

La metodología interpretativa de la viga Benkelman consiste básicamente en comparar las curvas de deflexiones medidas con las curvas de deflexiones teóricas, obtenidas "cargando" el modelo de Hogg con la misma configuración y magnitud de carga utilizada en los ensayos de campo. La concordancia entre una curva experimental con algunas de las teóricas, corresponde generalmente a una única combinación de parámetros elásticos del modelo, que de esa manera pasan a caracterizar al pavimento evaluado. La metodología se complementa con otros conceptos de la teoría de capas elásticas y con observaciones experimentales para determinar ciertas propiedades de ingeniería de los materiales que pueden usarse para establecer las necesidades de refuerzo.

También dentro de la metodología de la viga Benkelman existen valores característicos de deflexiones en pavimentos, como las deflexiones medidas en los ensayos (D_0) y la rigidez relativa (L_0) entre un pavimento y su subrasante, los cuales se pueden utilizar para establecer relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema pavimento-subrasante (ver Fig. 2.10).

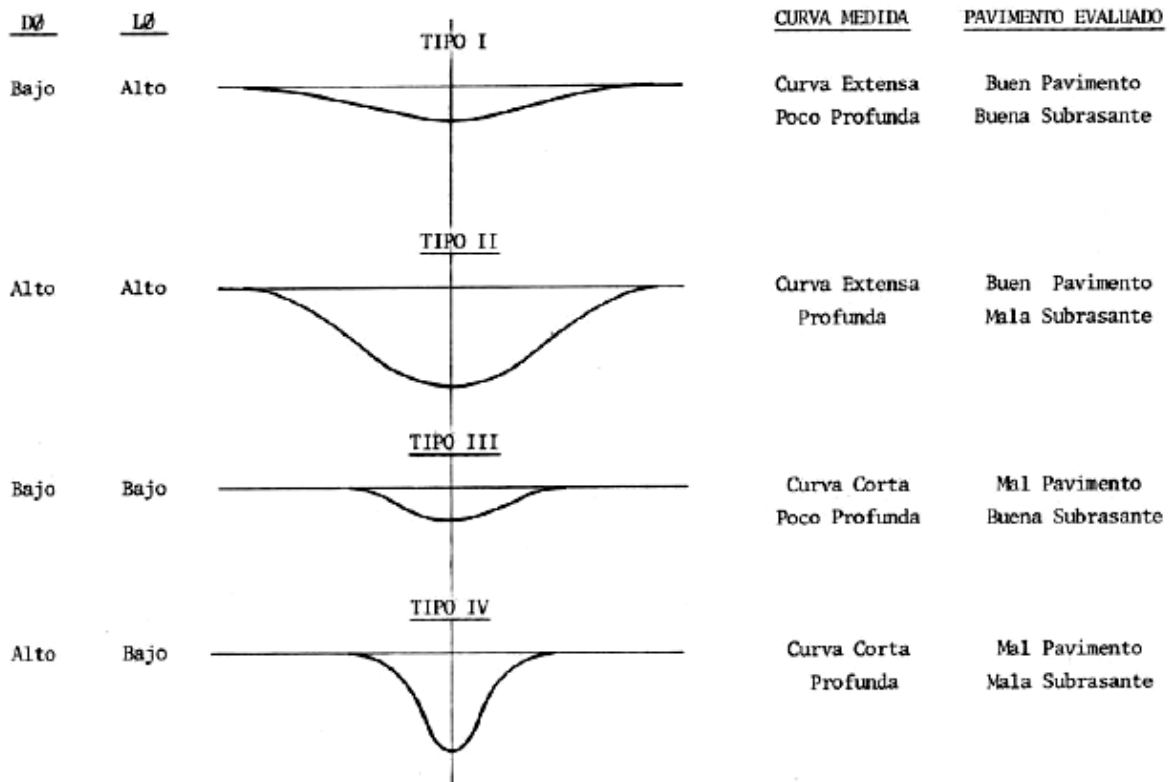
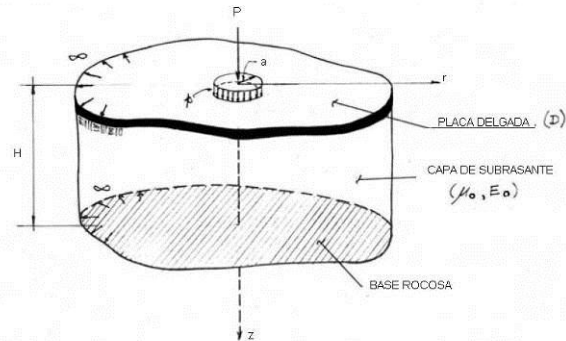


Fig. 2.10. Valores característicos de deflexiones en pavimento.

La base matemática de la viga Benkelman, lo constituye el Modelo de Hogg, en donde en el año 1944, A.H.A. Hogg presentó la solución matemática del modelo que se conoce por su nombre. Este modelo representa al pavimento como una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, sustentada por una capa elástica homogénea e isotrópica, de espesor que puede ser infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa. La figura 2.11 describe la geometría y los parámetros del modelo de Hogg.



PARAMETROS BASICOS DEL MODELO	$D = \frac{E_1 t^3}{12(1 - \mu_1^2)}$ (t-m)	Rigidez a la flexión de la placa
	$l_0 = \left(\frac{D(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2(1 - \mu_0) E_0 \delta} \right)^{1/3}$ (cm)	Longitud característica
	E_0 (Kg/cm ²)	Módulo de elasticidad de la Subrasante
	μ_0 (Adimensional)	Módulo de Poisson de la Subrasante
	H (cm)	Profundidad del estrato rocoso.
Parámetros de Evaluación	l_0, E_0, D	Se obtienen conociendo dos valores de deflexiones medidas.

Fig. 2.11. Esquema y parámetros del modelo de Hogg.

- Deflectómetro Lacroix: el deflectómetro transitivo tipo Lacroix, mide las deflexiones ó deformaciones verticales de la superficie de un pavimento bajo la acción de una carga estática. El Deflectómetro está montado sobre un camión de chasis largo, el cual tiene una carga en el eje trasero de 8,5 toneladas y que se aplica al pavimento mediante dos pares de ruedas duales (ver fig. 2.12). Mide a través de dos brazos palpadores en zonas próximas a las huellas de rodado de los vehículos. El vehículo avanza a una velocidad de 2.5 Km/h, y las mediciones las realiza cada 6 metros.

Para medir posee un sistema de trineo que se apoya en el suelo mediante tres puntos que constituyen un plano de referencia fijo para la determinación del cero, el camión recorre una distancia para las mediciones y cuando las ruedas

duales llegan a los palpadores se registra la deflexión máxima; avanza el trineo al doble de la velocidad del camión y se pone en posición para iniciar nuevamente el ciclo. Permite auscultar entre 10 y 20 km de camino por día. El rango de las mediciones está comprendido entre 0 y 300 centésima de milímetro. El resultado obtenido es la deflexión máxima.

Mediante la deflexión es posible evaluar la pérdida de la capacidad resistente de la estructura del pavimento, por comparación con las de diseño, y así se cuenta con información para intervenciones oportunas si fueran necesarios.



Fig. 2.12. Deflectógrafo tipo Lacroix, Equipo semicontinuo

Medición de deflexión por Vibración.

Las deflexiones son generadas por elementos vibratorios que imponen una fuerza sinusoidal dinámica sobre el pavimento. La deflexión se mide a través de acelerómetros o sensores de velocidad (geófonos). Estos sensores se colocan normalmente debajo de la carga y a distancias regulares del centro.

La ventaja de estos equipos sobre los estáticos es que no se requiere un punto de referencia. La desventaja principal es que las cargas reales que transitan por los pavimentos no tienen el mismo comportamiento que las que aplican ellos. Entre los equipos más característicos se encuentran:

–Dynalect (Electro-Mecánico). Produce la vibración a través de unos pesos rotatorios con los cuales aplican un rango de fuerzas entre pick-up de 1000 lb. Para medir las deflexiones cuentan con cinco traductores de velocidad ubicados a 0, 12, 24, 36 y 48 pulgadas, respectivamente (ver fig. 2.13 y 2.14).



Fig. 2.13. Dynaflect

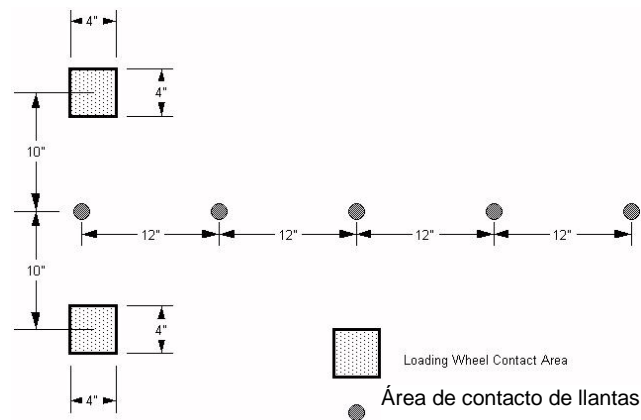


Fig. 2.14. Esquematación de localización de cargas y transductores

– Road Rater (electro-hidráulico). Genera las vibraciones a través de un sistema hidráulico que mueve unas masas; con él produce un rango de frecuencias entre 5 y 60 Hz (ver fig. 2.15). Para medir las deflexiones utiliza transductores de velocidad.



Fig. 2.15. Equipo Road Rater (Electro – hidráulico)

Medición de deflexión por Impacto.

Se refiere a los equipos tipo impacto como el Deflectómetro de impacto (FWD) (ver fig. 2.16) que aplican un impulso de carga de corta duración para simular el paso de una rueda móvil a alta velocidad, a través de una masa suspendida que se eleva y luego se deja caer sobre una placa que se ha situado en la superficie del pavimento. Variando el peso y la altura de caída se pueden generar diferentes magnitudes de cargas de impacto y duración, semejantes a las de una carga real del tránsito.

La secuencia de operación consiste en situar el equipo en el punto fijado, se baja la placa y los sensores hasta que se apoyen en la superficie y se aplica la carga o la serie de cargas previstas. A continuación se recoge el conjunto y se traslada al siguiente punto de medición. Mediante sensores se mide la deflexión en el centro de la placa y a diferentes distancias, formado así lo que se conoce como cuenco de deflexión.

Las deflexiones producidas son medidas por medio de un grupo de geófonos en unidad de micrones (milésimas de milímetros), distribuidos linealmente a una distancia de 30 cms entre ellos, teniendo en cuenta que donde se aplica la carga tendrá un geófono. El rendimiento del equipo es sencillo y según el fabricante podríamos tener un rendimiento de hasta sesenta muestreos por hora, claramente variable de acuerdo a las circunstancias sobre las que se este muestreando y a la habilidad del equipo de trabajo.

La deflexión medida en el punto de aplicación de la carga da el resultado de la capacidad estructural del pavimento en conjunto, mientras que la deflexión registrada por los sensores mas alejados son debidas a la deformación de las capas más inferiores (base, subbase y subrasante).

Para el uso de los datos proporcionados por el Deflectómetro de impacto (FWD), existen dos metodologías de análisis, una la utilización directa de la deflexión y la otra la determinación de las características estructurales del pavimento auscultado mediante calculo inverso (retrocálculo).

En cuanto a la primera se refiere, se pueden realizar comparaciones

relativas entre zonas de un tramo o entre tramos y también determinar la capacidad resistente del pavimento. Con respecto a la segunda, el análisis inverso (retrocálculo) puede considerarse la aplicación fundamental de los equipos tales como el Deflectómetro de impacto (FWD), que registra todo el cuenco de deflexión, en donde se utiliza la respuesta del sistema (pavimento-subrasante) para establecer sus características estructurales.

Existen otras aplicaciones específicas con el Deflectómetro de Impacto (FWD), en las que se pueden citar las siguientes: Permite determinar la eficiencia de la transferencia de carga en placas de concreto hidráulico, detectar la presencia de huecos bajo las losas y la evaluación de la subrasante o de las capas granulares durante la ejecución o construcción del pavimento.

La principal ventaja del Deflectómetro de impacto frente a los demás es que permite registrar la forma de todo el cuenco de deflexión, y no sólo la deflexión máxima central y que la carga que solicita el pavimento representa mejor la sollicitación ejercida por el paso de un eje pesado a altas velocidades.

Otra ventaja es poder estudiar el efecto en todas las capas (por retrocálculo) gracias a la medición de hasta 9 puntos de información distanciados desde los 20 cms hasta los 1.80 m medidos desde el punto de aplicación de la carga y la segunda es la aplicación dinámica de la carga (de 20/30 milisegundos) que simula el paso de una llanta a una velocidad promedio de 60 a 70 Km/h.

Tener la forma del cuenco de deformaciones puede ayudar a interpretar si el daño se debe a la estructura del pavimento o a la subrasante sobre la cual se apoya la estructura del pavimento. Esto es posible gracias a un parámetro denominado Área y que es una medida relativa de las mediciones de deflexión máxima con las medidas de deflexión de los otros geófonos.



Fig. 2.16. Deflectómetro de Impacto Dynatest FWD 8000

Área del cuenco de deflexiones.⁵

Por lo general el FWD trabaja con 7 Geófonos que pueden tener la siguiente distribución (ver fig. 2.17 y 2.18):



Fig. 2.17. Vista inferior del plato de carga y geófonos (FWD 8000)

⁵ Evaluación estructural de firmes de carreteras, AEPO Ingenieros, 2001

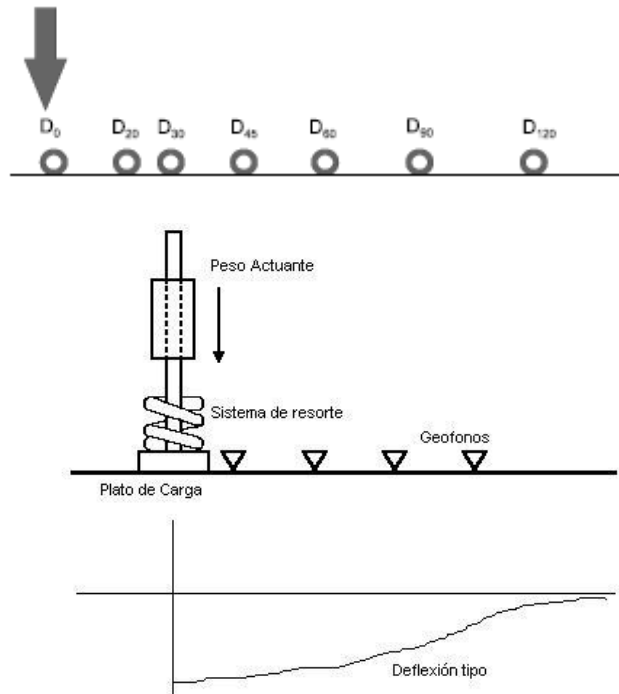


Fig. 2.18. Esquema general del deflectómetro de impacto (FWD 8000)

El concepto del AREA, definido mediante el cuenco de deflexiones, es una medida para interpretar la capacidad estructural de un pavimento. Este parámetro establecido por el Ing. Hoffman en 1981, ha sido incorporado a la metodología AASHTO.

El valor de este parámetro está definido por la siguiente ecuación:

$$Area = \frac{150(D_0 + 2D_{30} + 2D_{60} + D_{90})}{D_0}$$

Donde:

D_0 =Deflexión en el centro de la carga

D_{30} =Deflexión a 30 cm. de la carga

D_{60} =Deflexión a 60 cm. de la carga

D_{90} Deflexión a 90 cm. de la carga

Este parámetro está normalizado por el valor máximo de deflexión D0 (ya sea en cm o mm).

El valor máximo del ÁREA es fácil de determinar, ya que ocurre cuando los 4 valores de deflexión son iguales, lo cual es por lo general imposible, así:

$$AREA_{MAX} = 150*(1+2+2+1) = 900 \text{ cm}$$

Según estudios se determinó un valor mínimo del ÁREA, que es cuando se trabaja con un sistema monocapa que no ha de ser tan evidente y que según los estudios define un valor de $AREA_{MIN}$ igual a 278 cm. Las unidades definidas como mm o cm según se este trabajando.

A continuación, en la tabla 2.1, se presenta un resumen general con respecto a los resultados del análisis del Área del cuenco de deflexión y las deflexiones máximas.

Tabla 2.1

ÁREA	DEFLEXIÓN MÁXIMA (D0)	CONCLUSIONES
BAJA	BAJA	Pavimento débil, Subrasante fuerte.
BAJA	ALTA	Pavimento débil, Subrasante débil.
ALTA	BAJA	Pavimento fuerte, Subrasante fuerte.
ALTA	ALTA	Pavimento fuerte, Subrasante débil.

También se estableció un rango de valores de Área (cm) de acuerdo al tipo de pavimento seleccionado, a continuación se muestra en la siguiente tabla 2.2:

Tabla 2.2

TIPO DE FIRME	VALOR DEL ÁREA
FLEXIBLE	≤ 600
SEMIRRÍGIDO	600 - 710
RÍGIDO	> 710

Otra de las aplicaciones importantes que se le puede dar al FWD es calcular el Modulo Resiliente de la subrasante, ampliamente utilizado en el diseño

de pavimentos. El valor será encontrado por medio del retro-cálculo ya sea usando la Deflexión D_{60} o D_{120} .

Recientemente un estudio realizado por la “Universidad de Carolina del Norte” denominado “Assesing Pavement Layer Condition using Deflection Data” (Y.R King; Noviembre 2000) en pavimentos asfálticos, señala que hay aproximadamente 20 parámetros más de diseño, obtenidos a partir de las deflexiones medidas por el FWD, dentro de los cuales se destacan:

Índice base de curvatura $BCI (\mu m) = D_{60} - D_{90}$

Índice base de diseño $BDI (\mu m) = D_{30} - D_{60}$

Índice de curvatura superficial $SCI (\mu m) = D_0 - D_{30}$

Donde BCI (Base curvatura Index), se utiliza para evaluar el estado de la capa de subbase o subrasante y el BDI (Base Damage Index), para evaluar el estado de la base y finalmente el SCI (Surface Curvature Index), representa la evaluación de todo el conjunto de capas del sistema de pavimento. De manera cuando se esté en presencia de valores altos del BCI y BDI indican pobres resistencias de la subrasante. En el caso de SCI se muestra alterado debido al espesor de la mezcla bituminosa.

2.4. METODO AASHTO

El método AASHTO 1993 consiste, fundamentalmente, en determinar la capacidad necesaria para soportar el tráfico futuro, evaluando la capacidad estructural existente, para así determinar la deficiencia actual para soportar cargas futuras. Para determinar dicha deficiencia en pavimentos asfálticos se utiliza la siguiente fórmula:

$$SN_{ol} = a_{ol} D_{ol} = SN_f - SN_{ef}$$

SN_{ol} = Número estructural requerido para el refuerzo.

a_{ol} = Coeficiente estructural para el refuerzo.

D_{ol} = Espesor requerido para el refuerzo.

SN_f = Número estructural requerido para soportar el tráfico futuro.

SN_{ef} = Número estructural efectivo del pavimento existente.

El concepto que existe detrás de este método se ilustra en la figura 2.19



Fig. 2.19 Efecto de un refuerzo en la capacidad estructural

Para evaluar la capacidad estructural existente (SN_{ef}), la guía AASHTO presenta tres métodos:

- Capacidad estructural, basada en inspecciones visuales y ensayos de materiales.
- Capacidad estructural, basada en ensayos de deflexiones “NDT”.
- Capacidad estructural, basada en el daño por fatiga producto del tráfico (Vida Remanente).

Al estimar la capacidad estructural en base a mediciones de deflexión por medio de cargas de impacto, se está evaluando la respuesta estructural del pavimento en terreno ante las cargas reales de tránsito, por lo tanto este método es el más realista de los propuestos por AASHTO.

A continuación, se describen los métodos para evaluar la capacidad, basados en mediciones de deflexiones no destructivas, para pavimentos de asfalto y concreto. Sin embargo el objetivo en este documento, es determinar el número estructural efectivo (SN_{ef}).

2.4.1. PAVIMENTOS FLEXIBLES.

El Método para determinar el número estructural efectivo (SN_{ef}), mediante ensayos no destructivos, asume que la capacidad del pavimento es una función de

su espesor total y de su rigidez (Ver figura 2.20), siendo definido por la siguiente ecuación.

$$SN_{\text{eff}} = 0.0045 D \sqrt[3]{E_p}$$

SN_{eff} = Número estructural efectivo (pulgadas).

D = Espesor de todas las capas sobre la subrasante (pulgadas).

E_p = Módulo efectivo del pavimento sobre la subrasante (pulgadas). Se determina mediante el proceso de retroanálisis propuesto por la AASHTO 1993

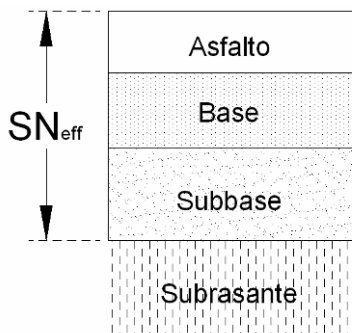


Fig. 2.20 Capas incluidas en el SN_{eff}

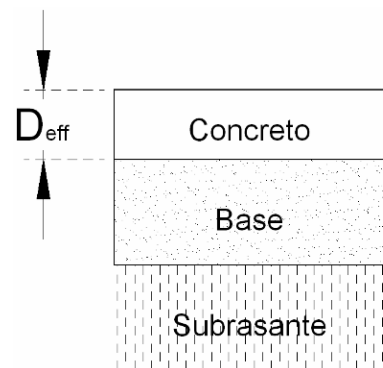


Fig. 2.21 Capas incluidas en el D_{eff}

2.4.2. PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Para determinar el espesor efectivo del pavimento de concreto hidráulico (ver figura 2.21) la guía AASHTO plantea la siguiente ecuación:

$$D_{\text{eff}} = F_{\text{je}} - F_{\text{dur}} - F_{\text{fat}} D$$

D = Espesor existente de la losa de concreto en pulgadas.

F_{je} = Factor de ajuste de grietas y juntas.

F_{dur} = Factor de ajuste por durabilidad.

F_{fat} = Factor de ajuste por daños debido a fatiga.

CAPITULO III

***AUSCULTACION ESTRUCTURAL DE
PAVIMENTOS***

3 AUSCULTACION ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

3.1. AUSCULTACIÓN UTILIZANDO EL EQUIPO DE LA VIGA BENKELMAN.

Las deflexiones producidas en la superficie de un pavimento flexible, por acción de cargas vehiculares, pueden ser determinadas haciendo uso de uno de los deflectómetros utilizados en El Salvador, tal como la "Viga Benkelman". Llamado así en honor al Ing. A.C. Benkelman, quién la desarrollo en 1953, como parte del programa de ensayos viales de la WASHO (WASHO Road Test). Desde entonces su uso se ha difundido ampliamente en proyectos de evaluación estructural de pavimentos flexibles, tanto por su practicidad como por la naturaleza directa y objetiva de los resultados que proporciona.

3.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA VIGA BENKELMAN

El deflectómetro Benkelman funciona según el principio de la palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple. Según se esquematiza en la figura 3.1, la viga consta esencialmente de dos partes: (1) Un cuerpo de sostén que se sitúa directamente sobre el terreno mediante tres apoyos (dos delanteros fijos "A" y uno trasero regulable "B") y (2) Un brazo móvil acoplado al cuerpo fijo mediante una articulación de giro o pivote "C", uno de cuyos extremos apoya sobre el terreno (punto "D") y el otro se encuentra en contacto sensible con el vástago de un micrómetro de movimiento vertical (punto "E"). Adicionalmente el equipo posee un vibrador incorporado que al ser accionado, durante la realización de los ensayos, evita que el indicador del dial se trabe y/o que cualquier interferencia exterior afecte las lecturas.

El extremo "D" o "punta de la viga" es de espesor tal que puede ser colocado entre una de las llantas dobles del eje trasero de un camión cargado. Por el peso aplicado se produce una deformación del pavimento, consecuencia de lo cual la punta baja una cierta cantidad, con respecto al nivel descargado de la superficie. Como efecto de dicha acción el brazo DE gira en torno al punto fijo "C", con respecto al cuerpo AB, determinando que el extremo "E" produzca un

movimiento vertical en el vástago del micrómetro apoyado en él, generando así una lectura en el dial indicador. Si se retiran luego las llantas cargadas, el punto "D" se recupera en lo que a deformación elástica se refiere y por el mismo mecanismo anterior se genera otra lectura en el dial del micrómetro.

La operación expuesta representa el "principio de medición" con la Viga Benkelman. Lo que se hace después son sólo cálculos en base a los datos recogidos. Así, con las dos lecturas obtenidas es posible determinar cuanto reflectó el pavimento en el lugar subyacente al punto "D" de la viga, durante el procedimiento descrito. Es de anotar que en realidad lo que se mide es la recuperación del punto "D" al remover la carga (rebote elástico) y no la deformación al colocar ésta. Para calcular la deflexión deberá considerarse la geometría de la viga, toda vez que los valores dados por el micrómetro (EE') no están en escala real sino que dependen de la relación de brazos existentes (Ver figura 3.1 a).

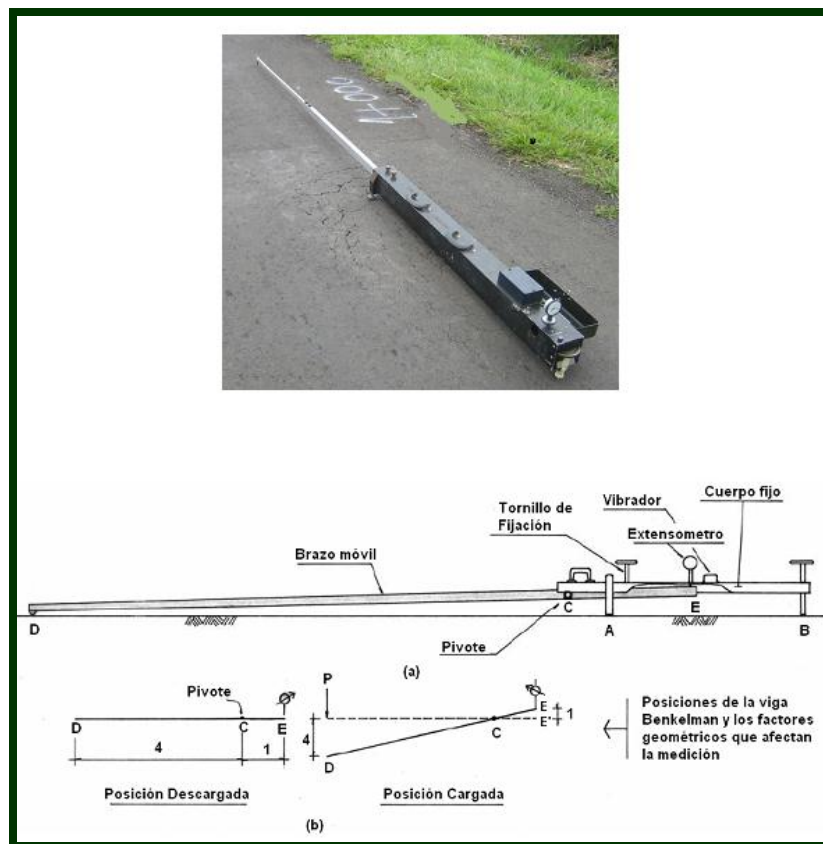


Fig. 3.1 Esquema y Principio de operación de la Viga Benkelman

3.1.2. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE LA VIGA BENKELMAN.

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada en 18,000 libras (80 kN) a través de la guía de diseño AASHTO en la normativa T256-01 Apartado 6 (Aparatos), proporcionando 9,000 libras por cada una de las llantas duales del eje trasero de un camión tipo C2, con una presión en las llantas de 0.48 a 0.55 Mpa (70 a 80 Psi). Previamente a la realización de los ensayos deberá verificarse que se cumplan estas condiciones (por medio de basculas fijas ó móviles), así como la presión de las llantas sea la requerida. Una vez localizado el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizan en el lado exterior de un carril), se coloca la llanta a usarse sobre el punto de manera tal que éste coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto (ver figura 3.2 "a").

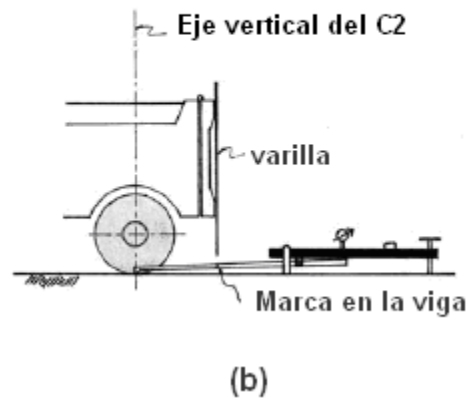
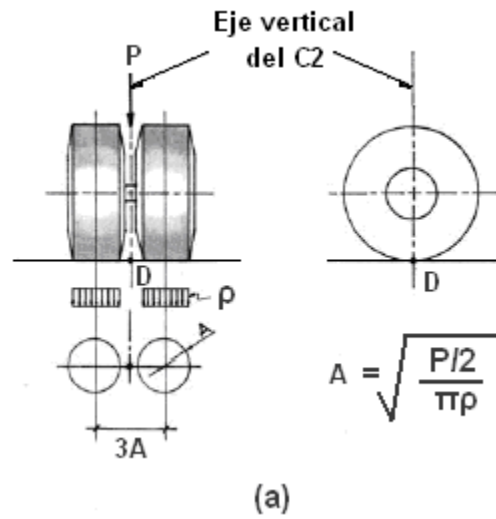


Fig. 3.2 Configuración Geométrica del Sistema de Carga en la Viga Benkelman.

Las mediciones se realizan colocando la punta de la viga entre las dos ruedas y midiendo la deflexión cuando el vehículo se aleja. Los resultados de las deflexiones se leen en un dial indicador. (Ver figura 3.3)



Fig. 3.3 Colocación de la Viga Benkelman, Posición inicial y final.

Tomando como punto de referencia una varilla vertical adosada a la parte trasera del camión (ver figura 3.2 b), se efectúa una marca en la viga de manera tal que, basta con hacerlas coincidir para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de gravedad del conjunto.

De igual forma se puede efectuar, a partir de la primera, sucesivas marcas a distancias elegidas a las cuales se desee medir deflexiones adicionales (puede ser a 30, 40 y 50 cm.). Para la metodología de análisis se requiere de por lo menos tres lecturas, pero se pueden obtener más con fines de verificación, lo cual es recomendable, o si es que se desea tener una idea gráfica del tipo de curvas de deflexiones que se producen.

Se realiza la primera marca adicional a una distancia tal que la deflexión que se obtenga en ese punto sea la mitad de la deflexión máxima (obtenida en la marca inicial). La segunda marca adicional se realiza al doble de la distancia de la primera marca adicional. Estas dos distancias se determinarán específicamente

para cada proyecto de evaluación que se emprenda. Esto deberá hacerse por medio de ensayos previos, antes de comenzar la recolección masiva de datos. Es común que se observen variaciones durante la realización de los ensayos, no deberá hacerse modificaciones, si las deflexiones tomadas en la primera marca adicional están en el rango entre 35% y 65% de la deflexión máxima.

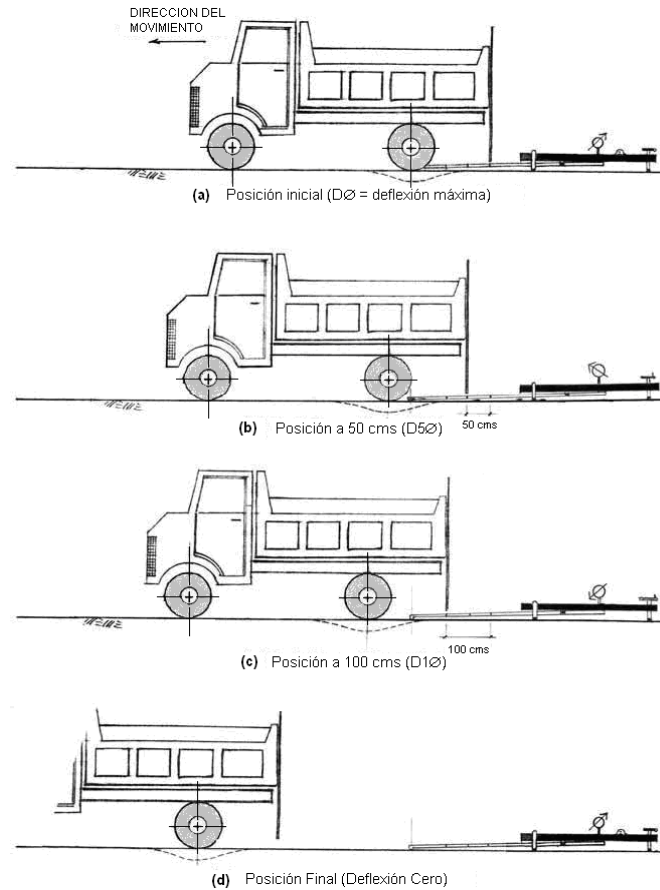


Fig. 3.4 Esquematización del Proceso de Medición con la Viga Benkelman

Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la cadena vertical y la marca inicial (ver figura 3.4), se verificará que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se coloca el dial del micrómetro en cero, se activará el vibrador y mientras el camión se desplaza muy lentamente se procederá a tomar lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con la primera y segunda marcas adicionales (figuras 3.4 b, c) y una lectura final cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo que el indicador del dial ya no tenga movimiento

(aproximadamente 8.00 m, según norma AASHTO T256-01 Apartado 8.4.2.3.), registro que corresponde al punto de referencia con deflexión cero.

Es importante tomar la temperatura del pavimento según la norma AASHTO 93 T256-01 apartado 8.1.6. de la siguiente manera: se realiza una perforación en el pavimento, se llena este agujero con un líquido como agua, glicerina u otro producto a base de aceite, y luego se introduce el termómetro hasta el fondo del agujero para obtener la temperatura, si la prueba se extiende por un período de tiempo mayor a una hora se tomará la temperatura cada hora para establecer una correlación directa entre el aire, la superficie del pavimento y la medición de la misma temperatura. Si no es posible tomar la temperatura, algunos procedimientos (Report No. FHWA-RD-98-085, "Predicciones de temperatura y factores de ajuste para pavimentos de asfalto") existen para estimar la temperatura de los pavimentos en función de la profundidad usando las temperaturas máximas y mínimas del día anterior.

No se requiere corrección por temperatura en estructuras de pavimentos compuestas por un tratamiento superficial o mezclas asfálticas delgadas (menor a 5 cms, según Guía de Diseño AASHTO 93, Capítulo 11 Fig. 11.4), colocadas sobre bases cuyo módulo de rigidez sea insensible a cambios de temperatura. Si las carpetas asfálticas son de gran espesor (mayores de 30 cms según Guía de Diseño AASHTO 93, Capítulo 11 Fig. 11.4), el efecto de la temperatura sobre la deflexión posee mayor importancia, por lo que se recomienda aplicar algún factor de corrección, cuando las temperaturas son menores o iguales a 49° C. según la Fig. 11.4 de la Guía de Diseño AASHTO 93. Hay que tomar en cuenta que la Fig. 11.4 corresponde a base granular o estabilizada con asfalto.

3.1.3. PERSONAL Y EQUIPO NECESARIO PARA REALIZAR ENSAYO CON VIGA BENKELMAN

Para la realización de esta rutina será necesario de la participación de cuatro operadores: Un técnico calificado que lea y dicte las lecturas del micrómetro, un operador que anote las mediciones, un banderillero que ayude con el tráfico vehicular, y un ayudante que coordine con el conductor del camión y a la vez de aviso al técnico que realiza las lecturas, cuando la varilla adosada al camión vaya coincidiendo con las marcas hechas en la viga. Todo el trabajo deberá ser supervisado permanentemente por un Ingeniero de campo quien verificará los valores que se obtengan así como tomar anotación de cualquier factor que a su juicio pueda explicar los resultados que se obtengan (corte, relleno, tipo de material, tipo de drenaje, nivel freático, estado del pavimento, condiciones del tiempo etc.). La figura 3.5 muestra un formato adecuado para la recopilación de los datos de campo. En la primera columna se colocan los estacionamientos de prueba, la segunda columna incluye las lecturas de deflectómetro ($R_0=0$, $R_1=$, $R_2=$ hasta R_i), donde: R_0 es la lectura inicial y sucesivamente R_1 , R_2 hasta un R_i son las lecturas a una distancia determinadas, la tercera columna corresponden a las deflexiones (D_0 , D_{R1} y D_{R2}) utilizadas para definir el cuenco de deflexiones; Calculadas así:

$$D_0 = R_1 - R_0 \quad \text{Deflexión máxima}$$

$$D_{R1} = R_2 - R_1 \quad \text{Deflexión a una distancia 1}$$

$$D_{R2} = R_i - R_2 \quad \text{Deflexión a una distancia 2}$$

Equipo

El equipo mínimo para la realización de ensayos de medición de deflexiones es el siguiente:

- Deflectómetro Viga Benkelman, tal como el modelo Soiltest HT-350 (con relación de brazos 1:2).
- Micrómetro con dial indicador de divisiones cada 0.001 plg. (Modelo Soiltest HT-300M).
- Camión cargado, con un peso total de 18,000 libras de un eje simple con llantas duales, infladas a una presión de 70 a 80 psi.

- Vehículo auxiliar para transportar al personal y equipo misceláneo.
- Balanza móvil para pesaje de camión, con capacidad de 10 toneladas; en su defecto utilizar basculas estacionarias privadas o publicas (Ej. Bascula fija del MOP ubicada sobre Carretera El Litoral a la altura del desvío Costa del Sol, basculas de ingenios o empresas privadas).
- Accesorios de medición y varios (Cinta métrica de 7 m, plumones, plomada, destornillador, alicates, hojas de campo, lápices, señales de seguridad, termómetro, cincel, martillo, varilla de metal o madera de 2m, alambre de amarre, pintura, etc.).
- Formato para recopilación de datos de campo, similar al de la Fig. 3.5.

PROYECTO: _____ HOJA DE DATOS DE CAMPO
 TIPO DE PAVIMENTO: _____
 CARGA DE EJE: _____
 PRESION DE INFLADO: _____
 FECHA: _____
 REALIZADO POR: _____
 TEMPERATURA: _____



ESTACION	LECTURAS DE DEFLECTOMETRO				DEFLEXIONES (10 ² mm.)			OBSERVACIONES
	R0=0	R1*	R2*	∞	D0	DR1	DR2	

Fig. 3.5 Formato para recopilación de datos en campo

3.2. AUSCULTACIÓN UTILIZANDO EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO.

La evaluación de la capacidad estructural en pavimentos se realiza comúnmente utilizando métodos no destructivos, los cuales consisten en aplicar una carga dinámica, bajo condiciones estáticas, por impacto, etc. cuyos resultados ayudan a determinar en cada estructura del pavimento, las deformaciones o deflexiones asociadas a la sollicitación inducida, y así poder definir su capacidad para soportar las cargas vehiculares.

A nivel mundial se cuenta con una gran cantidad de equipos para determinar deflexiones en campo, sin embargo, los de mayor uso son los deflectómetros de impacto definidos en la norma ASTM D4694-96. Estos equipos aplican una sollicitación al pavimento por impacto y determinan una cuenca de deformaciones a partir de datos de desplazamiento, obtenidos por un arreglo de sensores de desplazamiento. Dicho arreglo se establece en función del tipo de pavimento que se intenta evaluar y del fin que se persiga con la evaluación.

3.2.1. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO CON DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD)

Personal y equipo necesario para realizar ensayo con Deflectómetro de impacto

Para la realización de esta rutina será necesario de la participación de dos personas: Un ingeniero operador del Deflectómetro de impacto, un motorista del vehículo. Y el equipo para la realización de ensayos de medición de deflexiones es el Deflectómetro de Impacto modelo FWD 8000.

Antes de utilizar el Deflectómetro de impacto es necesario realizar la calibración de los diferentes transductores que forman parte del equipo de medición. La calibración propiamente dicha de los transductores, consiste en una comparación de sus mediciones contra patrones nacionales o internacionales de la misma magnitud por definir. Posteriormente, es importante verificar que la señal

que emite el equipo y su sistema de registro cumpla con las siguientes especificaciones.

Especificaciones de la señal, y del sistema de registro

Según la Norma ASTM D4694-96, las especificaciones de la señal, y del sistema de registro deben permitir una resolución tal que cumpla con requerimientos como:

El despliegado del medidor de carga y el almacenamiento deben tener una resolución de 200 N, o menos. El despliegado de las mediciones de la deflexión y el almacenamiento habrán de manejar una resolución de $\pm 1 \mu\text{m}$, o menos.

Las mediciones de la carga y la deflexión requieren registrarse como se especifica en los párrafos anteriores, dentro de un periodo de tiempo o ventana de medición como mínimo de 60 ms, para una precisión de un tiempo de carga máxima y deflexión de $\pm 2 \%$, y la precisión de las deflexiones de $\pm 2 \mu\text{m}$.

Determinación de deflexiones en sitio (Según Norma AASHTO T256-01)

- a) Registre la siguiente información para cada pavimento evaluado: nombre del operador; fecha y hora; factores de calibración; inicio y fin de la estación o localización física del tramo evaluado; localización de cortes o terraplenes; ubicación de alcantarillas, puentes y otras características de control vertical; límites y extensión de los deterioros superficiales; condiciones ambientales, y descripción del tipo de pavimento.
- b) Inicie el programa de adquisición de datos, e introduzca la información que requiera la configuración del equipo de deflexión al momento del ensaye. La configuración del equipo se almacena en un archivo de salida, y constituye un insumo para el programa de análisis. Esta información, normalmente incluye el diámetro de la placa de carga, número y posición de los transductores de deflexión y la orientación de los transductores de deflexión con respecto a la placa de carga. Seleccione el formato de archivo de datos adecuado; existen diferentes formatos.
- c) Baje la placa de carga y los transductores para asegurarse de que se encuentran en una superficie estable y firme.

- d) Levante el dispositivo generador de impacto a la altura deseada, y deje caer el peso. Registre la deflexión máxima de la superficie y la carga máxima. En caso de que ocurra una deformación permanente bajo la placa de carga, mueva el aparato, y reduzca el impacto aplicado hasta que la deformación permanente no sea significativa para el primer ensayo en campo.
- e) Ejecute como mínimo dos secuencias de carga (c), y compare los resultados. Si las diferencias son mayores del 3 % en cualquier transductor, registre la variabilidad en el reporte. Los ensayos adicionales se pueden hacer con la misma o diferente carga. Con la finalidad de determinar la no linealidad de un sistema de pavimento es factible desarrollar ensayos para diferentes niveles de carga. El analista puede utilizar cuencas promediadas si se presentan errores aleatorios de importancia.

3.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (Según Norma ASTM D4694-96)

Sistema de instrumentación

Durante su operación debe soportar temperaturas de entre -10 y 50 °C; tolerar humedad relativamente alta, lluvia o niebla; y otras condiciones adversas tales como polvo, golpes, o vibraciones que se pueden presentar normalmente en campo.

Los instrumentos no deben estar expuestos a los elementos (dentro del vehículo), y deben ser capaces de operar en un rango de temperaturas de entre 5 y 40 °C.

Dispositivo generador de impacto

El dispositivo generador de impacto debe ser del tipo de masa en caída libre con un sistema de guía. El dispositivo generador de impacto tiene que ser capaz de levantar una o varias masas predeterminadas, y soltarlas en caída libre. La onda generada por el impacto de la masa, y transmitida al pavimento, deberá reproducirse de acuerdo con los requerimientos descritos en el Capítulo 2. La

onda debe tener aproximadamente la forma sinusoidal y aplicarse con una amplitud de pico a pico de 50 KN. La duración del impulso de fuerza habrá de permanecer entre 20 y 60 ms, o un tiempo de incremento de la carga de 0 a 30 ms. Es importante que el sistema de guía presente una fricción despreciable y diseñada de tal manera que las masas caigan perpendiculares a la superficie del pavimento.

Placa de carga

La placa de carga debe ser capaz de distribuir uniformemente la carga sobre la superficie del pavimento. Los diámetros más comunes de las placas son de 300 y 450 mm de diámetro para realizar mediciones sobre autopistas y aeropistas, respectivamente. La placa será capaz de permitir mediciones de deflexión en los pavimentos, al centro de la placa.

Transductor de deflexión

Debe ser capaz de medir el desplazamiento vertical máximo, y estar montado de tal manera que minimice la rotación angular con respecto a su plano de medición en el movimiento máximo esperado. El número y espaciamiento de los sensores es opcional, y dependerá de los propósitos de la prueba y de las características de cada capa del pavimento. El espaciamiento adecuado entre sensores es de 300 mm. Los sensores pueden ser de varios tipos: transductores de desplazamiento, de velocidad, o de aceleración (acelerómetros).

Celda de carga

La celda tiene que ser colocada de tal manera que no restrinja la capacidad de obtener mediciones de deflexión, bajo el centro de la placa de carga. Además, debe ser resistente al agua y a los impactos en carretera durante el desarrollo del ensayo o transporte.

3.3. RETROCALCULO

3.3.1. DETERMINACION DEL NUMERO ESTRUCTURAL (SN) CON LA VIGA BENKELMAN

La capacidad estructural de los pavimentos flexibles utilizando la viga Benkelman, puede ser obtenida a través de formulas, como las desarrolladas para el HDM-4 (Highway Development And Management Model); que dentro de sus aplicaciones, se puede obtener el número estructural utilizando el valor de la deflexión máxima, en la siguiente formula para bases no estabilizadas:

Ecuación 3.1

$$SN_s = 3.2(DEF_s)^{-0.63} + dSNPK^6$$

Donde:

SN_s	Número estructural ajustado en la estación "s".
DEF_s	Deflexión de la viga Benkelman bajo una carga de 80 kN, con una presión de llanta de 520 kPa, y una temperatura promedio del asfalto de 30° C para la estación "s".
$dSNPK$	Ajuste de reducción del número estructural debido al agrietamiento.

3.3.2. DETERMINACION DEL NUMERO ESTRUCTURAL (SNef) CON EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD).

Una vez obtenidos los datos de la calibración, éstos se procesan por medio de una técnica analítica conocida como retrocálculo para definir el módulo elástico equivalente de capas de pavimento que corresponde a una carga aplicada, y a unas deflexiones inducidas. El análisis se puede desarrollar a partir de métodos iterativos, búsqueda en bases de datos, ecuaciones simultáneas, etc.

Este procedimiento de análisis involucra la suposición de los valores de módulo elástico para una estructura de pavimento por capas, mediante el cálculo de la deflexión en la superficie a diferentes distancias radiales del punto de

⁶ HDM-4 (Highway Development And Management Model)

aplicación de la carga. Una vez obtenidas las deflexiones calculadas, se comparan con las deflexiones medidas; así, el proceso se repite cambiando el módulo elástico de las capas en cada iteración, hasta que la diferencia entre las deflexiones medidas y las calculadas se encuentren dentro de las tolerancias especificadas, o cuando se haya alcanzado el máximo número de iteraciones. Alternativamente, el procedimiento de análisis puede involucrar investigaciones a bases de datos de cuencas de deflexión precalculadas a partir de módulos de capa y espesores conocidos, hasta que la cuenca se aproxime lo suficiente a la de deflexiones medidas.

Cuando se analiza el comportamiento de un pavimento, se calculan las deflexiones en la superficie y otras respuestas a partir de programas de análisis que utilizan el módulo elástico como insumo. En el retrocálculo se selecciona y ajusta el módulo elástico, de acuerdo con la última deflexión de superficie calculada que mejor se ajustó a las deflexiones conocidas de una superficie.

La teoría de elasticidad multicapa es uno de los métodos de análisis más comunes utilizados en el diseño de pavimentos flexibles, y en menor grado de los rígidos.

Varios de los programas de cómputo que utilizan algún tipo de procedimiento iterativo de ajuste de deflexiones o alguna técnica de búsqueda en base de datos, se han desarrollado para estimar el módulo elástico del material del pavimento; algunos de los programas de cómputo para estimar módulos elásticos de un sistema de pavimento son, entre otros, MODULUS, ELMODE, ISSEM4, MODCOMP, FPEDDI, EVERCALC, WESDEF, BOUSDEF, etc.

En la actualidad, existen dos métodos de análisis que se pueden aplicar a los pavimentos flexibles: estático y dinámico.

El estático, incluye métodos de sección transformada Boussinesq-Odemark y subrutinas de integración numérica por capas, y los métodos de elemento finito. Como principio general, la selección del procedimiento de análisis de datos provenientes de un ensayo no destructivo NDT, con el fin de definir módulos elásticos de capa, debe ser compatible con el de análisis que se utilizará para diseñar la rehabilitación del pavimento flexible; esto es, si se utiliza un programa

de cómputo para definir módulos de capa, en particular para analizar pavimentos con fines de rehabilitación del pavimento flexible.

En el caso de usar métodos NDT la guía de diseño AASHTO 93, supone que la capacidad estructural del pavimento es una función de su espesor y rigidez totales a través de la siguiente relación:

Ecuación 3.2

$$SN_{ef} = 0.0045D(E_P)^{1/3}$$

Donde:

- E_P = Modulo efectivo del pavimento (psi)
 SN_{ef} = Numero estructural efectivo
 D = Espesor total del paquete estructural (pulg)

3.3.3. DETERMINACION DEL MODULO RESILIENTE (MR)

Con el NDT se determina el M_R midiendo las deflexiones producidas por una carga estática o dinámica ante una sollicitación de tipo sinusoidal o cíclica a una distancia considerable de la misma.

Mediante Boussinesq se obtiene la siguiente ecuación:

Ecuación 3.2

$$M_R = \frac{0.24P}{d_r r}$$

Donde:

- M_R = Modulo resiliente (psi)
 P = carga aplicada (lbs)
 d_r = Deflexión medida a una distancia r del punto de aplicación de carga
 r = distancia al punto de medida (pulg.)

Para mayor exactitud se recomienda que la distancia r no sea tan grande para no afectar las deflexiones ya que serían muy pequeñas y de difícil determinación.

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

4 ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. IDENTIFICACION Y LOCALIZACION DE RUTA A EVALUAR

La evaluación de la capacidad estructural del pavimento basada en la medida de la deflexión, determinada con los equipos de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (FWD); se realizó en la carretera que conduce a Sonsonate, iniciando en el Kilómetro 39 + 125, específicamente en el desvío de Armenia y finalizando en el Kilómetro 45+075, a la altura del desvío al Cerro Verde, teniendo una longitud total de 6 Kilómetros (Ver Figura 4.1).- A continuación, en la tabla 4.1, se muestran las características generales del proyecto.

Tabla 4.1

DATOS DE RUTA	
DATOS	DESCRIPCION
Tramo	Desde desvío a Armenia hasta desvío a Cerró Verde, Sonsonate.
Departamento	Sonsonete
Tipo de Carretera	Inter-Departamental
Numero de Ruta	CA08
Número de carril	4
Numero de carril por sentido	2
Ancho de carril	3.50m
Clasificación de la vía	Primaria
Tipo de terreno	Plano y semiondulado
Tipo de superficie	Concreto asfáltico
Tipo de base	Granular
Km Inicial	39+125
Km Final	45+075
Espesor de capa de rodadura	10 cms
Espesor de base	35 cms

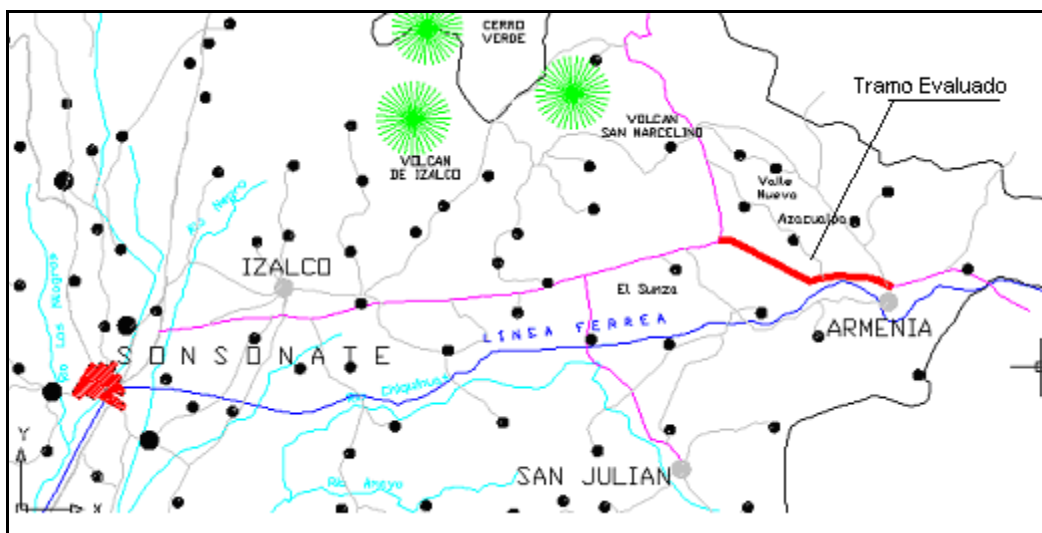


Fig. 4.1 Esquema de Ubicación

4.2. MEDICION DE DEFLEXIONES CON LA VIGA BENKELMAN

La medición de las deflexiones con la viga Benkelman en la carretera que conduce a Sonsonate (CA-08), se inicio en el kilómetro 39+125, específicamente en el desvío de Armenia y finalizando en el kilómetro 45+075, a la altura del desvío al Cerro Verde, Sonsonate. En donde la metodología utilizada fue la siguiente, primeramente se selecciono la ruta en la cual se determinarían las deflexiones.- Seguidamente a la ruta se procede a la medición de la distancia de estacionamientos, siendo esta de 250m, hay que tomar en cuenta que según la norma AASHTO 93 T256-01 en su apartado 9 “Localización y Frecuencia de Muestreo” define las respectivas distancias según el alcance del proyecto para nuestro caso el objetivo es aproximarse al punto medido con el FWD. El número total de estacionamientos medidos con la viga Benkelman son 25 puntos, en una longitud total de 6 kilómetros, realizado en agosto de 2007.

Para la medición de cada punto se identifico la estación, luego se ubico el camión en posición requerida, luego se coloca la viga Benkelman lista para medir calibrando el dial del micrómetro en cero (Ver Figura 4.2).



Fig. 4.2 Colocación típica de la Viga Benkelman

La lectura tomada de deformación máxima de deflexión, se determina a una distancia inicial cero, disminuyendo la deformación conforme el camión se aleja hasta una distancia aproximada de 8m según lo indica la norma AASHTO T256-01 apartado 8.4.2.3. La varilla de alineación no se uso debido que únicamente se determino D_0 . A continuación se muestran en la Tabla 4.2, los resultados obtenidos de la medición de las deflexiones para cada estacionamiento del proyecto.

Tabla 4.2 Lecturas de deflexión con viga Benkelman.

Datos de Ensayo con Viga Benkelman					
Kilómetro	Deflexión (m)	Deflexión (in)	Kilómetro	Deflexión (m)	Deflexión (in)
39+125	0,254	0,0100	42+375	0,4572	0,0180
39+375	0,4064	0,0160	42+625	0,3048	0,0120
39+625	0,2032	0,0080	42+875	0,3048	0,0120
39+875	0,3048	0,0120	43+125	0,508	0,0200
40+125	0,4064	0,0160	43+375	0,4572	0,0180
40+375	0,3302	0,0130	43+625	0,3048	0,0120
40+625	0,3556	0,0140	43+875	0,1016	0,0040
40+875	0,508	0,0200	44+125	0,4064	0,0160
41+125	0,8636	0,0340	44+375	0,4064	0,0160
41+375	0,3048	0,0120	44+625	0,4064	0,0160
41+625	0,4572	0,0180	44+875	0,4064	0,0160
41+875	0,4064	0,0160	45+075	0,3556	0,0140
42+125	0,4064	0,0160			

Los valores de deflexión que aparecen en la Tabla 4.2 corresponden a los valores leídos en el micrómetro (Anexo 6) multiplicado por 2, debido a la relación de brazos 1:2 de la Viga Benkelman (ELE) utilizada en la auscultación.

Evaluación física de las características del pavimento

En la siguiente Tabla 4.3, se presenta un breve informe de las características geométricas del tramo de carretera, evaluada con la viga Benkelman. En la columna 1 encontramos dos registros fotográficos del estacionamiento, en la columna 2 tenemos una sección transversal del mismo que muestra un panorama de las condiciones de drenajes, geometría de la carretera, hombros ó bermas y en la columna 3 se describe de forma breve las condiciones físicas apreciables del estacionamiento. Es importante tomar en cuenta lo anterior debido a que el mal estado del pavimento refleja valores altos de deflexión.

Tabla 4.3 a CARACTERISTICAS DE LOS ESTACIONAMIENTOS



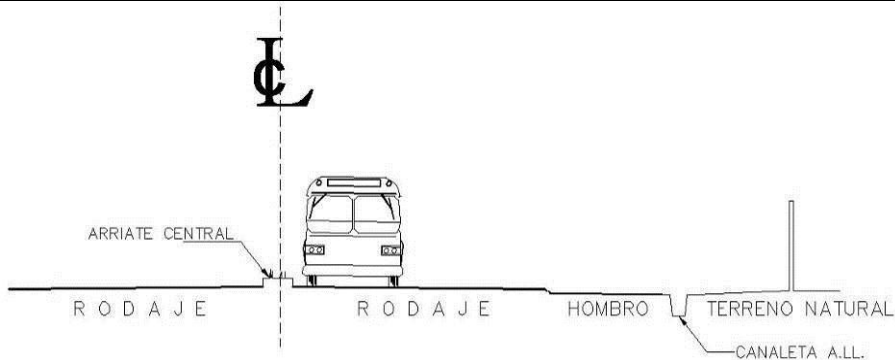


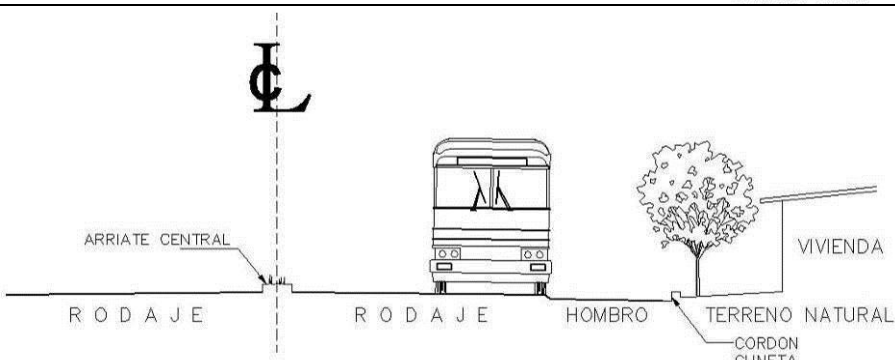


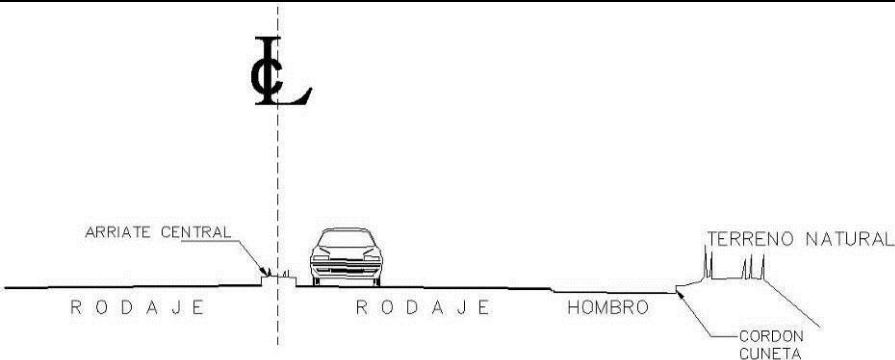
FOTOS		PERFIL	DESCRIPCION
			39+000 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe una canaleta para el drenaje a continuación del hombro.
			39+125 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe cordón cuneta para el drenaje a continuación del hombro.
			39+250 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe cordón cuneta para el drenaje a continuación del hombro.

Tabla 4.3 b CARACTERISTICAS DE LOS ESTACIONAMIENTOS



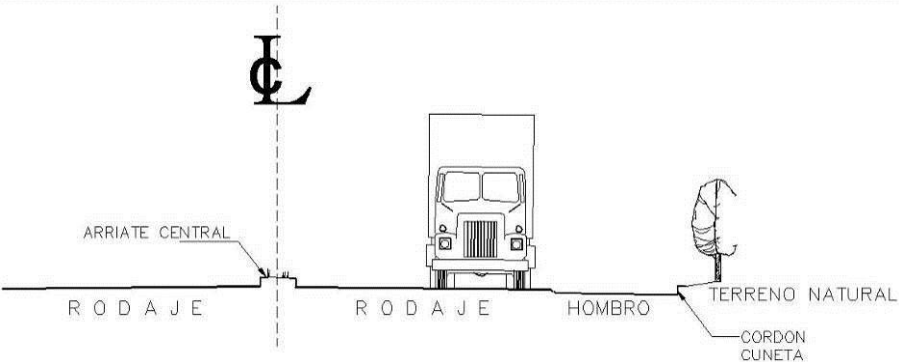





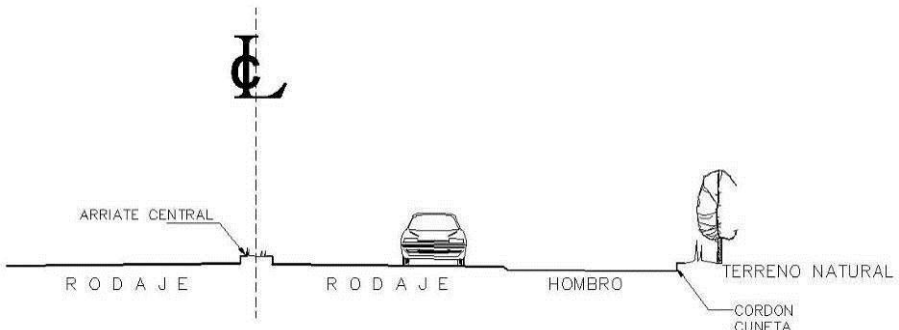
FOTOS		PERFIL	DESCRIPCION
			39+375 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe cordón cuneta para el drenaje a continuación del hombro.
			39+625 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe cordón cuneta para el drenaje a continuación del hombro.
			39+825 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe cordón cuneta para el drenaje a continuación del hombro.

Tabla 4.3 c CARACTERISTICAS DE LOS ESTACIONAMIENTOS



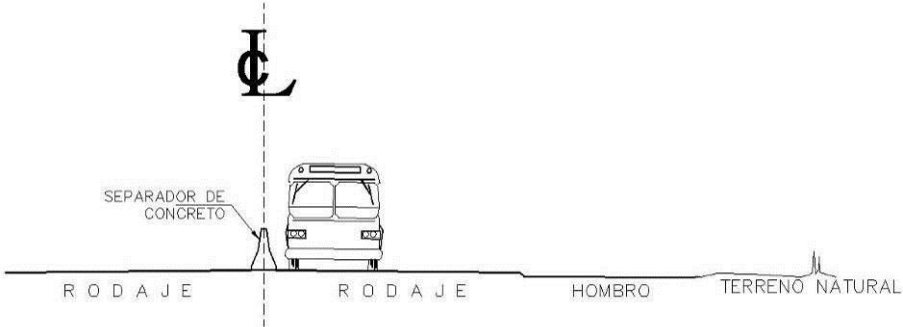


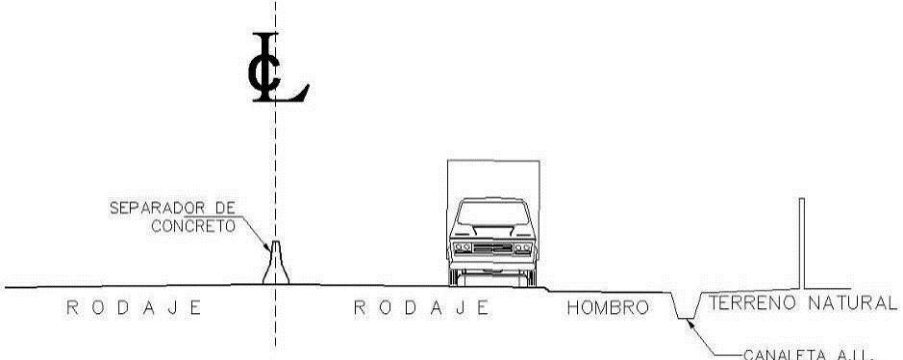


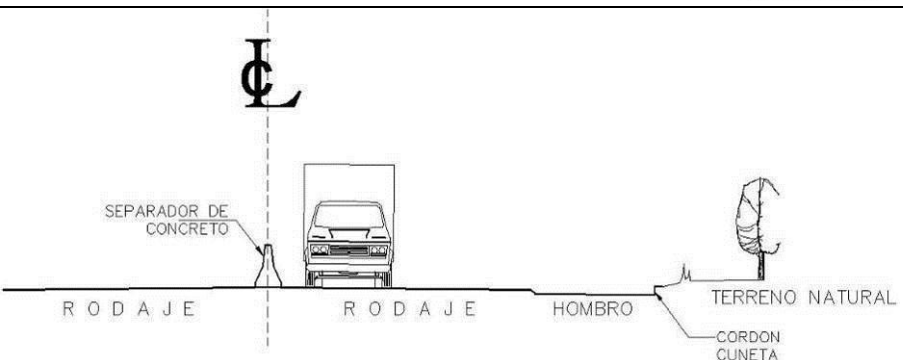
FOTOS		PERFIL	DESCRIPCION
			40+125 Sobre la superficie del pavimento buen estado. No existe drenaje.
			40+375 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe una canaleta para el drenaje a continuación del hombro.
			40+625 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe cordón cuneta para el drenaje a continuación del hombro.

Tabla 4.3 d CARACTERISTICAS DE LOS ESTACIONAMIENTOS



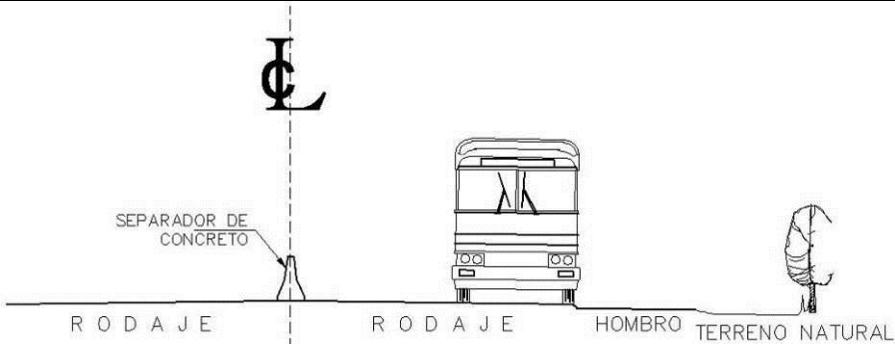


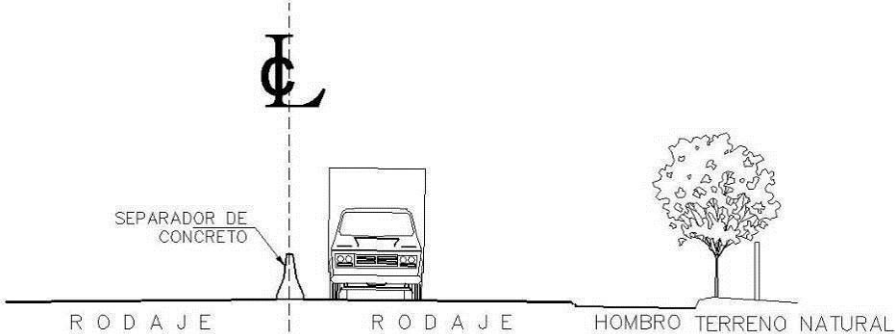


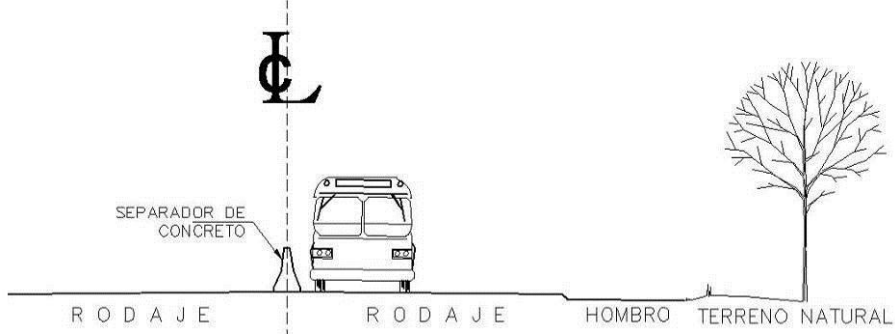
FOTOS		PERFIL	DESCRIPCION
			40+875 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. No existe drenaje. En el derecho de vía muestra daños superficiales
			41+125 Sobre la superficie del pavimento en mal estado. No existe drenaje, y por razones de topografía se acumula agua en sitio.
			41+375 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. No existe drenaje, y por razones de topografía se acumula agua en sitio.

Tabla 4.3 e CARACTERISTICAS DE LOS ESTACIONAMIENTOS



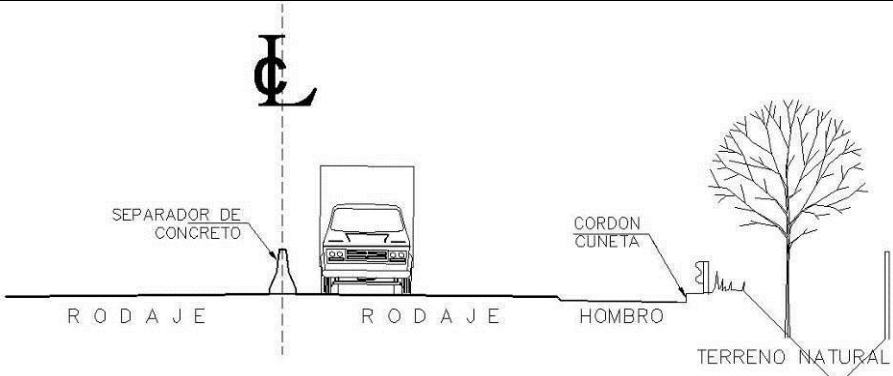


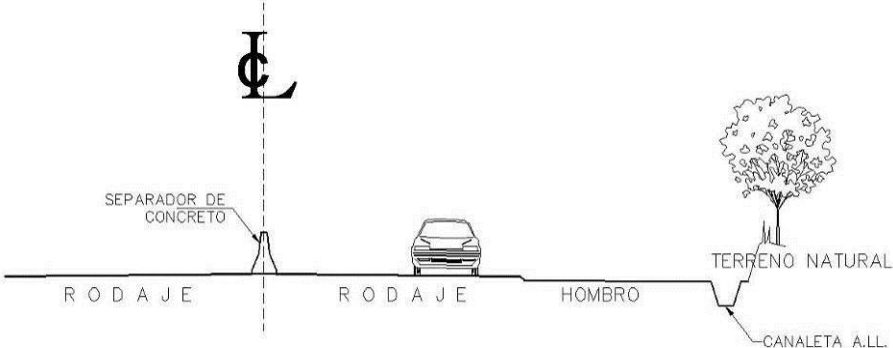


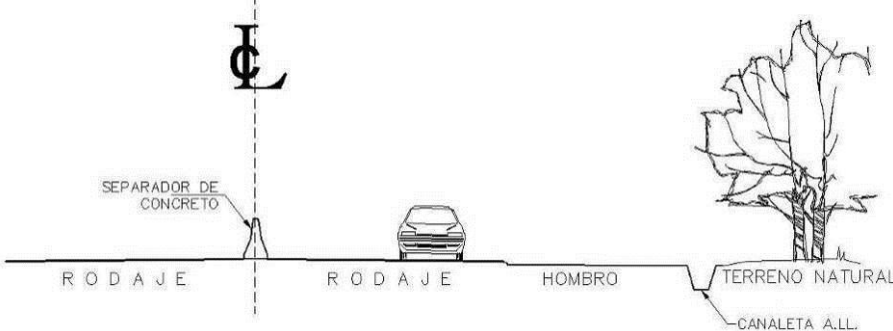
FOTOS		PERFIL	DESCRIPCION
			<p>41+625 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe cordón cuneta para el drenaje a continuación del hombro.</p>
			<p>41+825 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe una canaleta para el drenaje a continuación del hombro.</p>
			<p>42+125 Sobre la superficie en buen estado. Existe una canaleta para el drenaje a continuación del hombro.</p>

Tabla 4.3 f CARACTERISTICAS DE LOS ESTACIONAMIENTOS



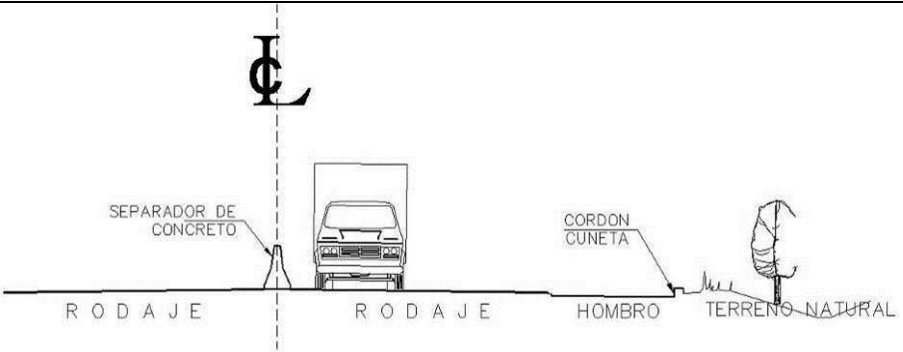

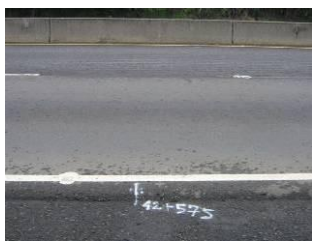
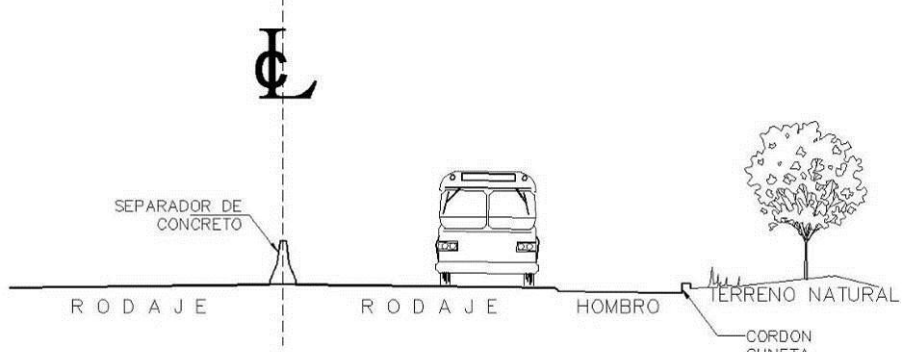


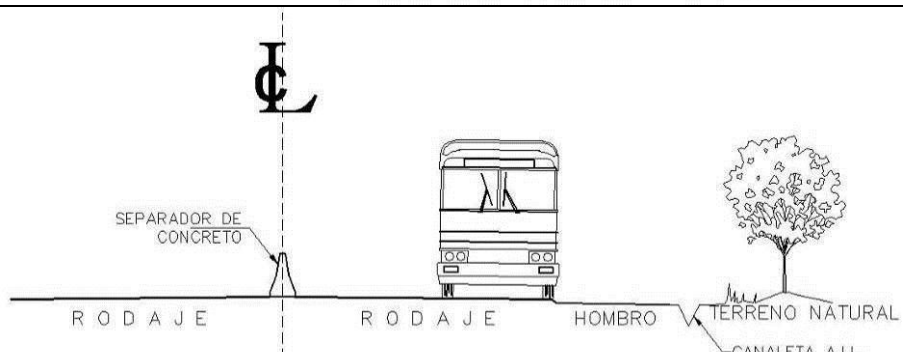
FOTOS		PERFIL	DESCRIPCION
			42+375 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe cordón cuneta para el drenaje a continuación del hombro.
			42+625 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe cordón cuneta para el drenaje a continuación del hombro.
			42+875 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe una canaleta para el drenaje a continuación del hombro.

Tabla 4.3 g CARACTERISTICAS DE LOS ESTACIONAMIENTOS



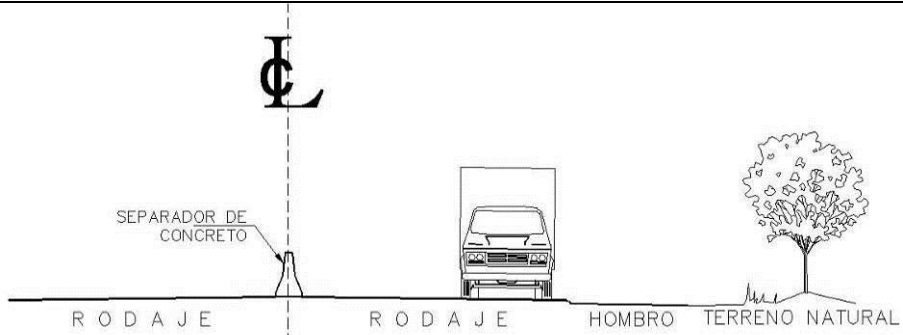


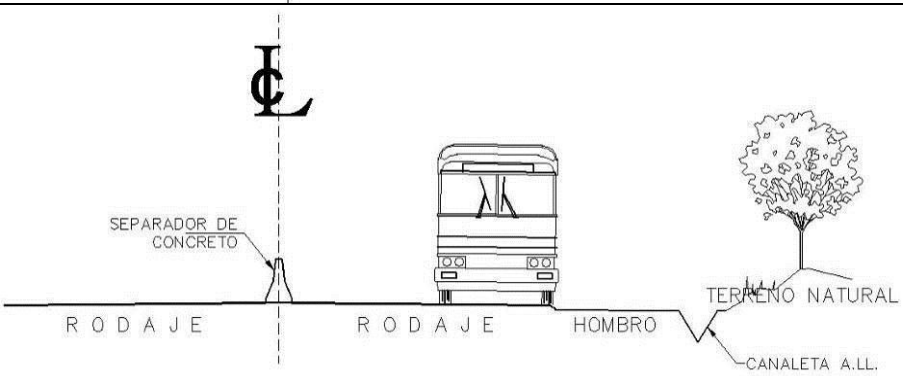


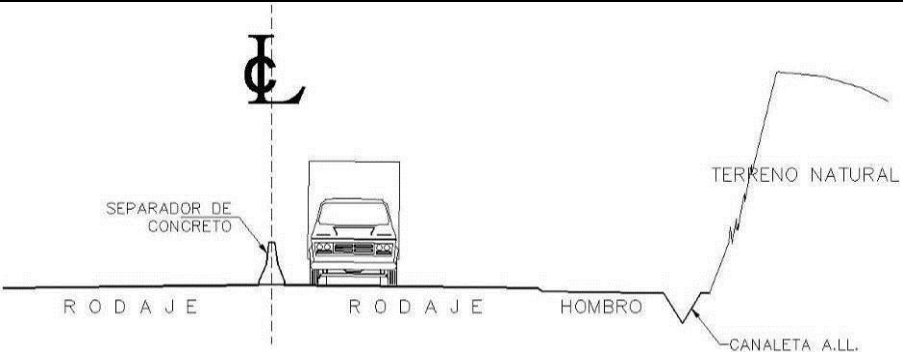
FOTOS		PERFIL	DESCRIPCION
			43+125 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. No existe drenaje.
			43+375 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe una canaleta para el drenaje a continuación del hombro.
			43+625 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe una canaleta para el drenaje a continuación del hombro.

Tabla 4.3 h CARACTERISTICAS DE LOS ESTACIONAMIENTOS



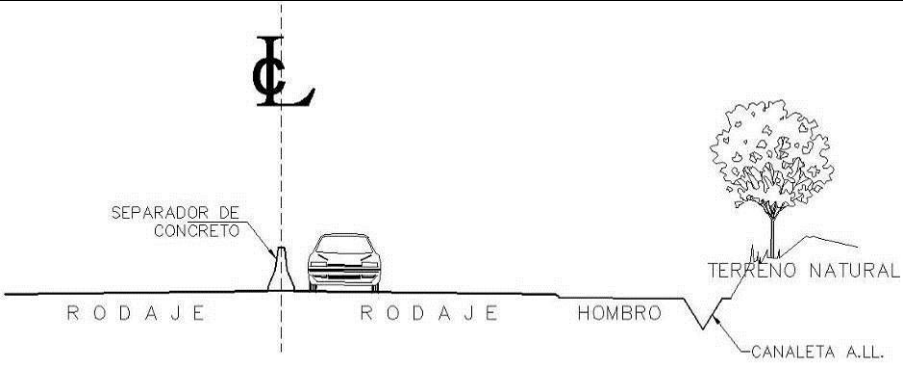


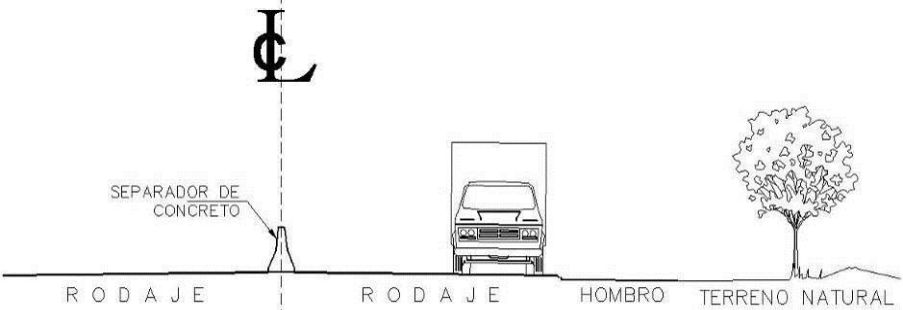


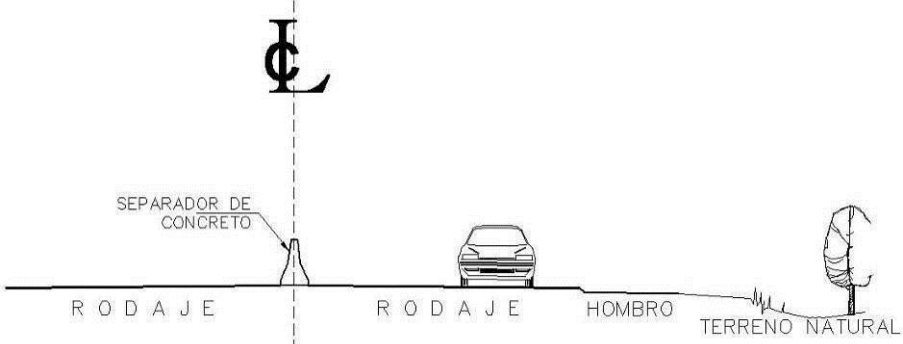


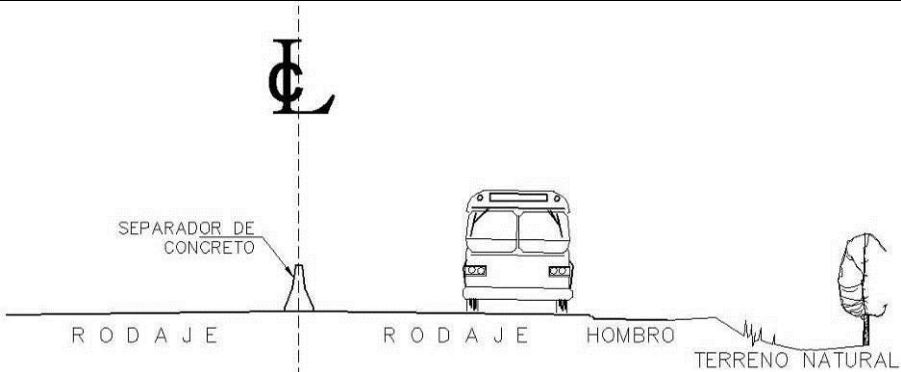


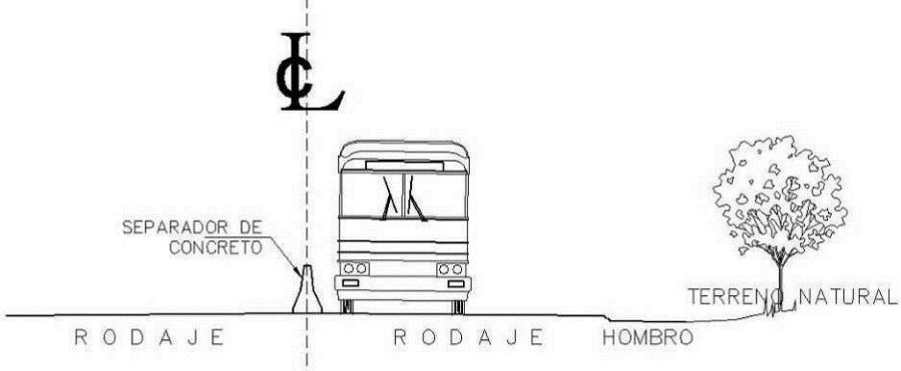


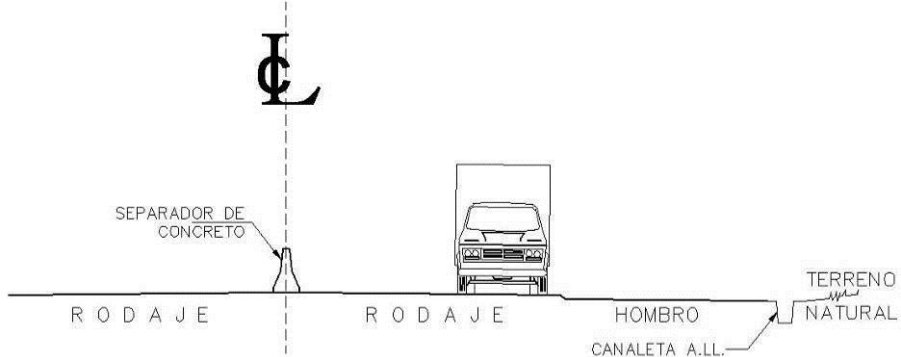
FOTOS		PERFIL	DESCRIPCION
			43+875 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe una canaleta para el drenaje a continuación del hombro.
			44+125 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. No existe drenaje.
			44+375 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. No existe drenaje.

Tabla 4.3 i CARACTERISTICAS DE LOS ESTACIONAMIENTOS

FOTOS		PERFIL	DESCRIPCION
			44+625 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. No existe drenaje.
			44+875 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. No existe drenaje.
			45+125 Sobre la superficie del pavimento en buen estado. Existe una canaleta para el drenaje a continuación del hombro.

4.3. MEDICION DE DEFLEXIONES CON DEFLECTOMETRO DE IMPACTO (FWD)

La medición de deflexiones con FWD, de la carretera que conduce a Sonsonate (CA-08), fue realizada por El ministerio de Obras Publicas en septiembre del 2006, con las siguientes características generales de la medición.

- Departamento : Sonsonate
- Código: CA-08
- Km. Inicial: 39+125
- Km. Final: 45+075
- Equipo: Dynatest FWD
- Radio del plato de carga: 15 cm.
- Configuración plato de carga: 9.000 lbs. (4.086 kgf.)
- Distancia de sensores (cm.): 0-30-60-90-120-150-180

A continuación, en la Tabla 4.4, se muestran los resultados de deflexión medidos con FWD proporcionados por El Ministerio de Obras Publicas.

Tabla 4.4 Datos de Ensayos con Deflectómetro de Impacto

Kilómetro	Deflexión (mm)	Deflexión (in)	Kilómetro	Deflexión (mm)	Deflexión (in)
39+125	0,212	0,008	42+375	0,445	0,018
39+375	0,335	0,013	42+625	0,278	0,011
39+625	0,313	0,012	42+875	0,269	0,011
39+875	0,253	0,010	43+125	0,423	0,017
40+125	0,308	0,012	43+375	0,465	0,018
40+375	0,314	0,012	43+625	0,232	0,009
40+625	0,442	0,017	43+875	0,154	0,006
40+875	0,454	0,018	44+125	0,307	0,012
41+125	0,811	0,032	44+375	0,415	0,016
41+375	0,340	0,013	44+625	0,332	0,013
41+625	0,443	0,017	44+875	0,486	0,019
41+875	0,309	0,012	45+075	0,293	0,012
42+125	0,305	0,012			

4.4. CORRELACIÓN DE DATOS

El objetivo primordial de la correlación es definir la relación y los grados de asociación de dos o más variables a través de la intensidad o fuerza con que están relacionadas linealmente las mismas. En el siguiente estudio de comparación y correlación de deflexiones máximas D_0 medidas mediante el deflectómetro de impacto y la viga benkelman se tomará como datos muestrales (variables) imprescindibles las deflexiones medidas mediante los mismos. Sin embargo una vez establecido el espacio muestral y la relación cuantitativa (mediante la ecuación correspondiente), será posible estimar o predecir el valor de una de las variables (la dependiente) en función de la otra (la independiente). En lo consiguiente la variable dependiente es aquella cuyo valor se estima y que para nuestro caso será la deflexión de la viga benkelman designada con la letra "Y" en tanto que la variable conocida o de entrada se considerara como independientes y que para este estudio será la deflexión del deflectómetro de impacto designada por la letra "X".

Calculo de la Ecuación de Regresión

Una vez recolectada la serie bidimensional constituida por los valores "X" e "Y" (independientes y dependientes) este es llevado a un sistema de ejes coordenados colocando la variable "X" en el eje de las abscisas y, "Y" la variable dependiente en el eje de las ordenadas. A este conjunto de puntos (X, Y) se le conocerá como "diagrama de dispersión". En base a la forma que describa el conjunto de puntos graficados se definirá la función que mejor describa su comportamiento adecuadamente.

Tomando los datos colectados de las deflexiones medidas tanto por la viga benkelman como por el deflectómetro de impacto, se obtiene los siguientes pares ordenados en la Tabla 4.5 y su correspondiente diagrama de dispersión mostrado en el grafico 4.1.

Tabla 4.5 (a) Pares Ordenados

Estación	N	Y_i	X_i
		Deflexión Benkelman (Plg $\times 10^{-3}$)	Deflexión FWD (Plg $\times 10^{-3}$)
39+125	1	10.00	8.35
39+375	2	16.00	13.19
39+625	3	8.00	12.32
39+875	4	12.00	9.96
40+125	5	16.00	12.13
40+375	6	13.00	12.36
40+625	7	14.00	17.40
40+875	8	20.00	17.87
41+125	9	34.00	31.93
41+375	10	12.00	13.39
41+625	11	18.00	17.44
41+875	12	16.00	12.17
42+125	13	16.00	12.01
42+375	14	18.00	17.52
42+625	15	12.00	10.94
42+875	16	12.00	10.59
43+125	17	20.00	16.65
43+375	18	18.00	18.31
43+625	19	12.00	9.13
43+875	20	4.00	6.06
44+125	21	16.00	12.09
44+375	22	16.00	16.34
44+625	23	16.00	13.07
44+875	24	16.00	19.13
45+125	25	14.00	11.54

Siguiendo la metodología AASHTO 93 y en especial el apartado 8.1.6. de la norma T 256-01 se hará la corrección por temperatura ya que está sobrepasaba los 20° C. La medición de la temperatura se realizó de manera empírica y fue definida como 33° por el operador de la viga benkelman.

Con la temperatura del pavimento $T = 33^{\circ} \text{C}$ y el espesor de la capa asfáltica (100 mm) entramos en la gráfica de la figura 11.4 de la Guía de Diseño AASHTO 93 obteniendo así el coeficiente de corrección aproximadamente de 0.85 aplicable a cada una de las deflexiones obtenidas por medio de la Viga Benkelman. A continuación se muestran los nuevos valores de deflexiones tabulados:

Tabla 4.5 (b) Pares Ordenados – Deflexiones viga Benkelman Corregidas por factor de temperatura.

Estación	n	Y_i	X_i
		Deflexión Benkelman (Deflexiones corregidas por T) (Plg $\times 10^{-3}$)	Deflexión FWD (Plg $\times 10^{-3}$)
39+125	1	8.70	8.35
39+375	2	13.92	13.19
39+625	3	6.96	12.32
39+875	4	10.44	9.96
40+125	5	13.92	12.13
40+375	6	11.31	12.36
40+625	7	12.18	17.40
40+875	8	17.40	17.87
41+125	9	29.58	31.93
41+375	10	10.44	13.39
41+625	11	15.66	17.44
41+875	12	13.92	12.17
42+125	13	13.92	12.01
42+375	14	15.66	17.52
42+625	15	10.44	10.94
42+875	16	10.44	10.59
43+125	17	17.40	16.65
43+375	18	15.66	18.31
43+625	19	10.44	9.13
43+875	20	3.48	6.06
44+125	21	13.92	12.09
44+375	22	13.92	16.34
44+625	23	13.92	13.07
44+875	24	13.92	19.13
45+075	25	12.18	11.54

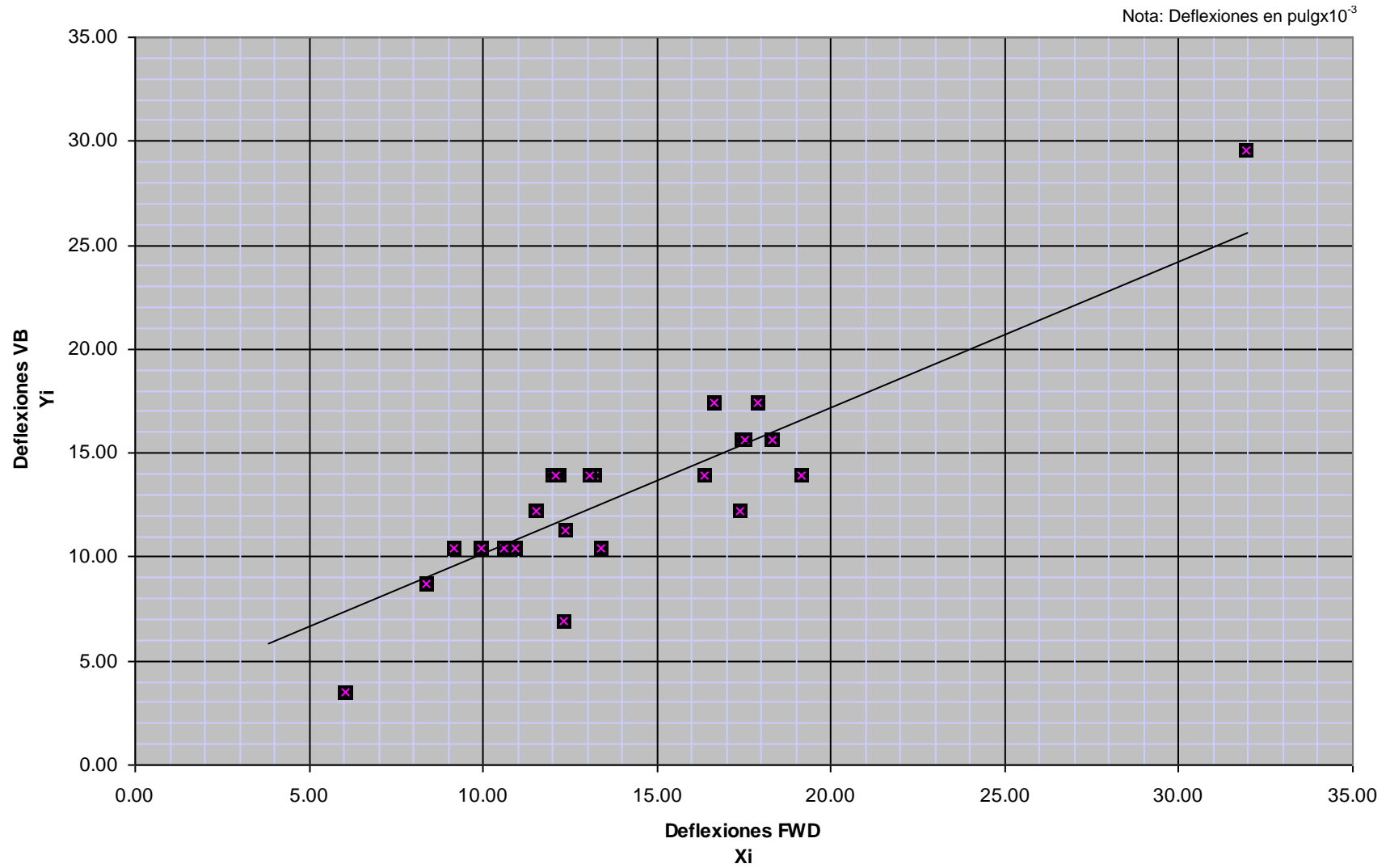


Gráfico 4.1 Diagrama de Dispersión

Ecuación de correlación de deflexión

En base a la forma que predicen los pares ordenados ploteados en el diagrama de dispersión claramente puede decirse que puede aplicarse una relación lineal. Partiendo de esto definimos la ecuación general de predicción de una línea recta:

$$Y_c = a + b X \quad (1)$$

Aplicándola a nuestra necesidad tendríamos:

$$d_{VBC} = a + b d_{FWD} \quad (2)$$

donde:

$d_{VBC} = Y_c$ = Deflexión calculada de la viga Benkelman partiendo de la del deflectómetro de impacto.

$d_{FWD} = X$ = Deflexión medida con el deflectómetro de impacto

a, b = constantes

A partir del “método de mínimos cuadrados” calcularemos la ecuación de regresión. El criterio del método de mínimos cuadrados requiere que encontremos el valor de “a” y “b” tales que la $\sum (Y_i - Y_c)^2$ sea un mínimo (es decir, tienda a cero). Las constantes “a” y “b” se llaman coeficientes de regresión “a” es la intercepción con el eje de las ordenadas y “b” es la pendiente de la línea de mejor ajuste, es decir, la pendiente o coeficiente de X. Calculando “a” y “b” queda determinada la ecuación.

Finalmente los valores de “a” y “b” se resuelven cuando simultaneamos las siguientes ecuaciones normales:

$$\sum Y = na + b \sum X \quad (3)$$

$$\sum XY = a \sum X + b \sum X^2 \quad (4)$$

Donde:

$\sum Y$ = Sumatoria de las deflexiones medidas con la viga benkelman

$\sum X$ = Sumatoria de las deflexiones medidas con el deflectómetro de impacto

n = Cantidad de pares ordenados (X, Y)

A continuación se presenta la Tabla 4.6, de los datos necesarios para calcular la ecuación de correlación y sus respectivas constantes ó factores.

Tabla 4.6 Datos para cálculo de correlación

Estación	n	Y _i	X _i	XY	X ²
39+125	1	8.70	8.35	72.61	69.66
39+375	2	13.92	13.19	183.59	173.95
39+625	3	6.96	12.32	85.77	151.85
39+875	4	10.44	9.96	103.99	99.21
40+125	5	13.92	12.13	168.79	147.04
40+375	6	11.31	12.36	139.82	152.82
40+625	7	12.18	17.40	211.95	302.81
40+875	8	17.40	17.87	311.01	319.48
41+125	9	29.58	31.93	944.46	1019.47
41+375	10	10.44	13.39	139.75	179.18
41+625	11	15.66	17.44	273.12	304.19
41+875	12	13.92	12.17	169.34	148.00
42+125	13	13.92	12.01	167.15	144.19
42+375	14	15.66	17.52	274.36	306.94
42+625	15	10.44	10.94	114.26	119.79
42+875	16	10.44	10.59	110.57	112.16
43+125	17	17.40	16.65	289.77	277.34
43+375	18	15.66	18.31	286.69	335.15
43+625	19	10.44	9.13	95.36	83.43
43+875	20	3.48	6.06	21.10	36.76
44+125	21	13.92	12.09	168.25	146.09
44+375	22	13.92	16.34	227.43	266.95
44+625	23	13.92	13.07	181.95	170.85
44+875	24	13.92	19.13	266.34	366.10
45+075	25	12.18	11.54	140.50	133.07
Σ		329.73	351.89	5147.92	5566.46

Sustituyendo en las ecuaciones (3) y (4) tenemos:

$$329.73 = 25 a + 351.89 b \quad (3)$$

$$5147.92 = 351.89 a + 5566.46 b \quad (4)$$

Simultaneando ambas ecuaciones tenemos:

$$a = 1.56043$$

$$b = 0.82617$$

Sustituyendo a y b en (2) tenemos la ecuación de correlación entre la deflexión del deflectómetro de impacto y la de la viga Benkelman:

$$d_{VBC} = 1.56043 + 0.82617d_{FWD} \quad (4.1a) \quad \text{ecuación en función del deflectómetro de impacto}$$

$$d_{FWD} = 1.21041d_{VBC} - 1.888 \quad (4.1b) \quad \text{ecuación en función de la viga Benkelman}$$

Nota:

Las deflexiones a ingresar en las ecuaciones anteriores deben ser ingresadas en $\text{pulg} \times 10^{-3}$.

Calculo del coeficiente de correlación r

El coeficiente de correlación es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas.

El valor del índice de correlación varía en el intervalo [-1, +1]:

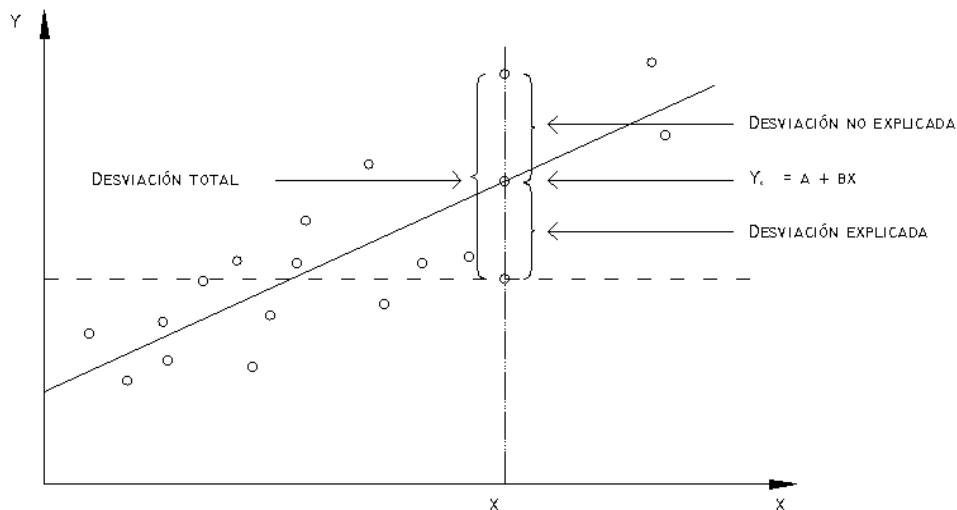
- Si $r = 0$, no existe ninguna correlación. El índice indica, por tanto, una independencia total entre las dos variables, es decir, que la variación de una de ellas no influye en absoluto en el valor que pueda tomar la otra.
- Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada *relación directa*: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en idéntica proporción.
- Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.
- Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada *relación inversa*: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en idéntica proporción.
- Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.

Para este caso el valor del coeficiente de correlación se calculará en términos de variaciones.

Calculo de r en términos de variaciones.

Al calcular la media aritmética de Y_i ($Y = \sum Y/n$) la obtenemos sin tomar en cuenta los valores de X . La Y_c que representa la línea de regresión de los valores de $Y_c = a + bx$, la obtenemos con la influencia de los valores de X . Si los valores de Y_i están relacionados con los valores de X en algún grado, las desviaciones de los valores de Y con respecto a su media Y deben ser reducidos por una magnitud debida a la introducción de los valores de X al calcular los valores de la línea teórica Y_c .

Véase la siguiente grafica que representa el diagrama de la desviación total ($Y_i - \bar{Y}$).



Así expresando el valor de r en función de estas variaciones tenemos:

$$r = \frac{\sum(Y_c - Y)^2}{\sum(Y_i - Y)^2}$$

En la Tabla 4.7, se presentan los datos de recopilación y procesamiento para el cálculo del coeficiente de correlación:

$$r = \sqrt{\frac{418.69}{523.29}}$$

$$r = \sqrt{0.80}$$

$$r = 0.89$$

Este valor indica que hay una correlación positiva de aproximadamente 89% entre las deflexiones obtenidas mediante el deflectómetro de impacto y la viga Benkelman. Basándose en la estadística y sus principios se encuentra que un coeficiente de correlación por arriba de 0.70 es un valor aceptable ya que valores menores a este muestran diferencias mayores al valor teórico definido por la ecuación de regresión y por lo tanto la ecuación se vuelve imprecisa y de menor utilidad.

Tabla 4.7 Tabulación de Datos para el Coeficiente de Correlación

Estación	n	Y_i	X_i	XY	X^2	Y^2	Y_c	$Y_i - Y_c$	$(Y_i - Y_c)^2$	$Y_c - \bar{Y}$	$(Y_c - \bar{Y})^2$	$Y_i - \bar{Y}$	$(Y_i - \bar{Y})^2$
39+125	1	8.70	8.35	72.61	69.66	75.69	8.46	0.24	0.06	-4.73	22.40	-4.49	20.15
39+375	2	13.92	13.19	183.59	173.95	193.77	12.46	1.46	2.14	-0.73	0.54	0.73	0.53
39+625	3	6.96	12.32	85.77	151.85	48.44	11.74	-4.78	22.86	-1.45	2.10	-6.23	38.80
39+875	4	10.44	9.96	103.99	99.21	108.99	9.79	0.65	0.42	-3.40	11.56	-2.75	7.56
40+125	5	13.92	12.13	168.79	147.04	193.77	11.58	2.34	5.48	-1.61	2.59	0.73	0.53
40+375	6	11.31	12.36	139.82	152.82	127.92	11.77	-0.46	0.21	-1.42	2.00	-1.88	3.53
40+625	7	12.18	17.40	211.95	302.81	148.35	15.94	-3.76	14.12	2.75	7.55	-1.01	1.02
40+875	8	17.40	17.87	311.01	319.48	302.76	16.33	1.07	1.15	3.14	9.85	4.21	17.73
41+125	9	29.58	31.93	944.46	1019.47	874.98	27.94	1.64	2.69	14.75	217.56	16.39	268.66
41+375	10	10.44	13.39	139.75	179.18	108.99	12.62	-2.18	4.75	-0.57	0.32	-2.75	7.56
41+625	11	15.66	17.44	273.12	304.19	245.24	15.97	-0.31	0.10	2.78	7.73	2.47	6.10
41+875	12	13.92	12.17	169.34	148.00	193.77	11.61	2.31	5.33	-1.58	2.49	0.73	0.53
42+125	13	13.92	12.01	167.15	144.19	193.77	11.48	2.44	5.95	-1.71	2.92	0.73	0.53
42+375	14	15.66	17.52	274.36	306.94	245.24	16.03	-0.37	0.14	2.85	8.10	2.47	6.10
42+625	15	10.44	10.94	114.26	119.79	108.99	10.60	-0.16	0.03	-2.59	6.69	-2.75	7.56
42+875	16	10.44	10.59	110.57	112.16	108.99	10.31	0.13	0.02	-2.88	8.29	-2.75	7.56
43+125	17	17.40	16.65	289.77	277.34	302.76	15.32	2.08	4.33	2.13	4.54	4.21	17.73
43+375	18	15.66	18.31	286.69	335.15	245.24	16.69	-1.03	1.05	3.50	12.22	2.47	6.10
43+625	19	10.44	9.13	95.36	83.43	108.99	9.11	1.33	1.78	-4.08	16.67	-2.75	7.56
43+875	20	3.48	6.06	21.10	36.76	12.11	6.57	-3.09	9.54	-6.62	43.82	-9.71	94.27
44+125	21	13.92	12.09	168.25	146.09	193.77	11.55	2.37	5.64	-1.64	2.70	0.73	0.53
44+375	22	13.92	16.34	227.43	266.95	193.77	15.06	-1.14	1.30	1.87	3.50	0.73	0.53
44+625	23	13.92	13.07	181.95	170.85	193.77	12.36	1.56	2.44	-0.83	0.69	0.73	0.53
44+875	24	13.92	19.13	266.34	366.10	193.77	17.37	-3.45	11.89	4.18	17.46	0.73	0.53
45+075	25	12.18	11.54	140.50	133.07	148.35	11.09	1.09	1.19	-2.10	4.40	-1.01	1.02
Σ		329.73	351.89	5147.92	5566.46	4872.17			104.60		418.69		523.29

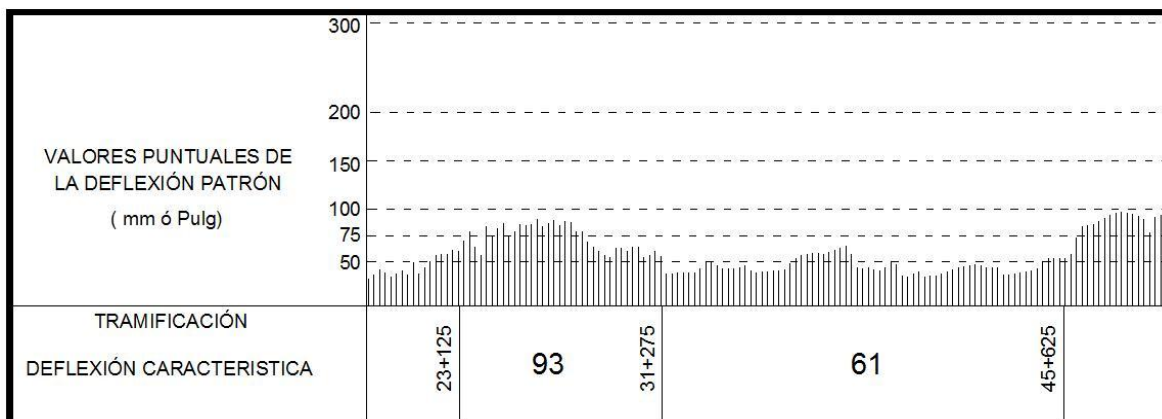
4.5. ESTUDIO DE HOMOGENEIDAD Y ZONAS DEBILES

El estudio de homogeneidad del comportamiento estructural del pavimento nos ayudara para zonificar el comportamiento del mismo, para analizar este comportamiento habrá que hacer un deflectograma y consigo la tramificación en base a la deflexión característica del pavimento al igual que factores visuales tales como agrietamientos.

Deflectograma, tramificación y definición de zonas débiles o características.

Para establecer una tramificación de zonas homogéneas a las que luego se aplicará una única solución de rehabilitación estructural, es recomendable disponer de una representación gráfica de las deflexiones (deflectograma), tomando como abscisas las distancias al origen de los puntos de medida y, como ordenadas, los valores de las deflexiones. Un ejemplo puede ser el esquematizado en la siguiente figura 4.3.

Fig. 4.3 Deflectograma



A continuación se presenta los cálculos tabulados en la Tabla 4.8 para viga benkelman y en la tabla 4.9 para el deflectómetro de impacto, partiendo de un primer sistema de homogenización y tramificación. Y luego en el grafico 4.2, se presenta el deflectograma de las deflexiones obtenidas por medio de la auscultación de la viga benkelman y el deflectómetro de impacto.

Tabla 4.9 de Cálculo, Homogenización, Tramificación, Zonas Débiles, Deflectómetro de Impacto

Estación	n		Media Aritmetica (md)	Rango permisible de deflexiones	Condición de Homogeneidad	(d _i - md)	(d _i - md) ²	Desviación típica muestral (s)	Deflexión Característica (d _k)	Relación s / md
		Deflexión FWD (Plg×10 ⁻³)	Deflectómetro de impacto (pul×10 ⁻³)	Deflectómetro de impacto	Deflectómetro de impacto					
39+125	1	8.35	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 1	-4.60	21.17	3.29	19.52	0.25
39+375	2	13.19	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 1	0.24	0.06	3.29	19.52	0.25
39+625	3	12.32	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 1	-0.62	0.39	3.29	19.52	0.25
39+875	4	9.96	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 1	-2.99	8.92	3.29	19.52	0.25
40+125	5	12.13	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 1	-0.82	0.68	3.29	19.52	0.25
40+375	6	12.36	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 1	-0.59	0.34	3.29	19.52	0.25
40+625	7	17.40	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 1	4.45	19.84	3.29	19.52	0.25
40+875	8	17.87	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 1	4.93	24.27	3.29	19.52	0.25
41+125	9	31.93	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 2	ZONA DEBIL				
41+375	10	13.39	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 3	-0.43	0.18	3.36	20.54	0.24
41+625	11	17.44	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 3	3.63	13.15	3.36	20.54	0.24
41+875	12	12.17	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 3	-1.65	2.72	3.36	20.54	0.24
42+125	13	12.01	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 3	-1.81	3.27	3.36	20.54	0.24
42+375	14	17.52	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 3	3.70	13.72	3.36	20.54	0.24
42+625	15	10.94	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 3	-2.87	8.24	3.36	20.54	0.24
42+875	16	10.59	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 3	-3.22	10.40	3.36	20.54	0.24
43+125	17	16.65	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 3	2.84	8.06	3.36	20.54	0.24
43+375	18	18.31	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 3	4.49	20.18	3.36	20.54	0.24
43+625	19	9.13	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 3	-4.68	21.91	3.36	20.54	0.24
43+875	20	6.06	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 4	ZONA FUERTE				
44+125	21	12.09	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 5	-2.35	5.51	2.88	20.19	0.20
44+375	22	16.34	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 5	1.91	3.63	2.88	20.19	0.20
44+625	23	13.07	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 5	-1.36	1.86	2.88	20.19	0.20
44+875	24	19.13	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 5	4.70	22.10	2.88	20.19	0.20
45+075	25	11.54	14.08	7.04 - 21.11	Tramo 5	-2.90	8.40	2.88	20.19	0.20
	Σ	351.89					218.98			

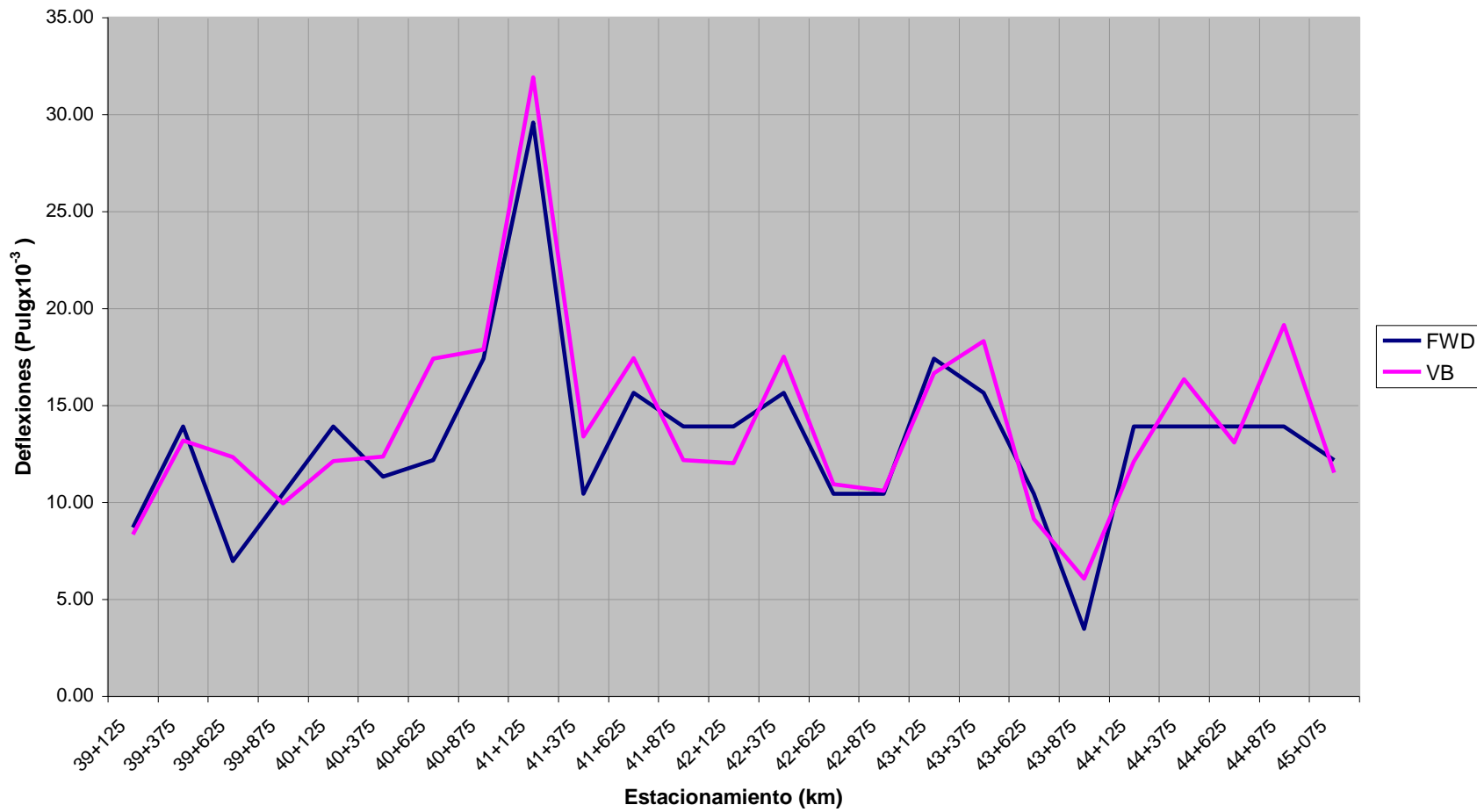


Gráfico 4.2 Deflectograma

Hay que tener en cuenta que un tramo homogéneo que tenga un comportamiento uniforme, tendrá distribuida sus deflexiones aleatoriamente alrededor de la media (md), siguiendo una distribución normal con una desviación típica muestral (s). La experiencia acumulada en Europa y Norte América sobre el tratamiento de las deflexiones medidas con cualquiera de los equipos de auscultación indica que es frecuente encontrar, en este tipo de tramos, unos coeficientes de (s/md) comprendidos entre 0.20 y 0.30. En tramos muy uniformes se dan valores inferiores a éstos. Valores entre 0.30 y 0.40 indican menor uniformidad, pero se considera todavía aceptable. Si el coeficiente de variación de las deflexiones supera ampliamente el valor de 0.40, no podrá considerarse que el tramo tiene un comportamiento uniforme.

Antes de realizar la tramificación hay que tomar en cuenta los siguientes criterios:

1. Los tramos homogéneos de comportamiento uniforme tendrán valores de deflexiones que se mantienen aleatoriamente alrededor del valor medio.
2. Al menos el 95% del valor de las deflexiones tienen que estar entre un rango de una vez y media el valor medio de las deflexiones y la mitad de dicho valor promedio ($0.5md < d_i < 1.5md$).
3. Se considerarán diferentes los tramos con valores medios diferentes.
4. El coeficiente de variación de las deflexiones debe ser menor a 0.40.
5. La longitud mínima de un tramo debe de ser 100 mts.

Una vez definida los tramos homogéneos se estudiara por separado y en él se determinará un valor de la deflexión que se considerará representativo del estado del pavimento. Lo normal será emplear un valor de deflexión característica d_k el cual, suponiendo que los valores de la deflexión se reparten según una curva de Gauss, vendrá definido por la expresión:

$$d_k = md + 2s$$

donde:

$$md = \sum d_i / n \quad s = (\sum (d_i - md)^2 / (n - 1))^{1/2}$$

md: media aritmética de las deflexiones.

d_i : la deflexión patrón, sin corregir por humedad y temperatura, del punto i.

n: el número de puntos medidos del tramo homogéneo.

Análisis de Homogeneidad y Zonas débiles

Primero definiremos homogeneidad como la igualdad tanto cuantitativa como cualitativa de diferentes aspectos tales como: deflexión característica (d_k), relación de deflexiones con respecto a la desviación típica muestral (s) y comportamiento de las deflexiones respectivas de cada estacionamiento.

Tomando en cuenta la tendencia de los datos graficados en el deflectograma de la gráfica 4.2 y en los datos que ofrecen las tablas de cálculo de homogeneidad, tramificación y zonas débiles 4.7 y 4.8 para viga benkelman y deflectómetro de impacto respectivamente podemos obtener variaciones similares y realizar un análisis general de la vía en lo que respecta a homogeneidad, tramificación y zonas débiles por lo consiguiente el siguiente análisis comprenderá a las deflexiones de la viga benkelman como a las del deflectómetro de impacto.

En la Tabla 4.8 y 4.9 de forma cuantitativa se ha definido la Tramificación siguiendo el siguiente análisis; una vez obtenidos los rangos permisibles se observo de forma puntual que en los estacionamientos 41+125 y 43+875 las deflexiones obtenidas por medio de los ensayos (viga benkelman y deflectómetro de impacto) no entraban en dicho rango por lo que se tomarón como frontera para definir la tramificación, definiendo cinco tramos incluyendo los puntuales antes mencionados como Tramo dos y cuatro respectivamente y los siguientes como tramo 1, tramo 3 y tramo 5 cuyos valores de deflexión característica y relación s/m han sido definidas mediante las deflexiones obtenidas en los diferentes

estacionamientos y mediante las cuales se ha podido verificar la homogeneidad general de la vía.

Sin embargo la fig. 4.3 muestra claramente que el tramo 2 se consideraría como una zona débil con respecto a los otros tramos debido a que sobrepasa el límite superior del rango de deflexiones permisibles obtenido en la Tabla 4.8 y 4.9 y al comportamiento incongruente de la tendencia que muestra el deflectograma con respecto a los otros estacionamientos; Al contrario el tramo 4 representa una zona fuerte debido a que está por debajo del rango permisible de deflexiones obtenido en las tablas 4.7 y 4.8 e igualmente el deflectograma marca el cambio de la tendencia de comportamiento de las deflexiones con respecto a los distintos estacionamientos.

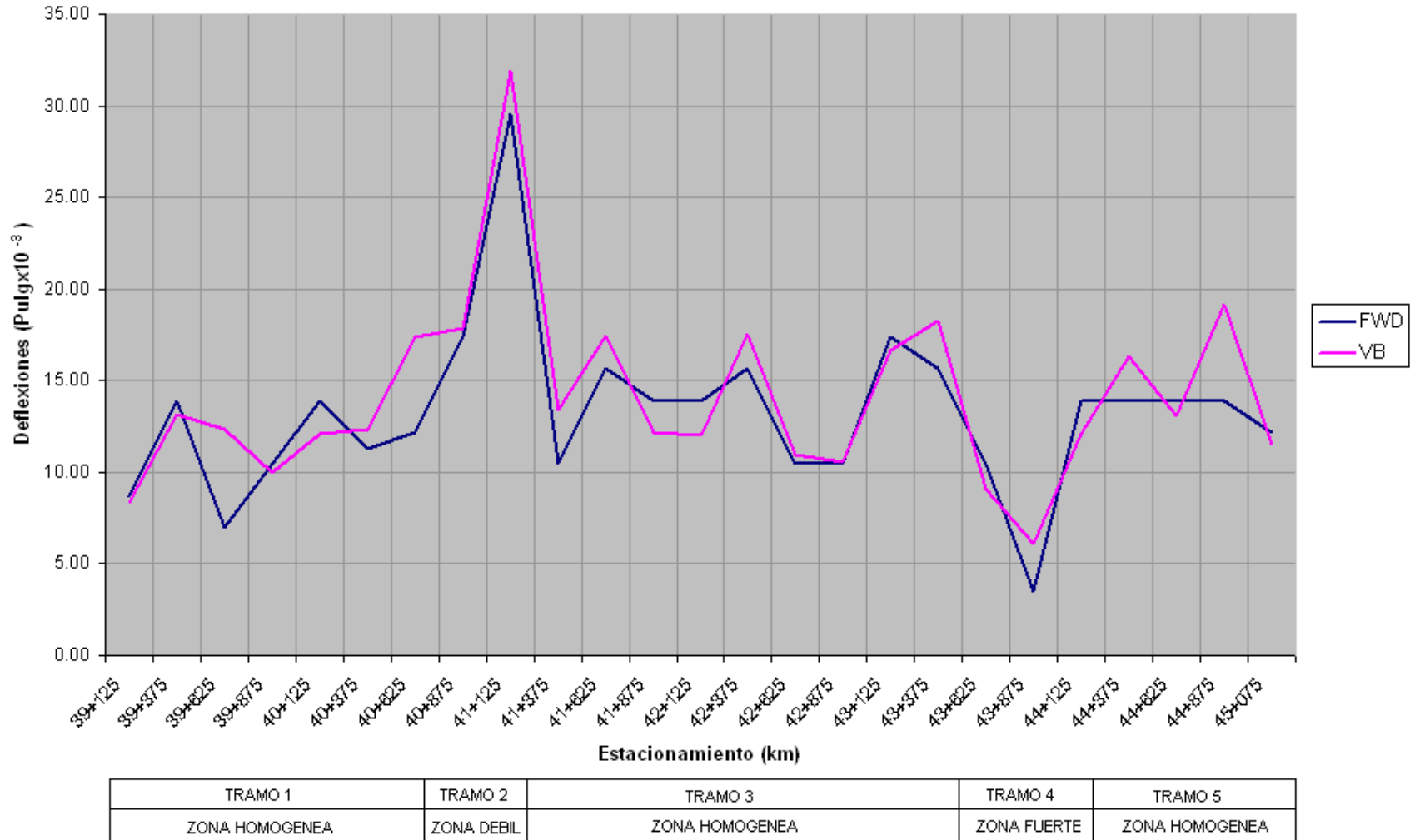


Gráfico 4.3 Deflectógrafo - Tramificación e identificación de zonas débiles.

4.6. CAPACIDAD ESTRUCTURAL

La capacidad estructural se determino a través de métodos no destructivo (NDT), basado en la medida de deflexión, en donde el método del NDT permite analizar la estimación del Numero Estructural (SN).

El numero estructural esta determinado para datos de ensayo con Deflectómetro de Impacto y Viga Benkelman, en donde los datos presentados en la Tabla 4.10 correspondientes al Deflectómetro de Impacto fueron proporcionados por el Ministerio de Obras Publicas, por lo que esta información solo se presenta como informe.- Para obtener el SN, a partir de ensayos con la Viga Benkelman, primeramente se determino el SN, con la Ecuación 3.1 desarrollada para el HDM-4 (Highway Development And Management Model).

La Tabla 4.10 (a) resume los valores calculados por medio de la formula del HDM-4 de SN a través de las deflexiones obtenidas por medio del deflectometro de impacto y la viga benkelman, si analizamos por separado los valores de SN; Como se esperaba, los números estructurales arrojados por la viga Benkelman están mas sobrados que los obtenidos por el deflectometro de impacto mas sin embargo en la Tabla 4.10 (b) se sigue manteniendo valores altos de SN por lo que se recomienda que en trabajos venideros calcular el modulo efectivo del pavimento mediante la correlación con CBR u otro procedimiento para poder utilizar la formula de retrocalculo que nos designa AASHTO 93 en el apartado 11.5.7 – Ecuación 11.17.a

Tabla 4.10 Tabulación de parámetros de Capacidad Estructural

Kilometro	Datos de Ensayos con Deflectometro de Impacto					Datos de Ensayo con Viga Benkelman			Datos Obtenidos de la Correlación usando los datos de VB como variable independiente Ecuación 4.1b		
	Deflexión (mm)	Deflexión (in)	Mr (Psi)	Ep (Psi)	SN	Deflexión (m)	Deflexión (in)	SN	Deflexión (m)	Deflexión (in)	SN
39+125	0.212	0.008	26474	247212	5.00	0.22098	0.0087	8.28	0.219	0.0086	8.32
39+375	0.335	0.013	16949	143849	4.18	0.35357	0.0139	6.16	0.380	0.0150	5.89
39+625	0.313	0.012	15556	182587	4.52	0.17678	0.0070	9.53	0.166	0.0065	9.92
39+875	0.253	0.010	18487	233773	4.91	0.26518	0.0104	7.38	0.273	0.0107	7.25
40+125	0.308	0.012	27827	121025	3.94	0.35357	0.0139	6.16	0.380	0.0150	5.89
40+375	0.314	0.012	17119	170490	4.42	0.28727	0.0113	7.02	0.300	0.0118	6.84
40+625	0.442	0.017	16007	93465	3.62	0.30937	0.0122	6.70	0.326	0.0129	6.48
40+875	0.454	0.018	15420	92223	3.60	0.44196	0.0174	5.35	0.487	0.0192	5.04
41+125	0.811	0.032	12531	39446	2.71	0.75133	0.0296	3.83	0.861	0.0339	3.52
41+375	0.340	0.013	31382	97863	3.67	0.26518	0.0104	7.38	0.273	0.0107	7.25
41+625	0.443	0.017	17708	89010	3.56	0.39776	0.0157	5.72	0.433	0.0171	5.42
41+875	0.309	0.012	17344	170835	4.42	0.35357	0.0139	6.16	0.380	0.0150	5.89
42+125	0.305	0.012	20802	147115	4.21	0.35357	0.0139	6.16	0.380	0.0150	5.89
42+375	0.445	0.018	9055	151512	4.25	0.39776	0.0157	5.72	0.433	0.0171	5.42
42+625	0.278	0.011	21168	176666	4.47	0.26518	0.0104	7.38	0.273	0.0107	7.25
42+875	0.269	0.011	23161	176153	4.47	0.26518	0.0104	7.38	0.273	0.0107	7.25
43+125	0.423	0.017	13504	118983	3.92	0.44196	0.0174	5.35	0.487	0.0192	5.04
43+375	0.465	0.018	13669	98462	3.68	0.39776	0.0157	5.72	0.433	0.0171	5.42
43+625	0.232	0.009	24429	205350	4.70	0.26518	0.0104	7.38	0.273	0.0107	7.25
43+875	0.154	0.006	39779	317615	5.44	0.08839	0.0035	14.75	0.059	0.0023	19.03
44+125	0.307	0.012	17529	174763	4.46	0.35357	0.0139	6.16	0.380	0.0150	5.89
44+375	0.415	0.016	12475	132850	4.07	0.35357	0.0139	6.16	0.380	0.0150	5.89
44+625	0.332	0.013	19788	138267	4.12	0.35357	0.0139	6.16	0.380	0.0150	5.89
44+875	0.486	0.019	12986	94725	3.63	0.35357	0.0139	6.16	0.380	0.0150	5.89
45+075	0.293	0.012	16071	206166	4.71	0.30937	0.0122	6.70	0.326	0.0129	6.48

4.7. CONCLUSIONES

- Se determinó la ecuación de correlación entre las deflexiones medidas tanto por el deflectómetro de impacto como por la viga Benkelman, definida así; $d_{FWD} = 1.21041 d_{VB} - 1.888$, donde d_{FWD} es la deflexión calculada del deflectómetro de impacto y d_{VB} es la deflexión medida con la viga benkelman, aclarando que los datos tienen un año de separación en su medición, sin embargo se realiza en condiciones climáticas similares.
- El valor de correlación de 0.89 corresponde a una correlación positiva del 89% entre las deflexiones obtenidas mediante el deflectómetro de impacto y la viga Benkelman. Valor mayor a 0.70 que estadísticamente se adopta como límite para considerar como precisa la ecuación de correlación.
- La ecuación obtenida mediante esta correlación ha sido comparada con la ecuación de correlación desarrollada por el WSDOT presentando una diferencia porcentual media de 6.6% entre las deflexiones calculadas ya que los coeficientes son numéricamente distintos, diferencia atribuible a el tamaño de la muestra, a las condiciones de los ensayos y al tipo de estructura de pavimento ensayada. Sin embargo las deflexiones calculadas de la correlación d_{FWD} son menores a las obtenidas en los ensayos con la viga Benkelman d_{VB} .
- La capacidad estructural definida mediante el número estructural (SN) y calculada a partir de la fórmula del HDM4 (Ecuación 3.1) muestra valores promedio mayores en un 36.6% a los obtenidos por el deflectómetro de impacto calculados en la Tabla 4.10(a) y (b).
- A través del análisis de homogeneidad y zonas débiles se constató que las zonas homogéneas, débiles y fuertes del tramo de carretera auscultado tanto por el FWD (Septiembre 2006) como por la viga Benkelman (Agosto 2007) mantienen el mismo comportamiento.

4.8. RECOMENDACIONES

- Para estudios posteriores se recomienda que los ensayos de auscultación de pavimentos sean realizados en el mismo tiempo para garantizar que las condiciones a las que este expuesto el pavimento sean las mismas y completar el ensayo como lo dicta la norma AASHTO T256-01.
- Se recomienda medir deflexiones intermedias (D_{R1} , D_{R2} etc) que permitan definir el cuenco de deflexiones con el fin de obtener parámetros de diseño esenciales en la capacidad estructural del pavimento tales como el modulo efectivo del pavimento (E_p) y el modulo resiliente (M_r) lo cual puede realizarse mediante la ampliación a la metodología de Hogg (Anexo 4).
- Comprobar la correlación mediante un mayor número de ensayos. En base a norma AASHTO T256-01 apartado 9.4.

4.9. BIBLIOGRAFIA

- De Solmenihac, H. and Tampier, “Gestión de Infraestructura vial”, Segunda edición Ampliada, Chile 2001.
- Secretaría de Integración Económica de Centroamérica SIECA, “Manual Centroamericano de Normas para el diseño de Carreteras Regionales”, Convenio USAID No. 596-0181.20, Febrero de 2001.
- Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Juan, “Apuntes del curso de Diseño de Vías I de la Carrera de Especialización en Ingeniería de Caminos de Montaña”, Argentina 2003.
- AASHTO, “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures”, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 1993.
- AASHTO, “Standards Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Part 2B: Test”, American Association of State Highway and Transportation Officials, 24th Edition, Washington 2001.
- ASTM, “Road and Paving Materials; Vehicle – Pavement System”, Association Society for Testing Materials. Volume 04.03. Washington 2001
- Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo, “Normas 6.3 – IC Rehabilitación de firmes”, Madrid 2003.
- WSDOT, “WSDOT Pavement Guide Interactive”, Washington State Department of Transportation, Washington (C: \WSDOT Pavement Guide.htm)
- Mario S. Hoffman, Ph.D, “Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (Ensayos no destructivos)”, Octubre 1985.

4.10. ANEXOS

INDICE DE ANEXOS

- Anexo 1 – Norma AASHTO 2003 – T256-01.
- Anexo 2 – Norma ASTM 2003 - D 4694 – 96.
- Anexo 3 – Datos de Auscultación de pavimentos realizada por medio De FWD y desarrollada MOP – ITYAC Septiembre 2006.
- Anexo 4 – Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones.
- Anexo 5 – Correlación FWD vrs VB – Desarrollada por WSDOT.
- Anexo 6 – Datos de auscultación de pavimentos realizada por medio de la Viga Benkelman.
- Anexo 7 - Factor de Ajuste por temperatura según Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 93.

ANEXO 1

Standard Method of Test for

Pavement Deflection Measurements

AASHTO Designation: T 256-01



1. SCOPE

- 1.1. This test method provides standards for measuring pavement surface deflections, directly under, or at locations radially outward (offset) from a known static, steady-state, or impulse load. Deflections are measured with sensors that monitor the vertical movement of a pavement surface due to the load. This test method describes procedures for the deflection measurement using various deflection testing devices and provides the general information that should be obtained regardless of the type of testing device used.
- 1.2. This test method is applicable for deflection measurements performed on flexible asphalt concrete (AC), rigid Portland cement concrete (PCC), or composite (AC/PCC) pavements. Rigid pavements may be plain, jointed, jointed reinforced, or continuously reinforced or fractured concrete.

The values stated in SI units are to be regarded as standard. Imperial units given in parentheses are for information purposes only.

This standard does not purport to address the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. REFERENCED DOCUMENTS

- 2.1. *ASTM Standards:*
- D 4602. Nondestructive Testing of Pavements Using Cyclic-Loading Dynamic Deflection Equipment
 - D 4694. Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device
 - D 4695. Guide for General Pavement Deflection Measurements
 - D 5858. Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory
- 2.2. *Other Document:*
- AASHTO *Pavement Deflection Data Exchange: Technical Data Guide*, Version 1.0, April 1998

3. TERMINOLOGY

- 3.1. *Definitions of terms specific to this standard:*
- 3.1.1. *deflection sensor*—electronic device(s) capable of measuring the relative vertical movements of a pavement surface and mounted in such a manner as to minimize angular rotation with respect to its

measuring plane at the expected movement. Such devices may include seismometers, velocity transducers, or accelerometers.

- 3.1.2. *load cell*—capable of accurately measuring the load that is applied perpendicular to the loading plate and is placed in a position to minimize the mass between the load cell and the pavement. The load cell shall be positioned in such a way that it does not restrict the ability to obtain deflection measurements under the center of the load plate. The load cell shall be water resistant, and shall be resistant to mechanical shocks from road impacts during testing or traveling.
- 3.1.3. *loading plate*—capable of an even distribution of the load over the pavement surface. Loading plates may be circular in shape (or rectangular in some cases), one piece or segmented, for measurements on conventional roads and airfields or similar stiff pavements. The plate shall be suitably constructed to allow pavement surface deflection measurements at the center of the plate.
- 3.1.4. *deflection basin*—the idealized bowl shape of the deformed pavement surface due to a specified load as depicted from the peak measurements of a series of deflection sensors placed at radial offsets from the center of the loading plate.
- 3.1.5. *deflection basin test*—a test with deflection sensors placed at various radial offsets from the center of the loading plate. The test is used to record the shape of the deflection basin resulting from an applied load. Information from this test can be used to estimate material properties for a given pavement structure.
- 3.1.6. *load transfer test*—a test, usually on PCC pavement, with deflection sensors on both sides of a transverse break in the pavement. The test is used to determine the ability of the pavement to transfer load from one side of the break to the other. Also, the load-deflection data can be used to predict the existence of voids under the pavement.
- 3.1.7. *test location*—the point at which the center of the applied load or loads are located.

4. SUMMARY OF TEST METHOD AND LIMITATIONS

- 4.1 This test method consists of standards for measuring pavement surface deflections directly under and/or at appropriate offset locations from the load center. Each nondestructive testing (NDT) device is operated according to the standard operating procedure applicable to the device.
- 4.2 This test method includes general descriptions of the various types of static and semi-continuous deflection testing devices, and procedures for deflection measurement corresponding to each testing device.
- 4.3 Standards for collection of general information, such as test setup, ambient temperature, pavement temperature, equipment calibration, number of tests, and test locations, pertain to all devices.

5. SIGNIFICANCE AND USE

- 5.1. NDT measurement of pavement surface deflections provides information that can be used for the structural evaluation of new or in-service pavements. These deflection measurements may be used to determine the following pavement characteristics:
 - 5.1.1. Modulus of each layer.

- 5.1.2. Overall stiffness of the pavement system.
- 5.1.3. Load transfer efficiency of PCC pavement joints.
- 5.1.4. Modulus of subgrade reaction.
- 5.1.5. Effective thickness, structural number, or soil support value.
- 5.2. These parameters may be used for the analysis and design of reconstructed and rehabilitated flexible and rigid pavements, pavement structural adequacy assessment including joint efficiency of PCC pavement, void detection in PCC pavements, research and/or network structural inventory purposes.

6. APPARATUS

- 6.1. The apparatus used in this test method shall be one of the deflection measuring devices described in Section 6.2 and shall consist of some type of probe or surface contact sensor(s) to measure vertical pavement movements or deformations when subjected to a given load.
- 6.2. *Deflection Measuring Devices:*
 - 6.2.1. *Noncontinuous Static Loading Device,*¹ that operates on a single lever-arm principle. This device should have a minimum 2.5 m (8.2 ft) long probe, and the extension of the probe shall depress a **dial gage or electronic sensor that measures maximum pavement surface deflection with a** resolution of 0.025 mm (0.001 in.) or better. The vehicle used to carry the static deflection device shall be a truck carrying an 80 kN (18,000 lbf) test load on a single rear axle. The loading configuration including axle loads, tire sizes, and inflation pressures can be obtained using the manufacturer's specification; however, this information must be clearly indicated in the engineering report.
 - 6.2.2. *Semicontinuous Static Loading Device,*² that operates on a double lever-arm principle. The vehicle used to carry this device shall be a truck carrying a 130 kN (29,000 lbf) single axle test load. The loading configuration including axle loads, tire sizes, and inflation pressures can be obtained using the manufacturer's specification; however, this information must be clearly indicated in the engineering report. The test vehicle should be equipped with a double lever arm with probes, the geometry and size of which makes it possible to measure the maximum pavement surface deflection in both wheel paths with a resolution of 0.025 mm (0.001 in.) or better. The extension of each lever arm holding the probe should depress an electronic sensor, which may be of any type provided the sensor delivers an analog or digital signal. The digital signal shall be correlated with the movement of this extension and, therefore, with the deflection of the pavement surface under the effect of the moving test load. The truck should be able to lift and move the probes from one measurement point to the next, lower them onto the pavement surface, and make another set of measurements in a fully automated process at a constant vehicle speed.
 - 6.2.3. *Steady-State Loading Device,*³ that uses a dynamic force generator to produce a dynamic load. The force generator may use, for example, a counter rotating mass or a servo-controlled hydraulic actuator to produce the dynamic load. The device that uses a counter rotating mass operates at a fixed frequency to produce a dynamic load under a static weight applied through a pair of rigid steel wheels. Both loading frequency and the magnitude of the dynamic loads may be varied by the operator of the devices that use a servo-controlled hydraulic actuator. Depending on the model, normal operating frequencies range from 8 to 60 Hz and maximum dynamic forces range from 2.2 to 35.5 kN (500 to 8000 lbf) applied through a single circular or dual rectangular plate. These

loading devices may be mounted in a van, on the front of a vehicle, or on a trailer. Deflection measurement devices should have five or more sensors to satisfactorily measure the deflection basin with a resolution of 0.001 mm (0.00004 in.) or better.

- 6.2.4. *Impulse Loading Device*,⁴ that creates an impulse load on the pavement by dropping a mass from different heights onto a rubber or spring buffer system. Generally known as a Falling Weight Deflectometer (FWD), the force generating device shall be capable of being raised to one or more predetermined heights and dropped. The resulting force pulse, transmitted to the pavement through a 300 mm (11.8 in.) diameter loading plate, shall not vary from each other by more than three percent. The force pulse shall approximate the shape of a haversine or half-sine wave and a peak force that can be varied within the range of 7 to 105 kN (1500 to 24000 lbf) shall be achievable. The impulse loading device shall measure pavement surface deflections using six or more sensors with a resolution of 0.001 mm (0.00004 in.) or better.

7. CALIBRATION

- 7.1. The deflection sensor(s) and load cell (if applicable) of the deflection device should be calibrated to ensure that all readings are accurate within specified limits. For devices where the load is assumed to be constant and is not measured, the accuracy of the magnitude of load imparted should be checked periodically.

7.2. *Load Cell:*

- 7.2.1. *General*—The procedure for calibrating the load cell (if the device uses a load cell) is dependent upon the type of device used. The calibration of the load cell may be checked informally by observing the load cell readings and comparing them against expected readings based on experience or shunt calibration values in the case of Falling Weight Deflectometer. Load cell reference (or absolute) calibration shall be performed at least once a year except for the noncontinuous and semi-continuous loading devices. (See Table 1.)

Table 1—Load Cell Frequency of Calibration

Device Type	Frequency of Calibration
Noncontinuous and Semicontinuous Static Loading Types	Prior to testing
Steady-State Loading Types (see Section 7.2.3 for devices that do not have a load cell)	At least once a year using manufacturer's instructions or using the procedure in Appendix A of SHRP Report SHRP-P-661
Impulse Loading Types (Falling Weight Deflectometer)	At least once a year using the procedure in Appendix A of SHRP Report SHRP-P-661

- 7.2.2. *Noncontinuous and Semicontinuous Static Loading Devices*—Immediately prior to testing, weigh the axle load of the truck if the ballast consists of a material that can absorb moisture (sand or gravel, etc.) or could have changed for any reason. Trucks with steel or concrete block loads only need to be weighed if the loads are changed or could have shifted.
- 7.2.3. *Steady-State Loading Devices*—Devices that are equipped with load cells may be calibrated by measuring the load cell output under known static loading conditions, such as the load of the device itself. Load cells should be calibrated at least once a year following the manufacturer's instructions or using the SHRP procedure in Appendix A of SHRP Report P-661. Calibration of a dynamic load application device that does not have a load cell requires specialized equipment generally not available except at the manufacturer's location. Potential error from variations in applied loads for this device is nominal; retesting after leaving the factory may not be considered a requirement. Calibration for applied load should be conducted indirectly once a month by checking the frequency of the counter-rotating fly wheels with a strobe light.

7.2.4. *Impulse Loading Devices*—Reference load cell calibration should be carried out at least once per year. Appendix A of SHRP Report SHRP-P-661⁵ contains an example outline for such a task.

7.3. *Deflection Sensors:*

7.3.1. *General*—The procedure for calibrating the deflection sensors is dependent upon the type of apparatus used. Calibration of the deflection sensors should be checked at least once a month during production testing except noncontinuous and semi-continuous loading devices. (See Table 2.)

7.3.2. *Noncontinuous and Semicontinuous Static Loading Devices*—Static loading devices should be calibrated daily with feeler gages. When performing deflection sensor calibration, induced deflections should be similar in magnitude to the deflections encountered during normal testing.

7.3.3. *Steady-State Loading Devices*—A routine calibration check of the deflection sensors shall be conducted once a month. If significant differences are noted for a sensor, it shall be returned to the manufacturer for check or calibration under standard calibration oscillatory vibrations. Deflection sensors shall be calibrated annually.

Table 2—Deflection Sensor Frequency of Calibration

Device Type	Frequency of Calibration	Min Frequency of Calibration Check
Noncontinuous and Semicontinuous Static Loading Types	Daily during operation	Daily during operation
Steady-State Loading Types	At least once a year	Once a month during operation
Impulse Loading Types (Falling Weight Deflectometer)	Reference calibration at least once a year using the procedure in Appendix A of SHRP Report SHRP-P-661	Relative calibration once a month during operation using the procedure in Appendix A of SHRP Report SHRP-P-661

7.3.4. *Impulse Loading Devices*—Reference deflection sensor calibration should be carried out in accordance with the SHRP Protocol (see Appendix A of SHRP Report SHRP-P-661 for impulse loading devices). A relative calibration check should be conducted once every four months using the SHRP Protocol (see Appendix A of SHRP Report SHRP-P-661).

7.4. *Temperature Sensors:*

Pavement temperature sensor calibration should be carried out using a calibrated reference thermometer and two reference surfaces such as a “cool” and “hot” surface. Air temperature sensor (if equipped) calibration should be carried out using two reference temperatures, e.g., stirred ice-water (0°C) and boiling water (100°C). Calibration of the temperature sensors should be carried out at least once a year.

8. FIELD DATA COLLECTION AND TESTING PROCEDURE

8.1. *General*—The procedure to be followed is, to some extent, dependent upon which type of device is used. The following general information is suggested as the minimum data that needs to be collected, regardless of the type of device used.

8.1.1. *Load*—For impulse loading devices, record the peak load applied to the pavement surface by the deflection device. For steady-state loading devices, record the calculated peak-to-peak load. For static loading devices, record the axle load of the test vehicle.

- 8.1.2. *Load Frequency*—If applicable, record the frequency of calculated oscillatory load for vibratory loading devices.⁶
- 8.1.3. *Geometry of the Loaded Area and Deflection Sensor Locations*—For proper modeling of the pavement structure and/or backcalculation of layer parameters, etc., it is necessary that the locations of the load, deflection sensors, pavement surface cracks, and PCC joints are known and recorded. Record the location of cracks and joints between the load and each sensor within 2 m (6.5 ft) from the center of the load toward the sensors. Record the location, and orientation of all sensors as measured radially outward from the center of the load, for example, “300 mm (11.8 in.) ahead of the applied load.” In accordance with the selected method of evaluating joint efficiency or load transfer, the load(s) and deflection sensor(s) should be properly positioned, for example, with one or more sensors on each side of the joint and the load placed as close as possible to the leave (downstream) side of the joint in question. Failure to note the presence of joints and cracks within the zone of influence of the load could result in errors in the subsequent analysis of the recorded deflections. Similarly, failure to properly note the actual position of the deflection sensors could result in major analysis errors.
- 8.1.4. *Time of Test*—Record the date and time the deflection measurements are obtained.
- 8.1.5. *Stationing or Chainage*—Record the station number or location of the test point for each deflection test conducted.
- 8.1.6. *Air and Pavement Temperatures*—At a minimum, record the ambient air temperature and pavement surface temperature at specified intervals as recommended by the engineer. Additional temperatures may be required for specific postprocessing methods. For example, pavement layer temperatures may be determined by drilling holes to one or more depths within the pavement layer and filling the bottom of these holes with water, glycerin, or an oil-based product and recording the temperature of the fluid at the bottom of each hole. If testing is conducted over an extended period of time, take temperature measurements of the fluid every hour to establish a direct correlation between the air, pavement surface, and/or at-depth temperature measurements. If this is not possible, some procedures⁷ also exist for estimating the pavement temperature as a function of depth using the high and low air temperatures for the previous 24-hour day and the current pavement surface temperature.
- 8.2. *Testing Locations*—Record the test location at the beginning of the testing sequence. The frequency of field testing is dependent upon the testing level selected, as discussed in Section 9 of this standard.
- 8.3. *Test Method*—Depending on the type of apparatus used, different test methods can be used. Steady-state loading devices capable of variable loads and frequencies can be used to conduct “frequency sweeps” (multiple tests at various frequencies, at the same test location and load). Impulse loading devices are typically capable of applying various loads; some devices can control the shape and duration of the load pulse. Joint efficiency measurements on jointed PCC pavements can be carried out with devices equipped with multiple deflection sensors by placing the load on one side of the joint and positioning one or more sensors on each side of the joint.
- 8.4. *Procedure for Deflection Measurements:*
- 8.4.1 *General*—Procedures for conducting the specific deflection testing should be those furnished by the manufacturer of the device, as supplemented to reflect the general guidelines provided in this standard. The following steps shall be performed irrespective of the device used.

- Calibrate the deflection sensor and load cell (if applicable) of the device, following the procedure discussed in Section 7.
- 8.4.1.2. Transport the device to the test location over the desired test point.
- 8.4.1.3. Measure the ambient air temperature and pavement temperatures in accordance with the guidelines in Section 8.1.6.
- 8.4.1.4. Record the following information for each pavement tested: project location, operator name, date and time, calibration factors, the beginning and ending station or physical location such as the "Jct. IH 635 and Beltline road," location of cut and fill, culvert locations, bridges, and other vertical control features, and the limits and extent of surface distress, weather condition, and a description of the pavement type.
- 8.4.1.5. The test location shall be free from all rocks and debris to ensure that the loading plate (if applicable) will be properly seated. Gravel or soil surfaces shall be as smooth as possible and all loose material shall be avoided or removed.
- 8.4.2. *Noncontinuous Static Loading Device (e.g., Benkelman Beam):*
- 8.4.2.1. Position the beam between the tires so that the probe is 1.37 m (4.5 ft) forward of and perpendicular to the rear axle.
- 8.4.2.2. Adjust the dial gage to read 0.000 mm (0.000 in.).
- 8.4.2.3. Drive the test vehicle approximately 8 m (26.3 ft) forward at creep speed and record the maximum dial reading (D_m) with a resolution of 0.025 mm (0.001 in.) or better.
- 8.4.2.4. After the dial needle has stabilized, record the final dial reading (D_f) with a resolution of 0.025 mm (0.001 in.) or better.
- 8.4.2.5. Pavement surface deflection = $2 (D_m - D_f)$.
- 8.4.2.6. Repeat this process at the measurement intervals specified in Section 10. Normally, both wheel tracks are measured using two instruments. However, when testing with only one instrument, the testing can be alternated between wheel tracks, obtaining two measurements in the outer wheel track for every one measurement in the inner wheel track throughout the test section.
- 8.4.2.7. Report the average (mean) deflection for each wheel track.
- 8.4.3. *Semi-Continuous Static Loading Device:*
- 8.4.3.1. Obtain pavement surface deflection measurements for both wheel tracks as specified in Section 9 on a continuous chart.
- 8.4.3.2. Read the deflection measurements from the deflection traces with a resolution of 0.025 mm (0.001 in.) or better, and tabulate using deflection data sheets along with any accompanying notes.
- 8.4.3.3. Calculate and report the average (mean) deflections for both wheel tracks.

- 8.4.4. *Steady-State Loading Device:*
- 8.4.4.1. Record the information that identifies the exact configuration of the deflection device at the time of testing. The device configuration data usually includes number and spacing of deflection sensors and orientation of the deflection sensors.
 - 8.4.4.2. Locate the device such that the center of load is at the selected test location and the sensor bar is parallel to the direction of travel (or across the joint for longitudinal or skewed joints).⁸
 - 8.4.4.3. Lower the sensor bar to position the sensors and the loading plate (or plates) or loading wheels. Initiate force generation until stability⁹ is reached at the selected loading frequency and load magnitude.
 - 8.4.4.4. Read and record the measured deflections for each of the sensors, either manually on data sheets or directly if data recording is automated.
- 8.4.5. *Impulse Loading Device:*
- 8.4.5.1. Set up the software for data collection.
 - 8.4.5.2. Input the information that identifies the exact configuration of the deflection device at the time of testing. The device configuration data are stored in the data output file and are a direct input to data analysis. This information usually includes the size of load plate, number and spacing of deflection sensors, and the orientation of deflection sensors with respect to the load plate.
 - 8.4.5.3. Select the appropriate data file format. Several file formats are available, e.g., U.S. Customary units, SI units, and other options.
 - 8.4.5.4. Lower the loading plate and sensors to ensure that they are resting on a firm and stable surface.
 - 8.4.5.5. Raise the force generator to the desired height and drop the "weight". Perform at least one seating drop and one or more test drop(s) at any load level. Record the peak surface deflections and peak load (excluding seating drops) or record the full load response and deflection-time history as recommended by the engineer.
 - 8.4.5.6. When the engineer desires to determine the nonlinearity of the pavement materials, perform testing at multiple-load levels. The analyst may use basin averaging if random error is of sufficient concern.

9. LOCATION AND SAMPLING FREQUENCY

- 9.1. The test location will vary with the intended application of the data. For the most part, the common approach is to test primarily in wheel paths, since the pavement response at these locations reflects the effect of damage that has been accumulated. Deflection testing between wheel paths on AC pavement may be performed to compare testing in the wheel paths to indicate relative damage.
- 9.2. *Network Level Testing*—This testing level provides for a general overview of a pavement's bearing capacity with limited testing. Deflection testing is typically performed at 200 m to 500 m (656 ft to 1,640 ft) intervals, depending on the specific pavement conditions. A minimum of seven tests per uniform pavement section is recommended to ensure a statistically significant sample. At

a minimum, the load for asphalt concrete (AC) and continuously reinforced concrete pavements (CRCP) should be positioned along the outer wheel path, or alternatively along the centerline of CRCP slabs. For jointed concrete pavements (JCP), the load should first be positioned at the geometric center of the slab. For network level testing, at least 10 percent of the slabs covered should be tested at the joints as well, for deflection or load transfer efficiency.

- 9.3. *General Project Level Testing*—This testing level provides for a more detailed analysis of the pavement, for example for the purpose of overlay or rehabilitation design. Testing should be performed at 50 m to 200 m (164 ft to 656 ft) intervals, depending on the specific pavement conditions, with a minimum of 15 tests recommended per uniform pavement section. At a minimum, the load for AC or CRCP pavements is generally positioned along the outer wheel path, or alternatively along the centerline of CRCP slabs. For JCP pavements, the load should first be positioned at or near the geometric center of the slab, and then moved to the nearest joint and positioned along the same line, generally on the leave side of the joint. On roads, streets and highways, joint tests are often conducted along the outer wheel path. For general project level testing, generally not every joint associated with each interior slab test is covered; however, a minimum joint coverage rate of 25 percent is recommended. On airfield JCP pavements, joint efficiency measurements should be carried out on both transverse and longitudinal joints.
- 9.4. *Detailed Project Level Testing*—This test level provides for a highly detailed and specific analysis of the pavement, for purposes such as identifying localized areas of high deflection or detecting subsurface voids on PCC pavements, etc. For AC or CRCP pavements, testing is typically performed at 10 m to 50 m (32.8 ft to 164 ft) intervals as recommended by the engineer. On roads, streets and highways, testing is often carried out in both wheel paths. For JCP pavements, the load should first be positioned at or near the geometric center of every slab along the length of the test section, and then moved to the nearest joint or crack on each slab, either along the outer wheel path or at the corner of the slab, or both. On airfield JCP pavements, joint efficiency measurements should be carried out on both transverse and longitudinal joints.

10. OTHER DATA NEEDED PRIOR TO DEFLECTION ANALYSIS

- 10.1. The following pavement system data may be needed to facilitate the load-deflection analysis:
- 10.1.1. Pavement layer material types and thicknesses.
- 10.1.2. Depth to bedrock or stiff layer.
- 10.1.3. Project ID or roadway name and subsection.

11. DEFLECTION TESTING REPORT

- 11.1. Field reports (both electronic and hard copy) for each deflection test that was performed should contain information on the following items as a minimum.
- 11.2. Purpose of deflection testing.
- 11.3. Date and time of testing.
- 11.4. Operator identification.
- 11.5. Vehicle information.

- 11.6. Weather conditions.
- 11.7. Air and pavement temperatures.
- 11.8. Section Information—These are usually agency-specified, but the section information generally includes the following:
 - 11.8.1. Roadway and county or district in which it is located.
 - 11.8.2. Type of pavement being tested.
 - 11.8.3. Direction of travel.
 - 11.8.4. Lane being tested (e.g., driving or passing lane).
- 11.9. Load and Deflection Data.
 - 11.9.1. Type of deflection device.
 - 11.9.2. Type of deflection test, such as deflection basin or load transfer.
 - 11.9.3. Location of sensors.
 - 11.9.4. Applied load and load frequency.
 - 11.9.5. Measured deflections under load.

12. DATA ACQUISITION SOFTWARE

- 12.1. Some deflection testing devices use their own field program to acquire load and deflection data. Traditionally, pavement surface deflection data files have been structured using ASCII formats that are very device dependent. Although ASCII format allows users and agencies to easily access the data output files, a separate program is needed to access the output file for each type of testing device. To mitigate this problem, AASHTO has developed a universal pavement surface deflection data exchange (PDDX) format specification. A description of this specification can be found in the last reference in Section 2 of this standard (may now be wrong reference, Section 2 reorganized by editors).

13. DATA PROCESSING SOFTWARE (FOR REFERENCE)

- 13.1. Several backcalculation software programs have been developed for deflection data processing and analysis. An ASTM Standard (see Section 2 for reference) provides a discussion on some of the major differences between the most commonly used backcalculation programs. If back-calculation techniques are employed, use the latest program version for back-calculation of pavement layer moduli.

14. **PRECISION AND BIAS**

- 14.1. Since this test method covers the use of various NDT devices used on any type of bound pavement surface, the precision and bias of this test method will be a function of both the characteristics of the pavement tested and the device used. Information on reliability, accuracy, and repeatability of various vibratory and impulse loading devices can be found in the experiment performed at the Waterways Experiment Station (WES)¹⁰ in Vicksburg, Mississippi.

15. **KEYWORDS**

- 15.1. Benkelman beam; deflection surveys; load cell; deflection sensor; falling-weight deflectometer (FWD); impulse deflection testing device; load/deflection testing; nondestructive testing (NDT); pavement surface deflection; pavement testing; static deflection testing device; steady-state dynamic deflection testing device; and sampling frequency.

¹ An example of this instrument is the Soiltest Benkelman Beam.

An example of this instrument is the Lacroix Deflectograph.

² Examples of this instrument are the Geolog Dynaflect and the Foundation Mechanics Road Rater.

⁴ Examples of this instrument are the Dynatest FWD, the KUAB FWD, the Phoenix FWD, and the Jils FWD.

⁵ Report SHRP-P-661—*Manual for FWD Testing in the Long-Term Pavement Performance (LTPP) Study*.

⁶ For devices such as the Dynaflect, the manufacturer generally presets the cyclic loading frequency at typical default value of 8 Hz.

⁷ Federal Highway Administration: "Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavements," Report No. FHWA-RD-98-085.

⁸ When testing longitudinal joints, a "star bar" is used to measure joint efficiency at right angle.

⁹ When using steady-state devices, the first few vibrations are unstable in terms of output because the sensors have not responded to the output frequency yet.

¹⁰ Bentsen, Nazarian, and Harrison, "Reliability Testing of Seven Nondestructive Pavement Testing Devices." *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*, ASTM STP 1026, A. J. Bush, III and G. Y. Baladi, Eds, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 41-58.



Designation: D 4694 – 96

Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device¹

This standard is issued under the fixed designation D 4694; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the measurement of deflections of paved and unpaved surfaces with a falling-weight-type impulse load device. These devices are commonly referred to as falling-weight deflectometers or FWDs.

1.2 This test method describes the measurement of vertical deflection response of the surface to an impulse load applied to the pavement surface. Vertical deflections are measured on the load axis and at points spaced radially outward from the load axis.

NOTE 1—Subcommittee D04.39 is currently working on the development of a Precision and Bias statement. Therefore, the committee recommends that the results from this test method should not be used in a buying or selling relationship for construction materials or construction materials acceptance.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. A specific hazard statement is given in Section 6.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 4695 Guide for General Pavement Deflection Measurements²

2.2 Strategic Highway Research Program:

Manual for FWD Testing in the Long Term Pavement Performance Study, Operational Field Guidelines, Version 2.0, February 1993

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-4 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.39 on Non-Destructive Testing of Pavement Structures.

Current edition approved Feb. 10, 1996. Published April 1996. Last previous edition D 4694 – 87 (1995) ϵ . Originally published as D 4694 – 87.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.03.

3. Summary of Test Method

3.1 This test method is a type of plate-bearing test. The load is a force pulse generated by a weight dropped on a buffer system and is transmitted through a plate resting on the pavement surface. The test apparatus may be mounted in a vehicle or on a suitable trailer towed by a vehicle.

3.2 The vehicle is brought to a stop with the loading plate positioned over the desired test location. The plate and deflection sensors are lowered to the pavement surface. The weight is raised to the height that, when dropped, will impart the desired force to the pavement. The weight is dropped and the resulting vertical movement or deflection of the pavement surface is measured using suitable instrumentation. Multiple tests at the same or different heights of drop may be performed before the apparatus is then raised and moved to the next test site.

3.3 Peak pavement deflections at each measured location resulting from the force pulse are recorded in micrometres, millimetres, mils, or inches, as appropriate.

3.4 The peak force imparted by the falling weight is measured by a load cell and recorded, as the force in kN or lbf or mean stress (the load divided by the plate area) in kN/m² or psi as appropriate.

4. Significance and Use

4.1 This test method covers the determination of pavement surface deflections as a result of the application of an impulse load to the pavement surface. The resulting deflections are measured at the center of the applied load and at various distances away from the load. Deflections may be either correlated directly to pavement performance or used to determine the in-situ material characteristics of the pavement layers. Some uses of data include structural evaluation of load carrying capacity and determination of overlay thickness requirements for highway and airfield pavements.

5. Apparatus

5.1 *Instrumentation System*, conforming to the following general requirements:

5.1.1 *Instruments Exposed to the Elements* (outside the vehicle), shall be operable in the temperature range of -10 to 50°C (10 to 120°F) and shall tolerate relatively high humidity, rain or spray, and all other adverse conditions such as dust, shock, or vibrations that may normally be encountered.

5.1.2 *Instruments Not Exposed to the Elements* (inside the vehicle), shall be operable in the temperature range of 5 to 40°C (40 to 105°F).

5.2 *Force-Generating Device* (falling "weight"), with a guide system. The force-generating device shall be capable of being raised to one or more predetermined heights and dropped. The resulting force pulse transmitted to the pavement shall be reproducible within the requirements of 7.1. The force pulse shall approximate the shape of a haversine or half-sine wave, and a peak force of approximately 50 kN ($11\ 000\text{ lbf}$) shall be achievable.

NOTE 2—It is common practice to use a force-pulse duration of 20 to 60 ms or a rise time of 10 to 30 ms.

5.2.1 *Guide System*, designed to operate with negligible friction or resistance and designed so the weight falls perpendicular to the pavement surface.

5.3 *Loading Plate*, capable of an approximate uniform distribution of the load on the pavement surface. Typical loading plates are 300 and 450 mm (12 and 18 in.) in diameter for measurements on conventional roads and airfields or similar stiff pavements. The plate shall be suitably constructed to allow pavement deflection measurements at the center of the plate.

5.4 *Deflection Sensor*, capable of measuring the maximum vertical movement of the pavement and mounted in such a manner as to minimize angular rotation with respect to its measuring plane at the maximum expected movement. The number and spacing of the sensors is optional and will depend upon the purpose of the test and the pavement layer characteristics. A sensor spacing of 300 mm (12 in.) is frequently used. Sensors may be of several types such as displacement transducers, velocity transducers, or accelerometers.

5.5 *Data Processing and Storage System*—Load and deflection data shall be recorded on either or both a magnetic storage device or paper strip recorder. Supporting information such as air temperature, pavement surface temperature, distance measurements, and identification data for each test point can be recorded either automatically or manually.

5.6 *Load Cell*, to measure the applied load on each impact shall be placed in a position to minimize the mass between the load cell and the pavement. The load cell shall be positioned in such a way that it does not restrict the ability to obtain deflection measurements under the center of the load plate. The load cell shall be water resistant, and shall be resistant to mechanical shocks from road impacts during testing or traveling, or both.

6. Hazards

6.1 The test vehicle, as well as all attachments to it, shall comply with all applicable state and federal laws. Precautions shall be taken beyond those imposed by laws and regulations to ensure maximum safety of operating personnel and other traffic.

7. Calibration

7.1 *Force-Generating Device*—Prior to load and deflection sensor calibration, pre-condition the device by dropping the weight at least five times and checking the relative difference in each loading. Loadings shall not vary from each other more than 3%. If the variations exceed this tolerance, the height of the drop, cleanliness of the track, as well as any springs or rubber pads that are used to condition the load shall be checked. Improperly operating parts shall be replaced or repaired prior to calibration to ensure that the horizontal forces are minimized.

7.2 *Load Calibration Platform*—Follow the manufacturer's recommendations for calibration since several types of these devices are commercially available.

7.3 *Deflection Sensors*—Calibrate sensors at least once a month or in accordance with the manufacturer's recommendations.

7.3.1 *Relative Deflection Calibration*—The relative deflection calibration procedure shall be used to adjust the deflection measurements from each deflection sensor so that they will produce the same deflection measurement (within the precision limits specified in 8.2). The relative deflection calibration requires a sensor holding tower available from the manufacturer. The tower must have sufficient sensor positions to accommodate all of the sensors used during testing. The tower shall position the sensors one above the other along a vertical axis. The base of the tower shall have a single support post on the same vertical axis. The tower shall have sufficient stiffness to allow each sensor to experience the same deflection generated by the Force-Generating Device. Mount the sensors in the tower and position as near the load plate as possible. The tower position shall be fixed by making a small divot in the pavement or by cementing a washer on the pavement to provide a solid contact point for the support post. The load plate shall stay in continuous contact with the pavement surface while gathering calibration data. During calibration, rotate the sensors so that each sensor occupies every level in the tower. At each tower position, record five deflections for each sensor. The tower shall be manually held in a vertical position with a moderate downward pressure while measuring the deflections. Deflection magnitudes of about $400\ \mu\text{m}$ (15 mils) are desired. The same load setting shall be maintained throughout the calibration. Determine deflection ratios for each sensor by dividing the average for all the sensors by the average of that sensor. If any of the resulting ratios are greater than 1.003 or less than 0.997, all of the sensor calibration factors shall be replaced by the existing calibration factor multiplied by the ratio. If any of the calibration factors exceed the limits established by the manufacturer, the device should be repaired and recalibrated according to the manufacturer's recommendations.

7.3.2 To ensure that small deflections (as typically encountered near the outer edge of the deflection basin) are monitored to a reasonable degree of accuracy, repeat the above procedure at a distance of 1 to 1.5 m (3 to 5 ft) from the load plate. Deflection magnitudes of between $50\ \mu\text{m}$ and $100\ \mu\text{m}$ (2 to 4 mils) are desired. Ensure that the average difference between any two sensor readings is $2\ \mu\text{m}$ (0.08 mils) or less; the sensor calibration factors should not be altered. If any differences in

average deflection greater than 2 μm (0.08 mils) are found, the device should be repaired and recalibrated according to the manufacturer's recommendations.

NOTE 3—Several methods have been developed by agencies other than the manufacturers to calibrate falling-weight-type impulse load devices using independent load cells and deflection sensors. One such method is the Reference Calibration procedure developed by the Strategic Highway Research Program (SHRP), presently under the direction of the Long Term Pavement Performance (LTPP) Office of the Federal Highway Administration (FHWA). For the purpose of using this reference method to calibrate the Falling Weight Deflectometers used in the LTPP study, four regional calibration centers have been established, one in each LTPP region. These centers are in Pennsylvania, Minnesota, Texas, and Nevada, operated by their respective State Departments of Transportation. Another method is a transportable calibration verification system developed at the University of Texas at El Paso (UTEP) for the Texas DOT. This also uses independent load cells and deflection sensors to measure the load and deflections created by a falling-weight-type device. Both SHRP and the UTEP method can use the same point on the pavement surface to calibrate the deflection readings by removing the "sensor under test" from its holder and placing it in a reference holder, while the UTEP method can also retain the use of the sensor holders provided by the manufacturer, with the verification deflection sensor(s) placed as close as possible to the sensor under test. These two calibration methods are more complementary than interchangeable, with the stationary method used to make adjustments of 2 % or less to the deflection sensor gains and the portable UTEP method used as a verification of the deflection sensor/sensor holder combination as used in the field, under actual field conditions.

8. Signal Conditioning and Recorder System

8.1 All signal conditioning and recording equipment shall allow data reading resolution to meet the following requirements:

8.1.1 Load measurements shall be displayed and stored with a resolution of 200 N (50 lbf) or less.

8.1.2 Deflection measurements shall be displayed and stored with a resolution of $\pm 1 \mu\text{m}$ (0.04 mils) or less.

8.2 The load and deflection measurements shall be recorded as specified under 8.1.1 and 8.1.2, respectively, within a time period or measurement window of at least 60 ms, to an accuracy at the time of peak load and deflection of $\pm 2 \%$, and a precision for deflections of $\pm 2 \mu\text{m}$ (0.08 mils).

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

9. Procedure

9.1 Transport the device to the test location and position the loading plate over the desired test point. The test location shall be as clean as possible of rocks and debris to ensure that the loading plate will be properly seated. Gravel or soil surfaces shall be as smooth as possible and all loose material removed. (See Guide D 4695.)

9.2 Lower the loading plate and the sensors to ensure they are resting on a firm and stable surface.

9.3 Raise the force generator to the desired height and drop the "weight". Record the resulting peak surface deflections and peak load.

NOTE 4—If significant permanent deformation under the loading plate occurs, move the apparatus and reduce the applied force until the permanent deformation is of no significance to the first test at a test location.

9.4 Perform at least two loading sequences (9.3) and compare the results. If the difference is greater than 3 % for any sensor, note the variability in the report. Additional tests may be run at the same or different loads.

10. Precision and Bias

10.1 *Precision*—At this time, no precision from a statistically designed series of tests with different devices has been obtained. Test results from the same device or from different devices may vary due to variations in buffer stiffness or pavement stiffness. Each device, however, should be able to meet the accuracy requirements of 8.2 and the calibration requirements established by the manufacturer and SHRP.

10.2 *Bias*—No statement is being made as to the bias of this test method at the present time.

11. Keywords

11.1 deflection surveys; deflection testing; falling weight deflectometer (FWD); impulse deflection testing device; load/deflection testing; nondestructive testing (NDT); pavement deflection; pavement testing



Designation: D 4695 – 96

Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements¹

This standard is issued under the fixed designation D 4695; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

1. Scope

1.1 This guide provides recommendations for measuring pavement deflections resulting from the application of a known transient load, a steady-state dynamic load, or an impulse load applied by a nondestructive deflection testing (NDT) device. Deflections are measured with sensors that monitor the vertical movement of the pavement surface. This guide describes the general information that should be obtained regardless of the type of testing device used.

1.2 This guide is applicable for deflection measurements made on flexible (asphalt concrete (AC)), rigid (Portland Cement Concrete (PCC) or continuously reinforced concrete (CRCP)), or composite (AC/PCC) pavements.

1.3 This guide provides general information that is required for three suggested levels of testing effort, as follows:

1.3.1 *Level I*—a general overview of pavement condition for network analysis.

1.3.2 *Level II*—a routine analysis of the pavement for purposes such as overlay or rehabilitation design projects.

1.3.3 *Level III*—a detailed or specific analysis of the pavement, such as the evaluation of joint efficiency or foundation support for PCC slabs.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as standard. Inch-pound units given in parentheses are for information purposes only.

1.5 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *AASHTO Standard*.²

T256—Standard Recommended Practice for Pavement Deflection Measurements

¹ This guide is under the jurisdiction of Committee D-4 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.39 on Non-Destructive Testing of Pavement Structures.

Current edition approved Feb. 10, 1996. Published April 1996. Last previous edition D 4695 – 87. Originally published as D 4695 – 87.

² Available from the American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., NW, Washington, DC 20001.

3. Summary of Guide

3.1 This guide consists of recommendations for measuring vertical or normal pavement surface deflections, directly under or at locations radially outward (offset), or both, from the load center. Several offset deflection measurements at a specific test location describe what is called a deflection "basin". Each NDT device is operated according to the standard operating procedure applicable to the device.

3.2 Recommendations for collection of general information such as ambient temperature, pavement temperature, equipment calibration, number of tests, and test location pertains to all devices.

4. Significance and Use

4.1 The nondestructive measurement of pavement deflections provides information that can be used for the structural analysis of the pavement system. The series of measured deflections or deflection basins may serve as inputs for models that estimate the overall stiffness of the pavement system, the effective or apparent modulus of elasticity of individual pavement layers (also known as "backcalculation"), or an equivalent thickness of a reference material. Either the effective modulus of elasticity or equivalent thickness may be used for mechanistic pavement evaluation and overlay design.

5. Apparatus

5.1 The apparatus used in this guide shall be one of the deflection measuring devices given in 5.2 and shall consist of some type of probe or surface contact sensor to measure normal pavement movements when subjected to a given load type.

5.2 Deflection Measuring Devices:

5.2.1 *Noncontinuous Static Device*,³ that operates on a single lever-arm principle. This device should have a minimum 2.5 m (8 ft) long probe and the extension of the probe should depress a dial gage or electronic sensor that measures maximum pavement deflection with a resolution of 0.025 mm (0.001 in.) or better. The vehicle used with the static deflection device should be a truck carrying an 80 kN (18 000 lb) test load on a single rear axle. The rear axle should have dual 280 by 570

³ An example of this instrument is the Soiltest Benkelman Beam, manufactured by Soiltest Inc., Materials Testing Div., 2205 Lee St., Evanston, IL 60202.

mm (11.0 by 22.5 in.) 12-ply tires inflated to 480 kPa (70 psi). Other axle loads, tire sizes, and inflation pressures are permissible; however, the loading configuration must be indicated in the engineering report, for example as outlined in AASHTO Standard T256.

5.2.2 Semicontinuous Static Device,⁴ that operates on a double lever-arm principle. The vehicle operating this device should be a truck carrying a 130 kN (29 000 lb) single-axle test load. It should have dual 280 by 570 mm (11.0 by 22.5 in.) 12-ply tires inflated to 480 kPa (70 psi). Other axle loads, tire sizes and inflation pressures are permissible, however, the loading configuration should be indicated in the engineering report. The test vehicle should be equipped with a double lever arm with probes, the geometry and size of which makes it possible to measure the maximum pavement deflection in both wheel paths with a resolution of 0.025 mm (0.001 in.) or better. The extension of each lever arm holding the probe should depress an electronic sensor, which may be of any type provided it delivers an analog or digital signal correlated with the movement of this extension, and therefore with the deflection of the pavement surface under the effect of the moving test load. The truck should be able to lift and move the probes from one measurement point to the next, lower them onto the pavement surface, and make another set of measurements in a fully automated process, and at constant vehicle speed.

5.2.3 Steady State Dynamic Device,⁵ that uses a dynamic force generator to produce an oscillatory load. The force generator should either use counter-rotating masses or a servo-controlled hydraulic actuator to produce the peak-to-peak load. It should measure pavement deflections using four or more sensors with a resolution of 0.001 mm (0.00004 in.) or better, and should be capable of producing a 4.5 kN (1000 lb) peak-to-peak load or greater.

5.2.4 Impulse Device,⁶ that creates an impulse load on the pavement by dropping a mass from different heights onto a rubber or spring buffer system. It should measure pavement deflections using five or more sensors with a resolution of 0.001 mm (0.00004 in.) or better, and should be capable of producing a 40 kN (9000 lb) load or greater.

6. Calibration of Deflection Measuring Devices

6.1 Load—The procedure for calibrating the load cell (if a load cell is used by the device) is dependent upon the type of apparatus used. Regardless of the apparatus used, the load cell calibration should be checked at least once per month during continuous operation. Whenever the device is used on an intermittent basis, the load cell calibration should be checked before testing begins. For impulse devices, reference load cell calibration should be carried out at least once per year, for example as outlined in Appendix A of SHRP Report SHRP-P-

661.⁷ Steady state dynamic devices equipped with load cells may be calibrated by measuring the load cell output under known static loading conditions, such as the load of the device itself. Load cells should be calibrated at least once per year following the manufacturer's instructions. For noncontinuous and semicontinuous static deflection equipment, immediately prior to testing weigh the axle load of the truck if the ballast consists of a material that can absorb moisture (sand, etc). Trucks with steel or concrete block loads only need to be weighed if the loads are changed.

6.2 Deflection—The procedure for calibrating the deflection sensors is dependent upon the type of apparatus used. Regardless of the apparatus used, the calibration of the deflection sensors should be checked at least once per month of continuous daily operation. Reference deflection sensor calibration should be carried out in accordance with the manufacturer's recommendations or any other applicable procedures. Whenever the device is used on an intermittent basis, the deflection sensor calibration should be checked before testing begins. If the device has more than one sensor, a relative calibration check may be conducted by stacking the sensors in a column that measures the deflection at a single point, for example as outlined in Appendix A of SHRP Report SHRP-P-661.⁷ Also, a standard test area may be used to check the calibration of the sensors. This consists of establishing a reference test point, such as at the interior of a known slab. Static devices should be calibrated daily with feeler gages. When performing deflection sensor calibration, induced deflections should be similar in magnitude to the deflections encountered during normal testing.

7. Testing Procedures

7.1 General—The procedure to be followed is dependent upon which type of apparatus is used. The following general information is suggested as the minimum data that needs to be collected, regardless of the type of device used:

7.1.1 Load—For impulse load devices, record the peak load applied to the pavement surface by the deflection device. For steady state devices, record the peak-to-peak load. For transient (static) devices, record the axle load of the test vehicle.

7.1.2 Load Frequency—If applicable, record the frequency of oscillatory loading for those devices such as a Road Rater. The Dynaflect frequency is set by the manufacturer, generally at 8 Hz.

7.1.3 Geometry of Loaded Area and Deflection Sensor Locations—For proper modeling of the pavement structure and backcalculation, etc, it is necessary that the locations of the load, deflection sensors, pavement surface cracks, and PCC joints are known and recorded. Record the location of the nearest joint or crack, in any direction from the center of the load. Record the location and orientation of all sensors as measured radially outward from the center of the load, for example "300 mm (12 in.) ahead of the applied load". In accordance with the selected method of evaluating joint efficiency (or load transfer), the load(s) and deflection sensor(s)

⁴ An example of this instrument is the Lacroix Deflectograph.

⁵ Examples of this instrument are the Geolog Dynaflect and the Foundation Mechanics Road Rater, manufactured by Geolog Inc., 103 Industrial Blvd., Granbury, TX and Foundation Mechanics Inc., 421 E. El Segundo Blvd., El Segundo, CA 90245.

⁶ Examples of this instrument are the Dynatest Falling Weight Deflectometer (FWD), the KUAB 2m-FWD, The Phonix FWD, and the Jils FWD.

⁷ Report SHRP-P-661-Manual for FWD Testing in the Long-Term Pavement Performance Study.

should be properly positioned, for example with one or more sensors on each side of the joint and the load placed as close as possible to the "leave" (downstream) side of the joint in question. Failure to note the presence of joints and cracks within the zone of influence of the load could result in errors in estimating layer moduli through backcalculation, etc.

7.1.4 Time of Test—Record the date and time the measurements were obtained.

7.1.5 Air and Pavement Temperatures—At a minimum, record the pavement surface temperature at each test location to provide data for estimating the average temperature of the bound pavement layer(s). If needed for the analyses, the ambient air temperatures should also be recorded. In lieu of the ambient air temperature, some procedures use the five-day mean air temperature, that is, the sum of the high and low air temperatures for the five days immediately preceding testing, divided by ten to estimate the weighted average or mid-depth temperature of the bound layer(s). If feasible, pavement layer temperatures may be more accurately determined by drilling holes to various depths within the pavement layer(s), filling the bottom of these holes with glycerin or any other suitable liquid, and recording the temperature of the fluid at the desired depth. If testing is done for an extended period of time, take temperature measurements of the fluid every 1 to 2 h to establish a direct correlation between air, pavement surface, and depth temperature measurements. Often, temperature gradients may exist within PCC slabs that can cause curling or warping of the slabs, and thereby significantly affect the measured deflections. In these cases it may be necessary to monitor the temperatures within the slab (for example, with thermocouples), at the surface, mid-depth and bottom of a control slab.

7.2 Test Method—Depending on the type of apparatus, there are a number of test methods that can be applied. Steady state devices capable of variable loads and frequencies can be used to conduct "load sweeps" (multiple tests at various loads, at the same test location and frequency) or "frequency sweeps" (multiple tests at various frequencies, at the same test location and load). Impulse devices are typically capable of applying various loads, and some can control the shape and duration of the load pulse. Joint efficiency measurements on jointed PCC pavements can be made with devices equipped with multiple sensors by placing the load plate on one side of the joint and positioning sensors on both sides of the joint (see also 7.1.3).

7.3 Testing Locations—The test location and number of tests are dependent upon the testing level selected. Three suggested levels of testing are as follows:

7.3.1 Level 1—This test level provides for a general (for example, network) overview of pavement condition with limited testing. Testing should be performed at 200 to 500 m

(500 to 1500 ft) intervals, depending on specific pavement conditions, but a minimum of 5 to 10 tests per uniform pavement section are recommended to ensure a statistically significant sample. For AC and CRCP pavements, as a minimum, the load should be positioned along the outer wheel path, or alternatively along the centerline of CRCP slabs. For jointed PCC pavements, the load should first be positioned at or near the geometric center of the slab. For Level I testing, at least 5 % of the slabs covered should be tested at the joints as well, for deflection or load transfer efficiency.

7.3.2 Level 2—This test level provides for a more detailed analysis of the pavement, for example, for the purpose of overlay or rehabilitation design. Testing should be performed at 25 to 200 m (100 to 500 ft) intervals, depending on specific pavement conditions, with a minimum coverage of 10 to 20 tests recommended per uniform pavement section. For AC and CRCP pavements, as a minimum the load should be positioned along the outer wheel path, or alternatively along the centerline of CRCP slabs. For jointed PCC pavements, the load should first be positioned at or near the geometric center of the slab and then moved to the nearest joint and positioned along the same line, generally on the leave side of the joint. On roads, streets and highways, joint tests are often conducted along the outer wheel path. Generally, not every joint associated with each interior slab test is covered; however, a minimum joint coverage rate of 25 % is recommended. On airfield PCC pavements, joint efficiency measurements may be carried out on both transverse and longitudinal joints.

7.3.3 Level 3—This test level provides for a highly detailed or specific analysis of the pavement for purposes such as identifying localized areas of high deflection or detecting subsurface voids on PCC pavements. For AC or CRCP pavements, testing should be performed at 3 to 25 m (10 to 100 ft) intervals, along one or more test lines. On roads, streets and highways, testing is often carried out in both wheel paths. For jointed PCC pavements, the load should first be positioned at or near the geometric center of every slab along the length of the test section, and then moved to the nearest joint or crack on each slab, either along the outer wheel path or at the corner of the slab, or both. On airfield PCC pavements, joint efficiency measurements should be carried out on both transverse and longitudinal joints.

8. Keywords

8.1 Benkelman beam; deflection surveys; deflection testing; deflectograph; falling-weight deflectometer (FWD); heavy-weight deflectometer (HWD); impulse deflection testing device; load/deflection testing; nondestructive testing (NDT); pavement deflection; pavement testing; static deflection testing device; steady-state dynamic deflection testing device

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

ANEXO 3

DEPARTAMENTO: LA LIBERTAD

Septiembre de 2006

MEDICIÓN DE DEFLEXIONES F.W.D.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA MEDICIÓN

- * **EQUIPO: DYNATEST F.W.D.**
- * **RADIO DEL PLATO DE CARGA: 15 cm.**
- * **CONFIGURACIÓN PLATO DE CARGA: 9.000 lbs. (4.086 Kgf.)**
- * **DISTANCIA DE SENSORES [cm.]: 0 - 30 - 60 - 90 - 120 - 150 - 180**

REFERENCIAS

- R Pavimento Rígido**
- F Pavimento Flexible**

road	dn	dir	Tramo	startkm	endkm	CCI	RCI	PSI	IRI	OPI	length	lane	lanewidth	MDR	AvgRut
CA	08	W	CA01W - Dv Jayaque	23	28	34	100	3.79	1889	26	5	7	3.5	27	0.42
CA	08	W	CA01W - Dv Jayaque	28	31	36	100	4.1	1531	29	3	7	3.5	30	0.49
CA	08	W	Dv Jayaque - Dv Sacacoyo +	31	33.354	39	100	4.24	1398	41	2.35	7	3.5	42	0.96
CA	08	W	Dv Sacacoyo - LD Sonsonate	33.354	34.525	48	100	4.5	1164	46	1.17	7	3.5	47	0.26
CA	08	W	LD La Libertad - Dv Armenia	34.525	39.125	74	100	4.21	1430	71	4.6	7	3.5	74	0.92
CA	08	W	Dv Armenia - Dv Cerro Verde	39.125	45.08	90	100	4.04	1592	86	5.96	7	3.5	90	0.69
CA	08	W	Dv Cerro Verde - Dv San Julián	45.08	49.325	83	100	4.4	1258	81	4.24	7	3.5	83	0.74
CA	08	W	Dv San Julián - Dv Atecozol	49.325	54.575	51	100	4.2	1437	48	5.25	7	3.5	49	0.88
CA	08	W	Dv San Julián - Dv Atecozol	54.575	57.575	46	100	4.42	1239	42	3	7	3.5	43	1.27
CA	08	W	Dv Atecozol - Dv Izalco +	57.575	59.075	70	100	4.16	1467	64	1.5	7	3.5	66	1.28
CA	08	W	Dv Izalco - Dv Sonsonate	59.075	62.825	71	100	3.33	2591	64	3.75	7	3.53	70	1.1

road	dn	dir	Tramo	startkm	endkm	CCI	RCI	PSI	IRI	OPI	length	lane	lanewidth	MDR	AvgRut
CA	08	W	Dv Sonzacate - Dv Izalco	61	59	95	100	4.22	1418	91	2	8	3.5	94	0.91
CA	08	W	Dv Izalco - Dv Atecozol	59	57.575	100	100	4.04	1578	94	1.42	8	3.5	98	0.73
CA	08	W	Dv Atecozol - Dv San Julián	57.575	49.325	99	100	4.29	1379	95	8.25	8	3.5	98	1.4
CA	08	W	Dv San Julián - Dv Cerro Verde	49.325	45.08	97	100	4.24	1392	94	4.24	8	3.5	97	1.72
CA	08	W	Dv Cerro Verde - Dv Armenia	45.08	39.83	98	100	3.73	1953	92	5.25	8	3.5	98	1.37
CA	08	W	Dv Cerro Verde - Dv Armenia	39.83	39.125	73	100	3.9	1718	64	0.7	8	3.5	68	0.7
CA	08	W	Dv Armenia - LD La Libertad	39.125	34.527	71	100	4.37	1283	65	4.6	8	3.5	66	0.72
CA	08	W	LD Sonsonate - Dv Sacacoyo	34.527	33.354	67	100	4.3	1340	60	1.17	8	3.5	62	0.6
CA	08	W	Dv Sacacoyo - Dv Jayaque	33.354	31	51	100	4.17	1461	47	2.35	8	3.5	48	0.41
CA	08	W	Dv Jayaque - CA01W	31	26	53	100	4.15	1479	50	5	8	3.5	51	0.97
CA	08	W	Dv Jayaque - CA01W	26	23	63	100	3.99	1647	57	3	8	3.5	59	0.83

MEDICIÓN DE DEFLEXIONES F.W.D.

Kilómetro	Tipo Sup	Carril	Carga	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Aire	Sup Pav	Mid-depth	Asf	B. Gra	K (static)	Mr psi	EP psi	SN	Notas
34,53	F	7	40,79	302	221	145	115	88	60	59	34	45	39	100	350		13370	234290	4,91	
34,78	F	7	40,29	256	177	120	74	55	43	40	34	45	39	100	350		19479	219135	4,81	
35,03	F	7	41,49	338	248	157	104	73	59	49	34	45	39	100	350		16374	159919	4,33	
35,28	F	7	41,28	250	185	119	81	59	50	42	34	45	39	100	350		19007	246020	5,00	
35,53	F	7	40,43	264	182	117	99	71	59	54	34	45	39	100	350		14479	279083	5,21	
35,78	F	7	41,07	268	182	124	91	63	58	49	34	45	39	100	350		16209	248186	5,01	
36,03	F	7	40,08	262	192	120	87	66	56	46	34	45	39	100	350		16850	237907	4,94	
36,28	F	7	39,80	338	224	146	99	69	56	47	34	45	39	100	350		16376	148056	4,22	
36,53	F	7	41,21	324	239	145	101	74	58	49	34	45	39	100	350		16264	171969	4,43	
36,78	F	7	40,64	395	291	194	125	84	64	51	34	45	39	100	350		15410	121757	3,95	
37,03	F	7	40,01	535	370	219	134	94	72	58	34	45	39	100	350		13340	77668	3,40	
37,28	F	7	40,15	449	314	208	133	91	66	49	34	45	39	100	350		15846	93301	3,62	
37,53	F	7	41,07	574	370	212	126	90	71	59	34	45	39	100	350		13461	71640	3,31	
37,78	F	7	40,36	208	122	92	62	51	46	41	34	45	39	100	350		19036	339789	5,56	
38,03	F	7	40,57	298	214	141	105	75	63	51	34	45	39	100	350		15383	206496	4,71	
38,28	F	7	41,21	216	153	100	68	53	44	35	34	45	39	100	350		22770	274710	5,18	
38,53	F	7	40,08	458	281	152	81	46	31	24	34	45	39	100	350		32295	61365	3,14	
38,78	F	7	41,49	280	216	146	109	80	62	48	34	45	39	100	350		16716	225121	4,85	
39,03	F	7	41,00	268	141	80	48	29	21	15	34	45	39	100	350		52858	110259	3,82	
39,13	F	7	41,07	212	141	94	71	49	39	30	34	45	39	100	350		26474	247212	5,00	
39,38	F	7	39,44	335	237	157	111	82	57	45	34	45	39	100	350		16949	143849	4,18	
39,63	F	7	40,22	313	227	160	111	78	66	50	34	45	39	100	350		15556	182587	4,52	
39,88	F	7	40,15	253	177	121	87	64	52	42	34	45	39	100	350		18487	233773	4,91	
40,13	F	7	40,29	308	190	109	75	46	39	28	34	45	39	100	350		27827	121025	3,94	
40,38	F	7	40,72	314	221	149	103	75	55	46	34	45	39	100	350		17119	170490	4,42	
40,63	F	7	39,73	442	260	156	102	73	57	48	34	45	39	100	350		16007	93465	3,62	
40,88	F	7	39,87	454	294	184	113	77	63	50	34	45	39	100	350		15420	92223	3,60	
41,13	F	7	38,88	811	515	258	146	94	68	60	34	45	39	100	350		12531	39446	2,71	
41,38	F	7	40,57	340	206	103	57	39	31	25	34	45	39	100	350		31382	97863	3,67	
41,63	F	7	40,29	443	272	152	100	67	54	44	34	45	39	100	350		17708	89010	3,56	
41,88	F	7	40,36	309	226	158	111	80	58	45	34	45	39	100	350		17344	170835	4,42	
42,13	F	7	39,80	305	217	134	84	58	44	37	34	45	39	100	350		20802	147115	4,21	
42,38	F	7	39,80	445	350	261	191	136	105	85	34	45	39	100	350		9055	151512	4,25	
42,63	F	7	40,50	278	179	119	89	61	46	37	34	45	39	100	350		21168	176666	4,47	
42,88	F	7	40,72	269	178	109	73	50	39	34	34	45	39	100	350		23161	176153	4,47	
43,13	F	7	40,50	423	322	222	156	108	78	58	34	45	39	100	350		13504	118983	3,92	
43,38	F	7	40,29	465	336	212	134	91	68	57	34	45	39	100	350		13669	98462	3,68	
43,63	F	7	39,16	232	153	108	80	53	39	31	34	45	39	100	350		24429	205350	4,70	
43,88	F	7	41,14	154	103	65	45	32	25	20	34	45	39	100	350		39779	317615	5,44	
44,13	F	7	40,79	307	216	141	99	71	56	45	34	45	39	100	350		17529	174763	4,46	
44,38	F	7	40,64	415	289	193	125	92	65	63	34	45	39	100	350		12475	132850	4,07	
44,63	F	7	40,93	332	225	140	95	65	50	40	34	45	39	100	350		19788	138267	4,12	
44,88	F	7	40,29	486	374	258	170	116	81	60	34	45	39	100	350		12986	94725	3,63	
45,08	F	7	40,72	293	226	160	113	84	64	49	34	45	39	100	350		16071	206166	4,71	
45,33	F	7	40,01	214	143	91	61	45	34	28	34	45	39	100	350		27633	223617	4,84	

¹ K Estático extrapolado ² K Estático inexistente en abacos

DEPARTAMENTO: SONSONATE

CODIGO: CA08W

Calzada: Ascendente

Septiembre de 2006

MEDICIÓN DE DEFLEXIONES F.W.D.

Kilómetro	Tipo Sup	Carril	W Carga	F D1	F D2	F D3	F D4	F D5	F D6	F D7	ε Aire	ε Sup Pav	ε Mid-depth	mm Asf	mm B. Gra	P K (static)	P Mir	EP psi	SN	Notas
45,58	F	7	40,72	214	141	94	66	53	41	34	34	45	39	100	350		23161	269021	5,15	
45,83	F	7	41,21	226	156	116	77	59	49	42	34	45	39	100	350		18975	300259	5,34	
46,08	F	7	42,48	335	227	135	90	69	50	40	34	45	39	100	350		20537	141256	4,15	
46,33	F	7	40,43	555	377	219	125	69	41	21	34	45	39	100	350		37231	45428	2,84	
46,58	F	7	40,36	611	385	195	115	86	69	57	34	45	39	100	350		13693	62102	3,16	
46,83	F	7	40,57	340	217	120	75	54	43	37	34	45	39	100	350		21204	124254	3,98	
47,08	F	7	41,14	467	326	187	108	71	54	46	34	45	39	100	350		17295	85749	3,52	
47,33	F	7	40,15	418	270	159	94	53	34	26	34	45	39	100	350		29863	72549	3,33	
47,58	F	7	41,21	466	333	202	126	82	53	38	34	45	39	100	350		20972	76735	3,39	
47,83	F	7	39,73	380	265	162	101	64	41	35	34	45	39	100	350		21952	97514	3,67	
48,08	F	7	40,29	303	201	119	67	45	34	28	34	45	39	100	350		27827	124273	3,98	
48,33	F	7	40,36	311	167	72	36	22	15	12	34	45	39	100	350		65041	81437	3,46	
48,58	F	7	40,43	334	229	120	86	57	51	44	34	45	39	100	350		17769	145577	4,19	
48,83	F	7	40,86	303	196	121	75	54	43	39	34	45	39	100	350		20261	159191	4,32	
49,08	F	7	41,49	193	99	52	33	27	19	10	34	45	39	100	350		80235	150058	4,24	
49,33	F	7	40,64	257	147	80	47	30	25	19	34	45	39	100	350		41364	130062	4,04	
49,58	F	7	41,21	305	189	107	66	42	31	23	34	45	39	100	350		34649	112304	3,85	
49,83	F	7	41,14	361	230	132	68	37	20	10	34	45	39	100	350		79558	65044	3,21	
50,08	F	7	40,36	338	217	129	74	43	30	28	34	45	39	100	350		27875	104546	3,76	
50,33	F	7	40,64	437	197	82	47	27	20	14	34	45	39	100	350		56137	55176	3,04	
50,58	F	7	39,51	334	195	110	65	41	35	30	34	45	39	100	350		25469	108640	3,80	
50,83	F	7	40,86	280	181	113	96	73	62	52	34	45	39	100	350		15195	240126	4,96	
51,08	F	7	40,64	392	252	135	82	50	44	39	34	45	39	100	350		20152	101576	3,72	
51,33	F	7	41,42	446	288	159	96	64	47	36	34	45	39	100	350		22250	80122	3,44	
51,58	F	7	41,07	528	352	228	142	97	77	62	34	45	39	100	350		12810	85573	3,51	
51,83	F	7	40,15	349	238	150	106	79	67	55	34	45	39	100	350		14117	161440	4,34	
52,08	F	7	41,99	285	178	93	58	35	26	21	34	45	39	100	350		38668	120968	3,94	
52,33	F	7	42,27	183	107	65	39	21	16	13	34	45	39	100	350		62879	186092	4,55	
52,58	F	7	40,15	349	245	144	89	60	40	30	34	45	39	100	350		25881	102911	3,74	
52,83	F	7	41,00	258	177	102	57	34	20	14	34	45	39	100	350		56634	113047	3,85	
53,08	F	7	41,35	215	157	103	72	56	44	35	34	45	39	100	350		22847	278130	5,20	
53,33	F	7	41,07	290	183	106	63	39	29	20	34	45	39	100	350		39711	112404	3,85	
53,58	F	7	40,64	395	255	147	91	56	33	23	34	45	39	100	350		34170	75433	3,37	
53,83	F	7	40,22	348	215	116	59	32	18	14	34	45	39	100	350		55556	73526	3,34	
54,08	F	7	40,64	341	241	149	87	51	39	28	34	45	39	100	350		28068	103820	3,75	
54,33	F	7	40,36	296	219	151	113	90	78	68	34	45	39	100	350		11478	283338	5,24	
54,58	F	7	40,64	302	194	113	80	61	55	50	34	45	39	100	350		15718	197729	4,64	
54,83	F	7	41,00	420	262	142	77	48	32	24	34	45	39	100	350		33036	70986	3,30	
55,08	F	7	40,86	435	309	176	109	75	62	54	34	45	39	100	350		14633	107784	3,79	
55,33	F	7	40,29	325	230	147	108	83	67	59	34	45	39	100	350		13206	199331	4,66	
55,58	F	7	40,36	380	250	135	77	49	40	29	34	45	39	100	350		26914	88847	3,56	
55,83	F	7	41,00	220	140	82	53	40	30	27	34	45	39	100	350		29366	211975	4,75	
56,08	F	7	40,29	362	243	144	90	65	53	46	34	45	39	100	350		16938	130061	4,04	
56,33	F	7	41,35	479	336	194	123	88	68	59	34	45	39	100	350		13553	98463	3,68	
56,58	F	7	40,64	307	201	117	80	56	41	31	34	45	39	100	350		25352	130978	4,05	

¹ K Estático extrapolado ² K Estático inexistente en abacos

ANEXO 4

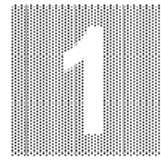
**ESTUDIOS DE EVALUACION
ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS
BASADOS EN LA INTERPRETACION
DE CURVAS DE DEFLEXIONES (ENSAYOS
NO DESTRUCTIVOS)**

Por

MARIO S. HOFFMAN, Ph.D.
Louis Berger Internacional Inc.

PABLO M. DEL AGUILA, B.Sc.
LAGESA Ingenieros Consultores

Octubre, 1985



INTRODUCCION

1.1 GENERALIDADES

La evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad portante del sistema pavimento-subrasante en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil o cuando el pavimento va a cambiar su función (un nuevo tipo de avión en un aeropuerto existente, por ejemplo). Las necesidades de evaluar estructuralmente los pavimentos de una red aumentan a medida que se completa el diseño y la construcción de una red vial nacional o regional y consecuentemente aumenta la necesidad de su preservación y rehabilitación.

Ante un problema de evaluación estructural, el Ingeniero Vial tradicionalmente ha recurrido a la perforación de calicatas, a la toma de muestras para su ensayo en el laboratorio, y al análisis de cada uno de sus componentes (materiales) por separado, para incorporarlos luego en el sistema (pavimento) y deducir acerca de las características estructurales del mismo. Esta metodología es cara, lenta, altera el equilibrio del sistema al perforar y es "destructiva".

La alternativa presentada en este estudio es "no destructiva" y se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento. Las deflexiones en la superficie de un pavimento reflejan una respuesta global del sistema pavimento-subrasante bajo una carga dada. Su medición es simple, rápida, económica y "no destructiva", es decir, no se alteran el equilibrio ni la integridad del sistema.

La metodología no destructiva se fundamenta en que la forma y dimensión de la

curva de deflexiones encierran una valiosa información acerca de las características estructurales del pavimento y su subrasante. Para interpretar esta información en forma cuantitativa, se compara al pavimento-subrasante reales con un modelo matemático utilizando las deflexiones medidas para determinar los parámetros estructurales del sistema. Una vez determinados, estos parámetros estructurales, puede usarse como insumo para establecer las necesidades de refuerzo. Podría decirse entonces que la metodología de evaluación estructural, por métodos no destructivos, es un proceso de diseño inverso ya que utiliza la respuesta del sistema para establecer sus características estructurales, lo cual es generalmente opuesto a un proceso de diseño.

Otra característica de la metodología de evaluación no destructiva, es que por constituir la "muestra de ensayo" el pavimento mismo, esta representa el fiel reflejo de la compleja interacción entre sus componentes (capas de materiales y subrasante), y además esta "muestra" puede ser ensayada en cualquier momento de su vida sin disturbarla ni destruirla.

El desarrollo de soluciones para modelos matemáticos de pavimentos, la simpleza, rapidez y economía de las mediciones de deflexiones y, el carácter no-destructivo de los ensayos, han contribuido al auge de las metodologías de evaluación estructural de pavimentos en los últimos 20 años.

1.2 OBJETIVOS

Este informe presenta una metodología simple para la evaluación estructural de pavimentos basada en la interpretación de curvas de deflexiones, la cual es ilustrada con datos obtenidos durante la Supervisión de la Carretera Talara-Cancas.

Esta metodología fue desarrollada e implementada en numerosos proyectos en diversos países por Louis Berger International, Inc.

Este informe presenta toda la información necesaria para medir, procesar, analizar e interpretar los resultados obtenidos de la metodología de evaluación estructural. Se incluyen, además, numerosos ejemplos de verificación y análisis de sensibilidad de las soluciones obtenidas que permiten apreciar el potencial y la utilidad de las metodologías propuestas.

1.3 METODOLOGIA

Para medir las deflexiones en la superficie del pavimento se ha utilizado una "Viga Benkelman" bajo la carga de un eje posterior del orden de las 18 kilolibras y presión de inflado de 75 a 85 psi. La Viga Benkelman, que funciona como una palanca que rota alrededor de un eje fijo, fue usada para medir las deflexiones a varias distancias del eje de la carga (curva de deflexiones).

El modelo conocido como el "**Modelo de Hogg**" constituye la base matemática de la metodología. En este modelo, las capas del pavimento están caracterizadas por una placa de espesor delgado y una cierta rigidez a la flexión. La subrasante está representada por un medio elástico, lineal, homogéneo e isotrópico.

La metodología consiste, básicamente, en comparar las curvas de deflexiones medidas, con las curvas de deflexiones teóricas, obtenidas "cargando" el modelo de Hogg con la misma configuración y magnitud de carga utilizada en los ensayos de campo. La concordancia entre una curva experimental con algunas de las teóricas corresponde generalmente a una única combinación de parámetros elásticos del modelo, que de esa manera pasan a caracterizar al pavimento evaluado. La metodología se complementa con otros conceptos de la teoría de capas elásticas y con observaciones experimentales para determinar ciertas propiedades de ingeniería de los materiales que pueden usarse para establecer las necesidades de refuerzo.

El procesamiento de los datos puede hacerse en forma manual, usando los gráficos y ecuaciones presentados en este informe, o automáticamente por medio de una computadora personal de tipo CASIO PB100, SHARP 1500 ó similar con una capacidad mínima de 4 Kbytes RAM (Ver Programa en Basic, en el Apéndice A de este informe).

1.4 ALCANCES Y ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El capítulo 2 de este informe detalla la metodología de evaluación estructural. En primer lugar, este capítulo presenta los modelos matemáticos de pavimentos utilizados y la metodología y el equipo usados para la medición de deflexiones. Seguidamente, este capítulo presenta los métodos de análisis y discute los parámetros de evaluación y su significado.

El Capítulo 3 presenta los diferentes programas de ensayos y sus resultados. Estos programas, desarrollados en diferentes fases de la construcción de la Carretera Talara-Cancas, abarcan:

- a) El diseño del pavimento en los tramos III y IV, entre Talara y Los Organos, en una longitud aproximada de 60 kms.
- b) El mejoramiento de la subrasante en zonas de dunas del Tramo I.
- c) El estudio de la influencia de la carpeta asfáltica en las deflexiones y los parámetros del pavimento (Tramo I).
- d) Estudios especiales del efecto de la carga y la temperatura en las deflexiones y los parámetros del pavimento.

Este capítulo discute, además, la sensibilidad de las soluciones y presenta

criterios y métodos para la verificación de los resultados.

El Capítulo 4 de este informe se ocupa del resumen y las conclusiones emanadas de estos estudios.

El Apéndice A presenta el programa de computadora para el análisis de deflexiones, y los apéndices B a E presentan datos recopilados en los diferentes programas.

2

METODOLOGIA

2.1 ALCANCES

Este capítulo presenta la metodología de medición, análisis e interpretación de las deflexiones para la evaluación estructural de pavimentos. La primera parte del capítulo describe los modelos matemáticos para pavimentos en que se sustenta la metodología propuesta; seguidamente se explican en forma detallada los métodos y procedimientos para la medición de deflexiones con el deflectómetro conocido como "Viga Benkelman", haciendo hincapié en la medición de las "curvas de deflexiones" que es un procedimiento singular de la metodología propuesta.

A continuación, el capítulo presenta los métodos para el análisis de las deflexiones; estos métodos de análisis son simplificaciones y aproximaciones matemáticas de las soluciones rigurosas del Modelo de Hogg y otros conceptos de la teoría de elasticidad y resistencia de materiales, que permiten el procesamiento rápido y simple de los datos en forma manual o por computadora personal para obtener los parámetros de evaluación. Estos parámetros de evaluación están presentados, y su significado discutido, al final de este capítulo.

2.2 MODELOS MATEMATICOS PARA PAVIMENTOS

2.2.1 Generalidades

Un aspecto gravitante en las metodologías de evaluación de pavimentos es el concerniente a los modelos teóricos usados para representar a la estructura real y su funcionamiento. De cuan adecuados sean éstos para reproducir, en forma satisfactoria, la compleja realidad de un pavimento y de la posibilidad de representarlos matemáticamente, a fin de implementar soluciones que brinden resultados de uso directo, depende el potencial de posibilidades prácticas que puede brindar una metodología.

Los intentos de representar, mediante modelos teóricos, sistemas de pavimentos flexibles datan de no hace más de 50 años, cuando **Burmister** desarrolla su teoría para modelos de capas elásticas basándose en los conceptos desarrollados por **Boussinesq** en 1885. Desde entonces, y con el advenimiento y uso de las computadoras, un avance sustancial se ha producido en los últimos años, habiéndose desarrollado una variedad de alternativas que van desde esquemas de capas elásticas lineales y no lineales, hasta modelos viscoelásticos ó dinámicos, diseñados en un constante afán de lograr simulaciones cada vez más compatibles con la realidad.

Tales refinamientos permiten acercamientos teóricos para el análisis cualitativo de los fenómenos involucrados en el complejo comportamiento de un pavimento, pero para efectos de evaluación estructural, donde priman resultados tangibles, su uso práctico a nivel de Ingeniero de Campo, es totalmente limitado.

Un modelo adecuado y suficiente para usos de evaluación estructural de pavimentos debe cumplir con los siguientes requisitos:

- a) El modelo tiene que ser lo suficientemente simple como para ser usado por el Ingeniero de Campo sin problemas de interpretación y/o implementación.
- b) Las propiedades de los materiales usados en la caracterización del modelo deben poder evaluarse en el laboratorio o correlacionarse con las

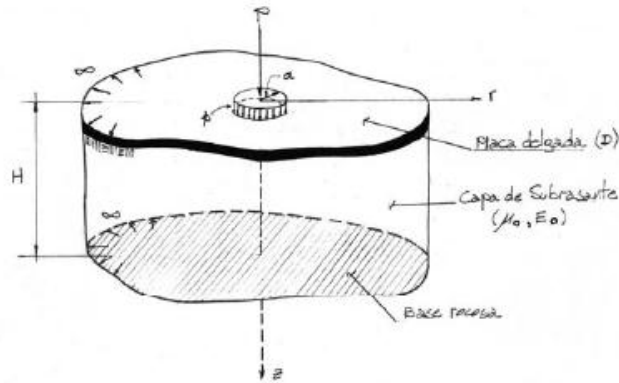
características más comunes definidas por la ingeniería vial.

- c) Las propiedades del pavimento existente, evaluadas mediante el modelo, deben ser tales que puedan usarse directamente en el "rediseño" del pavimento (diseño del refuerzo, evaluación de la vida útil, etc.)
- d) El número de variables usadas en la definición del modelo debe ser lo suficientemente bajo que garantice la existencia de una solución única para cada caso estudiado.

Como ya fue mencionado, el método de evaluación propuesto está basado en la interpretación de curvas de deflexiones reemplazando la estructura real con un modelo teórico. Para tal fin se hace uso del Modelo de Hogg, el cual cumple con los requisitos mencionados constituyéndose de esa manera en base del esquema de análisis.

2.2.2 El Modelo de Hogg

En el año 1944, A.H.A. Hogg presentó la solución matemática del modelo que se conoce por su nombre. Este modelo representa al pavimento como una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, sustentada por una capa elástica homogénea e isotrópica, de espesor que puede ser infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa. La figura 2.1 describe la geometría y los parámetros del modelo de Hogg.



PARAMETROS BASICOS DEL MODELO	$D = \frac{E_1 t^3}{12(1-\mu_1^2)}$ (t-m)	Rigidez a la flexión de la placa
	$l_0 = \left(\frac{D(1+\mu_0)(3-4\mu_0)^{1/3}}{2(1-\mu_0)E\theta} \right)$ (cm)	Longitud característica
	$E\theta$ (Kg/cm ²)	Módulo de elasticidad de la Subrasante
	μ_0 (Adimensional)	Módulo de Poisson de la Subrasante
	H (cm)	Profundidad del estrato rocoso.
Parámetros de Evaluación	$l_0, E\theta, D$	Se obtienen conociendo dos valores de deflexiones medidas.

FIGURA 2.1 : Esquema y Parámetros del Modelo de Hogg

2.2.3 Deflexiones en el Modelo de Hogg

La expresión matemática desarrollada para el cálculo de las deformaciones en la superficie del sistema viene dada por una integral infinita de funciones Bessel y funciones angulares hiperbólicas, la cuál, para el caso de una carga uniformemente distribuida circular de radio "a" tiene la siguiente forma:

$$\Delta_{(z=0,r)} = \left(\frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0) \cdot p \cdot a}{2(1 - \mu_0) \cdot E0} \right) \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{m \cdot r}{L_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{m \cdot a}{L_0}\right)}{m^4 + m \cdot \phi \frac{m \cdot h}{L_0}} dm \quad \dots(2.1)$$

Donde μ_0 , $E0$, p , l_0 , están definidos en la figura 2.1, "r", es la distancia horizontal en la superficie de la placa desde el eje de carga y "φ" viene dada por la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{\operatorname{sen} h m \operatorname{cosh} m + \frac{m}{3 - 4\mu_0}}{\operatorname{sen} h^2 m - \frac{m^2}{(3 - 4\mu_0)^2}} \quad \dots(2.2)$$

Siendo "m" la variable de integración.

Hoffman en 1977 presentó la solución computarizada para la ecuación (2.1), lo que permitió la confección de nomogramas y tablas para el cálculo de deformaciones teóricas, en cualquier punto de la superficie del sistema.

2.2.4 Características y Utilización del Modelo

El modelo presentado y los conceptos desarrollados en torno a él, hacen posible caracterizar los materiales del sistema pavimento-subrasante en base al análisis e interpretación de las curvas de deflexiones.

Para hacer uso del modelo de Hogg no se necesita conocer el espesor de las capas del pavimento, ya que las curvas de deflexiones de superficie teóricas, diseñadas mediante la ecuación 2.1, dependen solamente de la longitud elástica L_0 (ver figura 2.2), lo que constituye una ventaja toda vez que, la experiencia demuestra, en la gran mayoría de los pavimentos evaluados, ó se desconoce el espesor o es difícil controlar su variación.

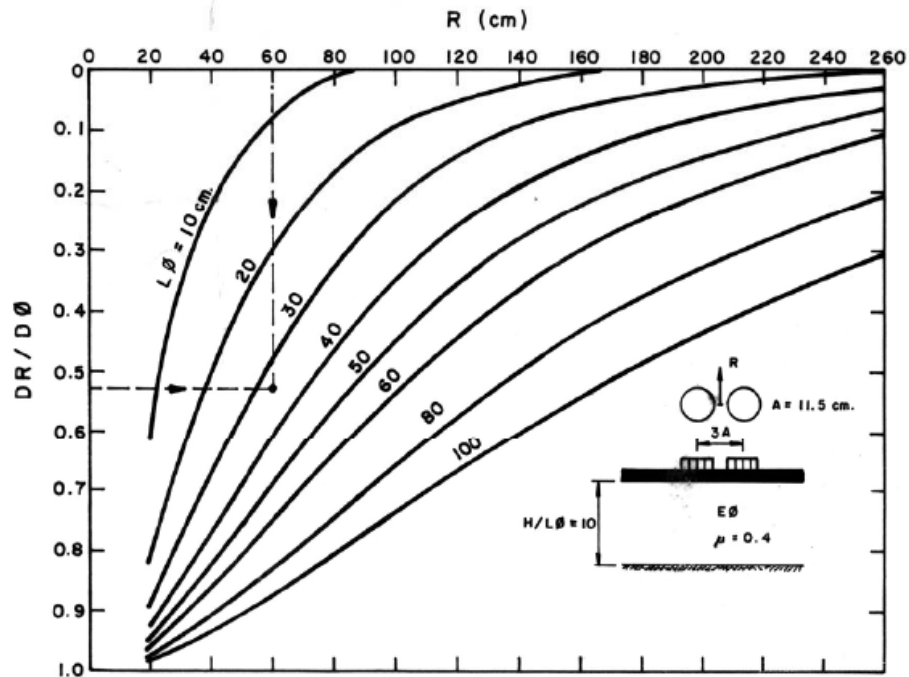


Figura 2.2 Curvas de Deflexiones en el Modelo de Hogg para la Configuración de Carga de la Viga Benkelman. (Ref. 16)

En el modelo se introduce, mediante la variable h una capa rígida a una profundidad finita. En el procedimiento de evaluación ésta representa a una capa rocosa existente o funciona como un factor de ajuste que limita la extensión horizontal de las curvas de deflexiones teóricas, que de otra manera serían infinitas, lo que se contradice con las curvas experimentales. Por otro lado, la extensión finita de las curvas de deflexiones medidas puede obedecer a una conducta no-lineal de los materiales del pavimento y subrasante y no implica necesariamente que realmente exista una capa rígida. Para la utilización del modelo se sugiere la introducción de una capa rígida a una profundidad igual a 10 veces la Longitud Elástica del pavimento ($h=L0$).

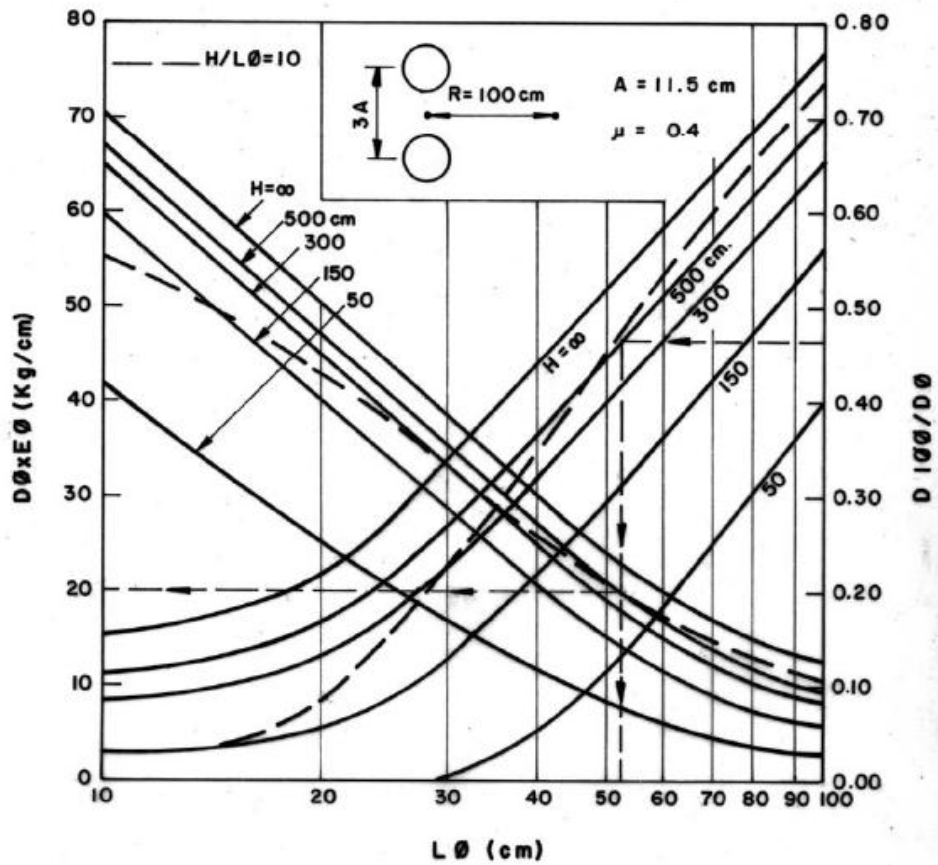


Figura 2.3 Nomograma para Evaluación Estructural basado en el Modelo de Hogg (Viga Benkelman) (Ref. 16)

Las curvas y nomogramas, como los presentados en las figuras 2.2 y 2.3, constituyen la implementación práctica del modelo para la evaluación estructural de pavimentos.

La figura 2.2 muestra las curvas de deflexiones adimensionales (DR/D_0) obtenidas con el modelo de Hogg para una carga que simula la llanta doble utilizada con la Viga Benkelman. Así, por ejemplo, si se mide un $D_0 = 60 \times 10^{-2}$ mm, y un $DR = 32 \times 10^{-2}$ mm, a una distancia R de 60 cm, se obtiene un valor $DR/D_0 = 0.53$ que corresponde a un valor $L_0 = 34$ cm.

La figura 2.3 muestra un nomograma preparado en base a las soluciones rigurosas del modelo de Hogg, para determinar el Módulo de Elasticidad de la subrasante (E_0). Este nomograma es para deflexiones medidas con la Viga Benkelman, para una carga de eje de 18 kilolibras, una huella circular de llanta de 11.5 cm, para $R=100$ cm, y para distintos espesores "h" de la profundidad de la capa rocosa. Así, por ejemplo, para $D_0=50 \times 10^{-2}$ mm. $D_{100}/D_0=0.46$ y $h=500$ cm, se obtiene $L_0=52$ cm, $D_0 E_0=20$ kg/cm y $E_0=20/D_0$, es decir, $E_0=20/0.05=400$ kg/cm².

Para facilitar el uso de las soluciones nomográficas, en la interpretación de curvas de deflexiones, se han desarrollado programas de computadoras de fácil acceso y que pueden implementarse en microcomputadoras o computadoras personales que pueden utilizarse en el campo. Estos programas contemplan desarrollos basados en el análisis numérico de los conceptos vertidos en ésta y en secciones sucesivas de este informe.

2.3 MEDICION DE DEFLEXIONES

2.3.1 Generalidades

Las deflexiones producidas en la superficie de un pavimento flexible, por acción de cargas vehiculares, pueden ser determinadas haciendo uso de deflectómetros tales como el denominado "Viga Benkelman". Llamado así en honor al Ing. A.C. Benkelman, quién la desarrollo en 1953 como parte del programa de ensayos viales de la WASHO (WASHO Road Test). Desde entonces su uso se ha difundido ampliamente en proyectos de evaluación estructural de pavimentos flexibles, tanto por su practicidad como por la naturaleza directa y objetiva de los resultados que proporciona.

2.3.2 La Viga Benkelman

El deflectómetro Benkelman funciona según el principio de la palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple. Según se esquematiza en la figura 2.4, la viga consta esencialmente de dos partes: (1) Un cuerpo de sostén que se sitúa directamente sobre el terreno mediante tres apoyos (dos delanteros fijos "A" y uno trasero regulable "B") y (2) Un brazo móvil acoplado al cuerpo fijo mediante una articulación de giro o pivote "C", uno de cuyos extremos apoya sobre el terreno (punto "D") y el otro se encuentra en contacto sensible con el vástago de un extensómetro de movimiento vertical (punto "E"). Adicionalmente el equipo posee un vibrador incorporado que al ser accionado, durante la realización de los ensayos, evita que el indicador del dial se trabe y/o que cualquier interferencia exterior afecte las lecturas, como se verá más adelante.

El extremo "D" o "punta de la viga" es de espesor tal que puede ser colocado entre una de las llantas dobles del eje trasero de un camión cargado. Por el peso aplicado se produce una deformación del pavimento, consecuencia de lo cual la punta baja una cierta cantidad, con respecto al nivel descargado de la superficie. Como efecto de dicha acción el brazo DE gira en torno al punto fijo "C", con respecto al cuerpo AB, determinando que el extremo "E" produzca un movimiento vertical en el vástago del extensómetro apoyado en él, generando así una lectura en el dial indicador. Si

se retiran luego las llantas cargadas, el punto "D" se recupera en lo que a deformación elástica se refiere y por el mismo mecanismo anterior se genera otra lectura en el dial del extensómetro. La operación expuesta representa el "principio de medición" con la Viga Benkelman. Lo que se hace después son sólo cálculos en base a los datos recogidos. Así, con las dos lecturas obtenidas es posible determinar cuanto deflectó el pavimento en el lugar subyacente al punto "D" de la viga, durante el procedimiento descrito. Es de anotar que en realidad lo que se mide es la recuperación del punto "D" al remover la carga (rebote elástico) y no la deformación al colocar ésta. Para calcular la deflexión deberá considerarse la geometría de la viga, toda vez que los valores dados por el extensómetro (EE') no están en escala real sino que dependen de la relación de brazos existentes (Ver figura 2.4b).

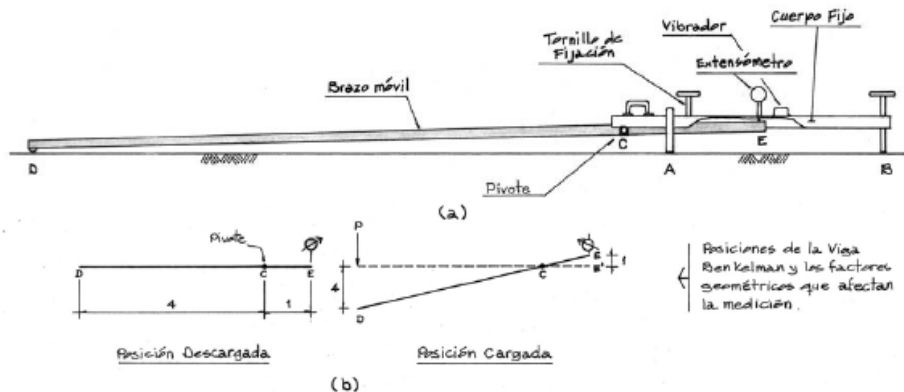


FIGURA 2.4 : Esquema y Principio de Operación de la Viga Benkelman

2.3.3 Equipo requerido

El equipo mínimo para la realización de ensayos de medición de deflexiones es el siguiente:

- i. Deflectómetro Viga Benkelman, tal como el modelo Soiltest HT-350 (con relación de brazos 1:2).
- ii. Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0.01 mm (Modelo

Soiltest HT-300M).

- iii. Camión cargado, con eje trasero de 18000 libras igualmente distribuidas en un par de llantas dobles infladas a una presión de 75 a 85 psi.
- iv. Vehículo auxiliar para transportar al personal y equipo misceláneo (camioneta).
- v. Balanza portátil para pesaje del camión, con capacidad de 10 toneladas.
- vi. Accesorios de medición y varios (Cinta métrica de 3 m, plumones de punta gruesa, plomada, destornillador, alicates, hojas de campo, lápices, señales de seguridad, termómetro, cincel, martillo, varilla de metal o madera de 2m, alambre de amarre, etc.)

2.3.4 Procedimiento en el campo

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada en 9000 libras (4090 kg), y es proporcionada por una de las llantas dobles del eje trasero de un camión. Previamente a la realización de los ensayos deberá verificarse que se cumpla esta condición, así como que la presión de las llantas sea la requerida.

Una vez localizado el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizan en la mitad exterior de un carril), se coloca la llanta a usarse sobre el punto de manera tal que éste coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto (ver figura 2.5a, punto "D").

Para esta operación es aceptable una tolerancia en el rango de 3 pulgadas alrededor del punto. Estacionados los neumáticos se inserta entre ellos el extremo del brazo móvil de la viga colocándolo nuevamente sobre el punto de ensayo seleccionado. Dado que esto último se dificulta por la inaccesibilidad tanto visual como manual, se realizará previamente la siguiente operación: Se coloca la Viga en la posición como si estuviera entre las llantas pero en la parte exterior de las mismas, haciendo coincidir, empleando una plomada, el extremo del brazo móvil con el eje vertical del centro de gravedad. Tomando como punto de referencia una varilla vertical adosada a la parte trasera del camión (ver figura 2.5b), se efectúa una marca en la viga de manera tal que, en adelante, basta con hacerlas coincidir (la

marca con la varilla vertical) para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de las llantas, en el momento de iniciar las mediciones.

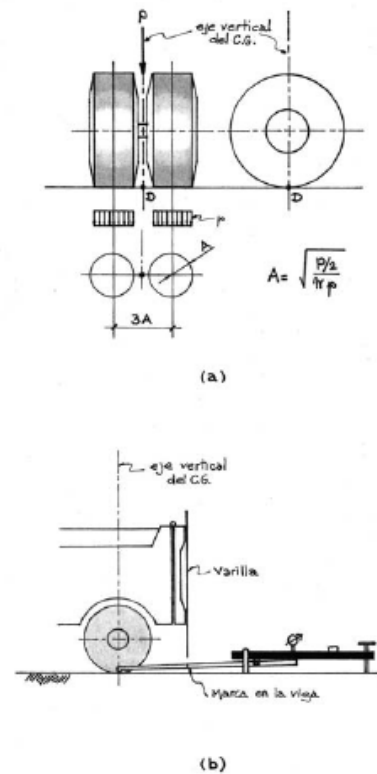


FIGURA 2.5 : Configuración Geométrica del Sistema de Carga en Ensayos con la Viga Benkelman

De igual forma se puede efectuar, a partir de la primera, sucesivas marcas a distancias elegidas a las cuales se desee medir deflexiones adicionales (puede ser a 30, 40 y 50 cm). Para la metodología de análisis se requiere de por lo menos tres lecturas, como se verá en el numeral 2.4, pero se pueden obtener más con fines de verificación, lo cual es recomendable, o si es que se desea tener una idea gráfica del tipo de curvas de deflexiones que se producen.

Como norma se realiza la primera marca adicional a una distancia tal que la deflexión que se obtenga en ese punto sea la mitad de la deflexión máxima

(obtenida en la marca inicial). La segunda marca adicional se realiza al doble de la distancia de la primera marca adicional. Estas dos distancias se determinarán específicamente para cada proyecto de evaluación que se emprenda. Esto deberá hacerse por medio de tanteos previos, antes de comenzar la recolección masiva de datos. Es común que se observen variaciones durante la realización de los ensayos, pero no deberá hacerse modificaciones mientras que las deflexiones tomadas en la primera marca adicional estén en el rango entre 35% y 65% de la deflexión máxima.

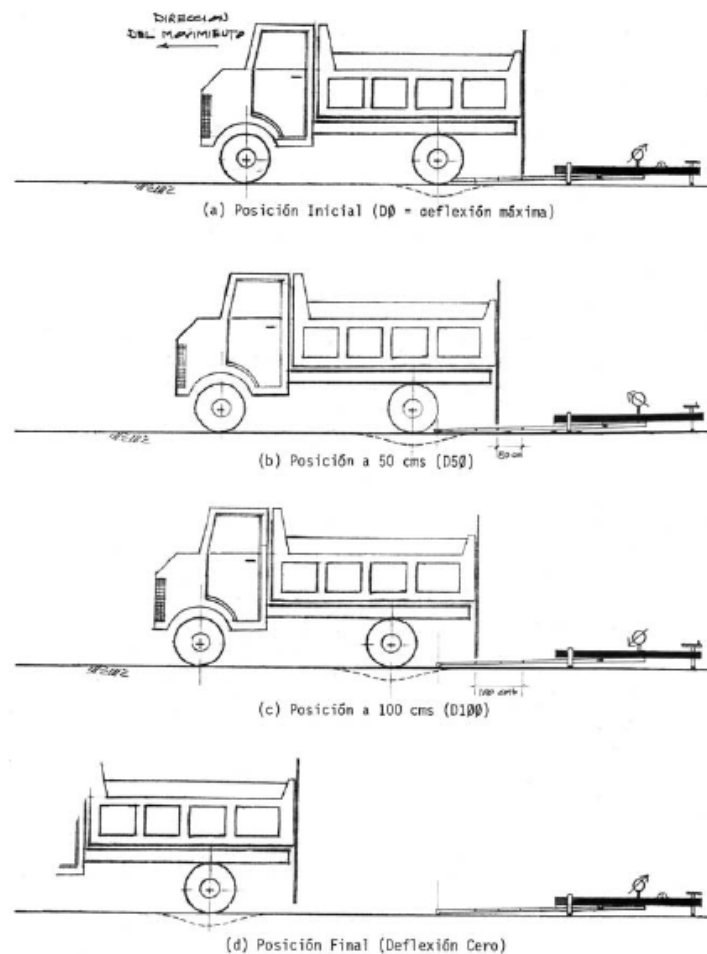


FIGURA 2.6 : Esquematzación del Proceso de Medición con la Viga Benkelman

Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la cadena vertical y la marca inicial (ver figura 2.6a), se verificará que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se pondrá el dial del extensómetro en cero, se activará el vibrador y mientras el camión se desplaza muy lentamente se procederá a tomar lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con la primera y segunda marcas adicionales (figuras 2.6b,c) y una lectura final cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo que el indicador del dial ya no tenga movimiento (aproximadamente 5.00 m.), registro que corresponde al punto de referencia con deflexión cero.

PROYECTO: _____
 TIPO DE PAVIMENTO: _____
 CARGA DE EJE: _____
 PRESION DE INFLADO: _____
 FECHA: _____
 REALIZADO POR: _____

Figura 2.7 Hoja de Campo para recopilación de deflexiones.

ESTACION	LECTURAS DE DEFLECTOMETRO				DEFLEXIONES (mm)			OBSERVACIONES
	R0*	R1*	R2*	∞	DR	DR1	DR2	
								<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%; position: relative;"> <div style="position: absolute; top: 50%; left: 50%; transform: translate(-50%, -50%); border-top: 1px dashed black; border-bottom: 1px dashed black; width: 80%;"></div> </div>

Para la realización de esta rutina será necesario del concurso de tres operadores: Un técnico calificado que lea y dicte las lecturas, un operador que anote las mediciones y un ayudante que coordine con el conductor del camión y a la vez de aviso al técnico que realiza las lecturas, cuando la varilla adosada al camión vaya coincidiendo con las marcas hechas en la viga. Todo el trabajo deberá ser supervisado permanentemente por un ingeniero de campo quien verificará los valores que se vayan obteniendo así como tomará anotación de cualquier factor que a su juicio pueda explicar los resultados que se obtengan (corte, relleno, tipo de material, presencia de alcantarillas, napa freática, estado del pavimento, etc.). La figura 2.7 muestra un formato adecuado para la recopilación de los datos de campo.

2.3.5 Cálculo de las deflexiones

Una vez tomados los datos de campo, el cálculo de las deflexiones para cada estación consiste en sustraer la lectura final (punto de referencia de deflexión cero) a cada una de las otras, representando las respectivas diferencias la deformación en dichos puntos, las cuales en conjunto definen la curva de deflexión de superficie del pavimento.

A modo de ejemplo remitámonos a los datos de campo dados en el Apéndice B. En la estación km 1148+500 se efectuaron 6 lecturas. Inicialmente se puso el dial en 300 y, dado que las otras lecturas miden la recuperación del pavimento, éstas disminuyen gradualmente a 250 (a 50 cms.), 205 (a 100 cms.), 195 (a 200 cms.), 188 (a 300 cms.), y una lectura final de 188 a una distancia de 5 metros, lo que indica que el punto de recuperación total o punto de deflexión cero se encontraba entre 200 y 300 cms. Del punto inicial. Las deformaciones a cada distancia serán: 112, 62, 17, 7 y 0 centésimas de milímetro. La figura 2.8 grafica ésta y algunas otras curvas de deflexión para otras estaciones.

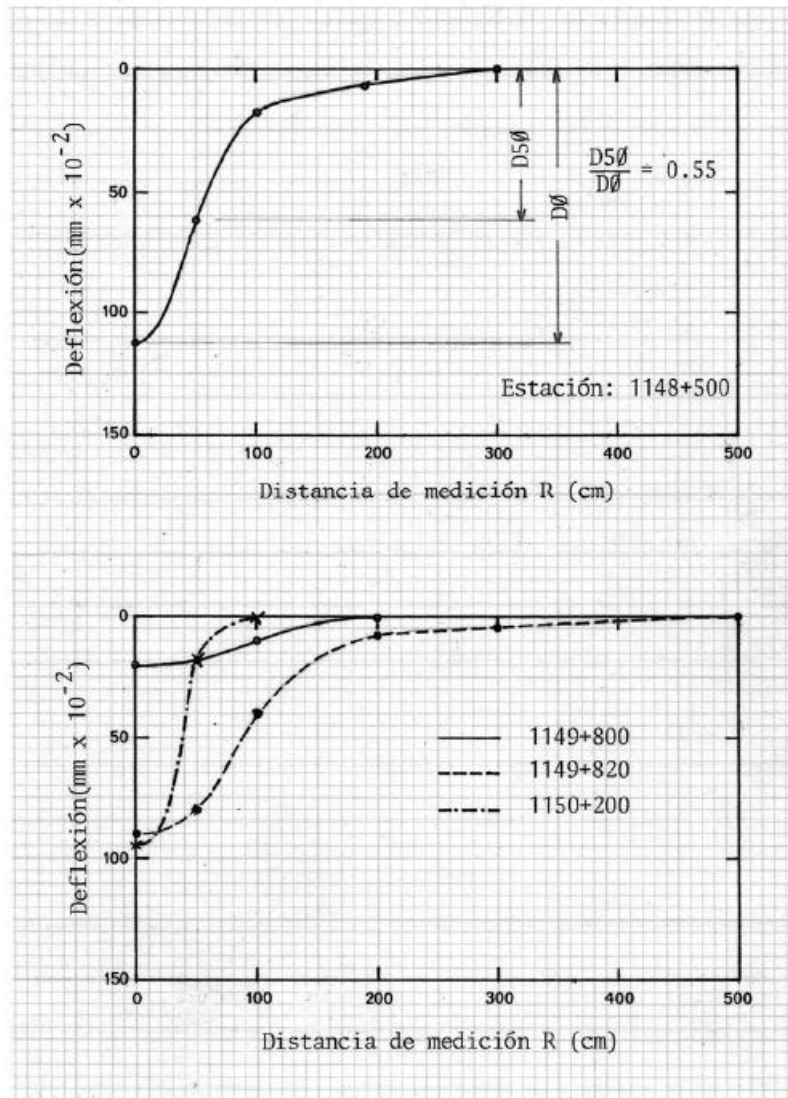


Figura 2.8 Curvas de deflexiones típicas de ensayos con la Viga Benkelman.

ANEXO 4

2.4 METODO DE ANALISIS

Para facilitar el análisis de los numerosos datos de ensayos que se recopilan en un típico proyecto de evaluación estructural se han computarizado los procedimientos de interpretación. El Apéndice "A" presenta un programa de computadora en BASIC que puede ser implementado en una computadora personal del tipo CASIO PB-710, SHARP 1500 o similar con una memoria mínima de 4 KBytes RAM.

A continuación se presentan los diferentes pasos de interpretación con los respectivos algoritmos y ejemplos de su utilización.

Estos algoritmos pueden resolverse manualmente cuando no se dispone de una computadora. A pesar que la metodología presentada es para ensayos con la Viga Benkelman, ésta es adaptable a mediciones con otros aparatos o métodos de medición de deflexiones.

2.4.1 Modelo de carga

La carga en el ensayo con la Viga Benkelman proviene del eje trasero simple con llanta doble de un camión. La carga del eje es del orden de los 18,000 libras y la presión de inflado es de 75 a 85 psi. En el modelo de carga (ver figura 2.5) se asume que la presión de inflado es igual a la presión de contacto, que la huella de contacto de cada llanta es circular y de radio "A" y, que hay una distancia de "3A" entre los centros de cada llanta, Por equilibrio se establece la siguiente relación:

$$A = \sqrt{\frac{P}{\pi p}} \quad \dots(2.3)$$

Donde:

A= Radio de la huella circular de contacto

P= Carga sobre una llanta

p= Presión de inflado.

De esta manera, si la carga del eje es de 18,000 libras (4,500 libras por llanta) y la presión de inflado es de 80 psi:

$$A = \sqrt{\frac{4500}{\pi(80)}} = 4.23'' = 10.7\text{cm}$$

El análisis y el programa de computadora aceptan cualquier valor de carga y presión de inflado.

2.4.2 Determinación de R5

R5 es la distancia "R" del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal, en la cual se obtiene que la relación DR/D0 = 0.5 en la curva de deflexiones. Para el modelo de HOGG se ha establecido que R5 puede determinarse usando la siguiente ecuación:

$$R_5 = R \frac{A^c - B}{\left(A \left(\frac{D_0}{D R} - 1\right)\right)^c - B} \quad \dots(2.4)$$

Donde:

R = Distancia a la que se mide la deflexión DR (Ejemplo: R= 60 cm).

D0= Deflexión Máxima

DR= Deflexión a la distancia R

A, B y C = Coeficientes de correlación cuyo valor se indica en el cuadro 2.1

Ejemplo:

$\mu=0.4$; $H/L0= 10$; $D0= 0.85$ mm; $DR=0.34$ mm

$R= 40$ cm.; $DR/D0= 0.34/0.85 =0.40$

Usando la ecuación (2.4) se obtiene:

$R_5 = 32.4$ cm.

El valor R5 sirve de insumo para determinar la longitud elástica (L0) del pavimento según se explica a continuación.

2.4.3 Determinación de la Longitud Elástica (L0)

La longitud elástica (L0) del pavimento puede calcularse usando la ecuación (2.5).

$$L_0 = \frac{Y R_5 + \sqrt{(Y R_5)^2 - 4 A X R_5}}{2} \quad \dots(2.5)$$

Donde:

R5 = Calculado en la ecuación (2.4)

A = Radio de la huella circular de carga

X,Y= Coeficiente de correlación cuyo valor se indica en el cuadro 2.2

Ejemplo:

$\mu = 0.4$; $H/L_0 = 10$; $R_5 = 32.4$ cm.; $A = 10.7$ cm

Usando la ecuación (2.5) se obtiene:

$$L_0 = 15.1 \text{ cm}$$

El valor de L0 sirve de insumo para determinar el módulo de elasticidad de la subrasante (E0) según se explica a continuación.

2.4.4 Determinación del Módulo de Elasticidad de la Subrasante (E0)

La determinación del módulo de elasticidad de la subrasante constituye un punto central de la metodología de evaluación. Para desarrollar soluciones numéricas programables en computadora, esta determinación se efectúa en dos pasos:

(i) Primer Paso: El primer paso consiste en establecer la relación teórica entre la

rigidez para carga puntual y la rigidez para carga distribuida sobre un área, para un cociente dado del valor A/L0. La rigidez se define como el cociente entre la carga y la deflexión (S= P/D0).

La relación teórica se calcula por medio de la ecuación:

$$\frac{S_0}{S} = 1 - M \left(\frac{A_0}{L} - 0.10 \right) \quad \dots(2.6)$$

Donde:

S₀ = Rigidez para carga puntual

S = Rigidez para carga de área

M = Coeficiente numérico que adopta los siguientes valores:

Para H/L0= 10 ; μ=0.5 ; M=0.52

Para H/L0= 10 ; μ=0.4 ; M=0.48

Para H/L0= ∞ ; μ=cualquier valor; M=0.44

Por ejemplo: Para A/L0 = 10.7/15.1 = 0.71

H/L0 = 10

μ = 0.4

Se obtiene: S₀/S = 1 - 0.48(0.71 - 0.10)

S₀/S = 0.71

(ii) Segundo Paso: Una vez determinado el valor de S₀/S, se calcula el módulo de elasticidad de la subrasante por medio de la siguiente ecuación:

$$E_0 = \left(\frac{K_x I_x P}{L_0 x D_0} \right) \frac{S_0}{S} \quad \dots(2.7)$$

Donde:

K= Coeficiente numérico que depende del coeficiente de Poisson de la subrasante y que adopta los siguientes valores:

Para $\mu=0.5$; $K=1.5$

Para $\mu=0.4$; $K=1.633$

I = Coeficiente numérico que adopta los siguientes valores:

Para $H/L0 = 10$; $\mu=0.4$; $I = 0.1689$

Para $H/L0 = 10$; $\mu=0.5$; $I = 0.1614$

Para $H/L0 = \infty$; μ =cualquier valor; $I=0.1925$

P = Carga total en la llanta doble

$L0$ = Longitud elástica (ecuación 2.5)

$D0$ = Deflexión máxima

Ejemplo:

$H/L0=10$; $\mu=0.4$; $P=9000$ libras (4086 Kg)

$L0 = 15.1$ cm; $D0=0.85$ mm; $So/S = 0.71$

entonces:

$K = 1.633$

$I = 0.1689$

y usando la ecuación (2.7)

$$E0 = \frac{1.633 \times 0.1689 \times 4086 \times 0.71}{15.1 \times 0.085}$$

$E0 = 623$ kg/cm².

2.4.5 Determinación del Módulo de Elasticidad Equivalente del Pavimento (E^*)

El módulo de elasticidad equivalente del pavimento (E^*) representa a todas las capas del pavimento por encima de la subrasante. Para un pavimento flexible típico, compuesto de carpeta asfáltica y base granular, el módulo E^* representa a la carpeta y la base combinadas con un espesor total igual a la suma de los espesores de cada capa.

Una solución programable aproximada ha sido propuesta por Ullidtz y se basa en los siguientes conceptos. El módulo combinado (E^*) de la carpeta asfáltica y la base,

con un espesor HC= H1 + H2 se determina usando el concepto del espesor equivalente. Este espesor equivalente se determina de la siguiente ecuación:

$$H E = (0.9)(H C) \left(\frac{E^*}{E_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots(2.8)$$

La relación entre la deflexión máxima (D0), el módulo de elasticidad de la subrasante (E0) y el módulo de elasticidad del pavimento (E*) está expresada por la siguiente ecuación:

$$D_0 = \frac{(1 + \mu)P}{2\pi} \left[\frac{1}{E^*} \left[\frac{2(1 - \mu)}{r} - \frac{1}{R_1} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z_1}{R_1} \right)^2 \right) \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{E_0} \left[\frac{1}{R_2} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z_2}{R_2} \right)^2 \right) - \frac{1}{R_3} \left(2(1 - \mu) + \left(\frac{Z_3}{R_3} \right)^2 \right) \right] \right] \quad \dots(2.9)$$

Donde:

$$r = 1.5xA$$

$$z_1 = HC + 0.6xA^2/HC$$

$$R_1 = \sqrt{Z_1^2 + (1.5A)^2}$$

$$Z_2 = HE + 0.6xA^2/HE$$

HE = Ecuación (2.8)

$$R_2 = \sqrt{Z_2^2 + (1.5A)^2}$$

$$Z_3 = (HE + (N)(L_0)) + 0.6A^2/(HE + (N)(L_0))$$

$$R_3 = \sqrt{Z_3^2 + (1.5A)^2}$$

- N = 10 para base rocosa a espesor finito (H/L0=10)
- N = 100 para base rocosa a espesor infinito (H/L0= infinito)
- P = Carga de ensayo = $\pi A^2 \rho$ (ρ =presión de inflado).

La ecuación (2.9) se resuelve iterativamente en la computadora para determinar el valor de E^* para cualquier combinación de valores de E_0 , HC, P, ρ , D0, R, DR, H/L0 y coeficiente μ .

2.5 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN

Según se ha expuesto, la metodología de evaluación estructural de pavimentos basada en la interpretación de deflexiones de superficie se sustenta matemáticamente en el Modelo de Hogg y en conceptos de la teoría de la elasticidad y resistencia de materiales. Los insumos para el procesamiento de los datos se dividen en cuatro (4) categorías:

- a) Datos de carga (P y ρ)
- b) Deflexiones medidas (D0, DR y R)
- c) Datos de pavimento (Espesores y características de las capas)
- d) Parámetros del modelo (H/L0 y μ)

La metodología por su parte, produce los siguientes datos de salida: L0, E0, y E^* . Obviamente, los datos de salida dependen de los datos de entrada. La carga de ensayo es generalmente un dato fijo para cada proyecto y salvo circunstancias especiales debe estar en el rango recomendado de P= 18 kilolibras y ρ = 75-85 psi. Las deflexiones medidas son el resultado de los ensayos y varían seguramente de proyecto a proyecto y entre diferentes puntos de un mismo proyecto debido a la heterogeneidad del pavimento y su subrasante y a errores inevitables de medición.

La selección de una o más distancias "R" depende del criterio del Ingeniero, aunque es común y práctico medir, como mínimo, D0, D40, D50 y D100 a distancias de 0, 40, 50 y 100 cm. del eje de la carga.

Los espesores y características de las capas del pavimento no siempre se conocen, a menos que existan datos históricos de construcción y/o diseño o se perforen calicatas. Esta información es necesaria para determinar "HC", cuyo valor influye en "E*" pero no influye en los valores de "L0" y "E0", siendo esta una característica importante del modelo de Hogg. El significado de los parámetros del modelo se discute a continuación.

2.5.1 Significado de L0

La longitud característica (L0) del pavimento es, por definición, un parámetro que refleja la rigidez relativa entre un pavimento y su subrasante. Por tratarse de una relación de rigideces, el valor de L0 permite una rápida evaluación cualitativa del sistema pavimento-subrasante.

En un extremo de la escala puede pensarse en un pavimento rígido (losa de concreto) sobre una subrasante débil con un L0 del orden de los 80 cms. En el otro extremo se encuentra un pavimento compuesto de una capa granular sin revestimiento sobre una subrasante fuerte y un L0 del orden de los 15 cms. No hay que olvidar que se trata de una relación de rigideces de manera que un valor bajo de L0 puede corresponder tanto al caso de un buen pavimento sobre una buena subrasante como el caso de un mal pavimento sobre una débil subrasante.

La determinación de L0 en el proceso de evaluación depende solamente del cociente DR/D0 y del valor R. Es decir que dos pavimentos cualesquiera con igual cociente DR/D0 a una misma distancia R dada, tienen el mismo L0 aunque DR y D0 sean diferentes. Los valores específicos de D0 y DR influyen en los módulos E0 y E* según se explica más adelante.

2.5.2 Significado de E0 y su relación con el CBR

El parámetro E0 representa el módulo de elasticidad de la masa de subsuelo que participa en la deformación del sistema pavimento-subrasante. En la ecuación (2.7) puede verse que E0 es inversamente proporcional a D0 y a L0, es decir que E0 es

menor cuanto mayor es la deflexión y la longitud característica del pavimento para una relación de rigideces S_0/S dada, y viceversa. El primer paso corresponde a un pavimento que tiene una curva de deflexiones profunda y extensa y, en general, puede establecerse las relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema, que se ilustran en la figura 2.9.

Cabe insistir que las de la figura 2.9 son relaciones comparativas generales que pretenden ayudar en la visualización del significado de E_0 y el pavimento en relación con las características de la curva de deflexiones medida.

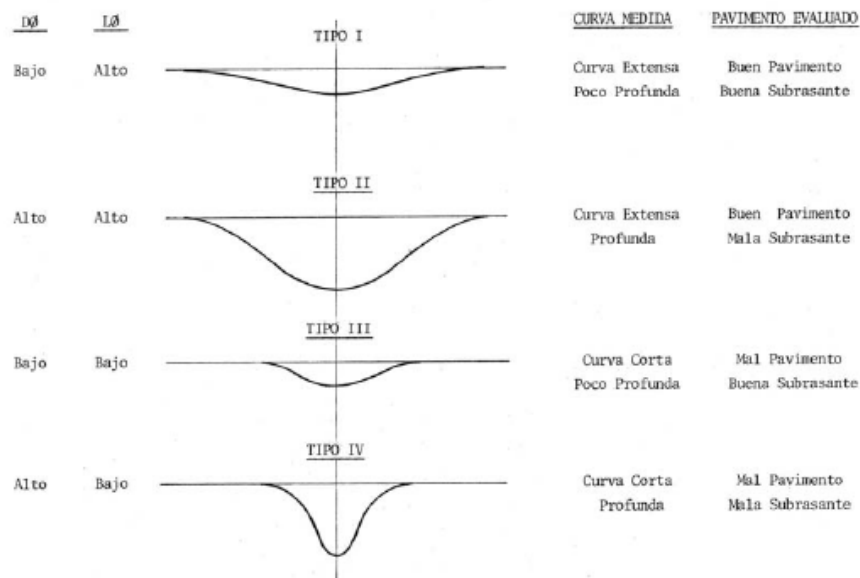


Figura 2.9. Significado cualitativo de los diferentes tipos de Curvas de Deflexiones

A pesar que el módulo E_0 es un parámetro mecánico fundamental del subsuelo, se ha establecido, además, una relación entre este valor y el valor del CBR de la subrasante, para facilitar el diseño del refuerzo requerido o para chequear diseños usando métodos tradicionales. Esta relación ha sido establecida experimentalmente, comparando los valores de E_0 obtenidos de la metodología de evaluación estructural, usando deflexiones medidas con la Viga Benkelman y valores de CBR

obtenidos en sitio.

De numerosas comparaciones de este tipo se ha podido establecer la siguiente relación:

$$E_0 = (100 \text{ a } 160) \times \text{CBR} \quad \dots(2.10)$$

Para E_0 expresado en Kg/cm^2 y CBR en porcentaje.

Resulta interesante notar que esta relación es similar a la obtenida por Heukelom y Klomp, durante ensayos de propagación y análisis de ondas vibratorias realizadas en Holanda para determinar lo que denominaron el "E dinámico" de los suelos.

El coeficiente numérico (100 a 160) de la relación (2.10) se denomina "factor de CBR" y se recomienda utilizar un factor de 100 a 110 para ensayos rutinarios a menos que exista alguna razón que justifique su cambio.

2.5.3 Significado de E^* y HC

El valor E^* representa un módulo de elasticidad compuesto o equivalente de todas las capas del pavimento con un espesor "HC". El espesor "HC" usado influye en el valor de E^* de manera que cuanto menor es el valor de "HC", mayor es el valor de E^* obtenido.

Los valores HC y E^* están interconectados y son, en cierta medida, intercambiables. Para ilustrar este concepto es conveniente pensar en términos de diseño: Para una subrasante y tráfico dados, el Ingeniero diseñador puede optar por un espesor pequeño de excelentes materiales (bajo HC y alto E^*) o un espesor grande de materiales mediocres (alto HC y bajo E^*). En ambos casos el Ingeniero trata de proteger a la subrasante contra esfuerzos excesivos y cuenta para esto con varias combinaciones de HC y E^* (los extremos serían un pavimento rígido vs. un pavimento flexible).

En base a consideraciones de diseño y a la teoría de capas elásticas, Hoffman (1977), ha establecido que un pavimento flexible, adecuadamente diseñado, debe guardar una relación modular E_p/E_0 entre 2 y 4, pudiéndose usar, para fines

prácticos, la relación:

$$EP = 3E0 \quad \dots (2.11)$$

En base al concepto de rigidez flexionante, se plantea que si el pavimento evaluado con módulo de elasticidad E^* y espesor HC es equivalente a un pavimento nuevo con módulo EP y espesor H_{eq} , se debe guardar la siguiente relación entre la rigidez flexionante del pavimento evaluado y la del pavimento nuevo:

$$E^*(HC)^3 = EP(H_{eq})^3 \quad \dots(2.12)$$

Introduciendo la relación (2.11) en la ecuación (2.12) se obtiene que:

$$E^*(HC)^3 = 3 E0 (H_{eq})^3 \quad \dots(2.13)$$

$$\text{ó} \quad H_{eq}/HC = (1/3 E^*/E0)^{1/3} \quad \dots(2.14)$$

La ecuación (2.14) constituye la base para asignar un crédito estructural al pavimento existente con módulo E^* y espesor HC desde el punto de vista del diseño. Por ejemplo, si un pavimento evaluado tiene una relación modular $E^*/E0$ de 3, su HC es totalmente utilizable desde el punto de vista estructural (H_{eq}/HC)=1. En cambio, si la relación modular evaluada es 2, sólo un 87% del HC cuenta como espesor estructural utilizable. Por el contrario, si la relación modular evaluada es 5, el espesor estructuralmente utilizable es igual al 118% de HC dando así crédito al buen módulo E^* evaluado en el pavimento existente. El espesor H_{eq} puede considerarse entonces como el espesor efectivo en términos de "base granular" del pavimento existente de acuerdo a los valores de HC, E^* y E0 evaluados.

El siguiente paso consiste en la comparación entre este espesor efectivo y el espesor requerido para una demanda anticipada de tráfico, para establecer las necesidades de refuerzo estructural:

$$DH = HD - HEQ \quad \dots (2.15)$$

Donde:

DH = Espesor del refuerzo de material granular

HD = Espesor requerido de diseño

H_{eq} = Espesor efectivo del pavimento existente

2.5.4 Diseño del Refuerzo

Para ilustrar el concepto del diseño del refuerzo considérese el método de diseño para pavimentos de mediano volumen de tráfico propuesto por el Laboratorio de Investigación del Transporte Vial Británico (TRRL, 1982). Las curvas de diseño originales, basadas en el concepto de CBR, pueden aproximarse analíticamente por medio de la siguiente expresión:

$$HD = CBR^{-0.59} (4.63 + 6.09 \log N_{18}) \quad \dots(2.16)$$

Donde:

HD = Espesor requerido de diseño en pulgadas de material granular (CBR=80%).

CBR= CBR de diseño de la subrasante

N₁₈ = Número de aplicaciones de diseño del eje de carga equivalente de 18 kilolibras.

La aproximación señalada es válida para valores de N₁₈ entre 10⁴ y 10⁶. Por ejemplo, para un CBR de diseño de 4% y un N₁₈ de 10⁶ aplicaciones, la ecuación (2.14) da un espesor requerido de diseño de 18.2 pulgadas (46.0 cm) de base granular.

Supóngase ahora que en un pavimento evaluado se han establecido los siguientes valores:

$$HC= 40 \text{ cm, } E^*/EO= 2.0, \text{ CBR}= 4\%$$

De acuerdo a la ecuación (2.14) el espesor equivalente de este pavimento es:

$$H_{eq}/HC = (1/3 \cdot 2)^{(1/3)} = 0.87$$

$$\text{y } HEQ = 0.87 \times 40 = 35 \text{ cm.}$$

Si se planteara reforzar estructuralmente este pavimento para una demanda adicional de tráfico de 10^6 aplicaciones del eje de 18 kilolibras, el espesor del refuerzo sería. De acuerdo a la ecuación (2.15):

$$DH = 46.0 - 35 = 11.0 \text{ cm.}$$

Este DH obtenido representa un espesor requerido de base granular, el cual puede ser convertido en espesor requerido de carpeta asfáltica usando factores de equivalencia, que en la literatura fluctúan entre 1.5 y 4.0 cm. de base por cm. de carpeta asfáltica (1.5 para la FAA y 3.2 a 4.0 para la AASHTO). Adoptando un factor de equivalencia de 3.0 (a tono ilustrativo) y siguiendo con el ejemplo analizado, se requiere un refuerzo asfáltico de unos 4.0 cm. En forma similar se pueden determinar las necesidades de refuerzo de cualquier pavimento.

Una de las ventajas destacables de la metodología propuesta radica en el cálculo del espesor efectivo del pavimento evaluado (HEQ) dando crédito estructural al espesor existente (HC) de acuerdo a su condición (E^*).

2.5.5 Los Parámetros H/L0 y μ

La metodología de evaluación permite la selección de la profundidad de la "capa rocosa" y puede optarse por el valor $H/L0 = 10$ ó $H/L0 = 100$, que corresponde a una capa rocosa en el infinito. La adopción de uno u otro valor de $H/L0$ influye en todos los resultados de la evaluación: $L0$, $E0$ (CBR) y E^* .

Para estudios rutinarios se recomienda el uso del $H/L0 = 10$ que implica que la capa rocosa se encuentra a una profundidad igual a 10 veces la longitud característica del

pavimento. Así, para un L0 de 20 cm. se asume una capa rocosa de 2.0 metros de profundidad, para L0 igual a 40 cm. la capa rocosa se encuentra a 4.0 metros de profundidad, y así sucesivamente. Como se indicó previamente, el uso de un H/L0 finito (10 en este caso) produce resultados de evaluación más satisfactorios y representativos.

El valor $H/L0 = 100$ (capa rocosa en el infinito) puede usarse para evaluar la sensibilidad de los resultados o para chequear el grado de concordancia entre curvas de deflexiones medidas y curvas teóricas cuando se cuenta con varios valores de deflexiones medidos a diferentes distancias del eje de la carga. Este chequeo es, a propósito, un método legítimo para verificar los resultados de evaluación.

En cuanto al coeficiente de Poisson μ , las soluciones aceptan los valores 0.4 y 0.5, recomendándose usar 0.4 para trabajos rutinarios. Sin embargo, la diferencia en los resultados entre uno y otro valor no exceden típicamente del 10%.

CUADRO 2.1: Coeficientes de correlación para el cálculo de R5 en el modelo de Hogg

H/L0	μ	A	B	C
∞	Cualquier Valor	3.115	0	0.584
10 DR/D0>0.7	0.5	2.460	0	0.592
10 DR/D0<0.7	0.5	371.1	2	0.219
10 DR/D0>0.426	0.4	2.629	0	0.548
10 DR/D0<0.426	0.4	2283.4	3	0.2004

CUADRO 2.2: Coeficientes de correlación para la determinación de L0 en el Modelo de Hogg

H/L0	μ	X	Y
10	0.5	0.183	0.620
10	0.4	0.192	0.602
∞	Cualquier Valor	0.180	0.525

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Asphalt Institute (1977), "Asphalt Overlays and Pavement Rehabilitation", Manual series 17 (MS-17).
2. Burmister, D.M. (1943), "The General Theory of stress and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways", Proceedings, HRB, vol.23.
3. CGRA (1962), "Pavement Evaluation Studies in Canada", International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proceedings.
4. Heukelom, W. y Klomp, A.J.G. (1964), "Road Design and Dynamic Loading", Proceedings of the AAPT, volume 33.
5. Hogg, A.H.A (1944), "Equilibrium of a Thin Slab on an Elastic Foundation of finite Depth", Philosophical Magazine, Volume 35 (243).
6. Hoffman, M.S. (1977), "Application of Elasticity Models for the evaluation of flexible Pavements", Research Report N 015-664, Transportation Research Institute, Technion, Israel.
7. Louis Berger International, Inc. (1984), "Aeropuerto de Piura: Evaluación del Pavimento y Diseño del Refuerzo", presentado a la DGTA, MTC, PERU.
8. TRB (1982), Synthesis 4, Transportation Technology Support for Developing Countries.
9. WASHO Road Test (1955), HRB, Special Reports Nos. 18, 22, 1954.
10. Wiseman, G. (1976), "The Interpretation of Surface Deflection Measurements Using The Model of an Infinite Plate on an Elastic Foundation", Symposium on Nondestructive test an Evaluation of Airport Pavements, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
11. Wiseman, G., Uzan, J., Hoffman, M.S., Ishai, I, y Livneh, M. (1977), "Simple Elastic Models for Pavement Evaluation Using Measured Surface Deflection Bowls", Proceedings, 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Volume II.

APENDICE A
PROGRAMA DE CÓMPUTO PARA EL PROCESAMIENTO
DE DATOS DE VIGA BENKELMAN

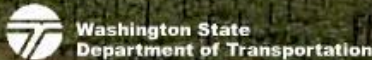
```

1000:REM *** UIG
      A BENKELMAN
      ***
1010:REM *** ULT
      . REVISION 0
      CT. 1985
1020: CLEAR
1030: REM ENTRADA
      DE DATOS
1040: INPUT "P(KG)
      =" ; P
1050: INPUT "PR(CPS
      I) =" ; PR
1060: INPUT "HC(CM
      ) =" ; HC
1070: INPUT "FACTO
      R CBR =" ; CF
1080: INPUT "R(CM)
      =" ; R
1090: INPUT "H/L0(
      10 0 100) =" ;
      HL
1100: INPUT "D0(10
      -2 MM) =" ; D1
1110: INPUT "DR(10
      -2 MM) =" ; D2
1120: D0=D1/1000
1130: DR=D2/1000
1140: A=f(P/(0.442
      I*PR))
1150: IF HL=100
      THEN GOTO 12
      10
1160: IF DR/D0>0.4
      26 THEN GOTO
      1190
1170: AA=2283.4: BB
      =3: CC=0.2004
1180: GOTO 1220
1190: AA=2.629: BB=
      0: CC=0.548
1200: GOTO 1220
1210: AA=3.115: BB=
      0: CC=0.584
1215: REM *** CAL
      CULO DE R5 *
      **
1220: R5=R*(AA^CC-
      BB)/((AA*(D0
      /DR-1))^CC-B
      B)
1230: IF HL=100
      THEN GOTO 12
      60
1240: X=0.192: Y=0.
      602
1250: GOTO 1270
1260: X=0.180: Y=0.
      525
1265: REM *** CAL
      CULO DE L0 *
      **
1270: L0=(Y*R5+J((
      Y*R5)^2-4*A*X
      X*R5))/2
1280: PRINT "L0=" ;
      INT (L0*10+0
      .5)/10 ; " CM"
1290: M=0.48
1300: IF HL=100
      THEN LET M=0
      .44
1310: SR=(1-M*(A/L
      0-0.10))
1320: IF SR>1 THEN
      LET SR=1
1330: I=0.1689
1340: IF HL=100
      THEN LET I=0
      .1925
1345: REM *** CAL
      CULO DE E0 *
      **
1350: E0=1.633*I*P
      *SR/(L0*D0)
1370: PRINT "E0=" ;
      INT (E0) ; " K
      G/CM2"
1375: REM *** CAL
      CULO DEL CBR
      ***
1380: PRINT "CBR="
      ; INT (E0/CF*
      10)/10 ; " %"
1390: REM *** CAL
      CULO DE E* *
      **
1400: RR=1.5*A
1410: EC=2*E0
1420: Z1=HC+0.6*A^
      2/HC
1430: R1=f((Z1^2+RR
      ^2)
1440: HE=0.9*HC*(E
      C/E0)^(1/3)
1450: Z2=HE+0.6*A^
      2/HC
1460: R2=f((Z2^2+RR
      ^2)
1470: Z3=HE+HL*L0+
      0.6*A^2/(HE+
      HL*L0)
1480: R3=f((Z3^2+RR
      ^2)
1490: D3=1/EC*(1.2
      /RR-1/R1*(1.
      2+(Z1/R1)^2)
      )
1500: D4=1/E0*(1/R
      2*(1.2+(Z2/R
      2)^2)-1/R3*(
      1.2+(Z3/R3)^
      2))
1510: DC=0.2228*P*
      (D3+D4)
1520: IF ABS (DC-D
      0)/D0<0.01
      THEN GOTO 15
      50
1530: EC=EC*DC/D0
1540: GOTO 1440
1550: BEEP 2
1570: PRINT "E*=" ;
      INT (EC) ; " K
      G/CM2"
1580: PRINT "E*/E0
      =" ; INT (EC/E
      0*10)/10
1590: INPUT "MAS D
      ATOS(S/N) " ; S
      $
1600: IF S#="S"
      THEN GOTO 11
      00
1610: PRINT "BBEAM
      END"
1620: RETURN
LISTADO PROCESADO
EN COMPUTADORA PER
SONAL SHARP PC-150
0A, 29/10/85

```

Anexo 5

Pavement Evaluation



MODULE 9


Search Glossary References Media In-Depth WSDOT Practices Review

1 Introduction
2 Roughness
3 Surface Distress
4 Skid Resistance
5 Deflection
6 Condition Rating

Pavement Distress Photos

7 Flexible Pavements
8 Rigid Pavements

[Back to Main Menu]



Washington State

The standard impact load response test method is:

- ASTM D 4694: Standard Test Method for Deflections with a Falling Weight Type Impulse Load Device

5.2.4 Correlations Between Deflection Measuring Equipment

In general, correlations between deflection devices should be used with caution. Too often, a correlation is developed for a specific set of conditions that may not be present for those using the correlation. It appears that the best approach is to obtain pavement parameters (such as layer moduli) from the specific device being used. However, that said, a few of many such correlations that have been developed follow.

5.2.4.1 Benkelman Beam to FWD

(based on unpublished data collected by the Washington State DOT Materials Laboratory in 1982-1983)

$$BB = 1.33269 + 0.93748 (\text{FWD})$$

where: BB = Benkelman Beam deflection (inches $\times 10^{-3}$)
FWD = FWD center-of-load deflection (inches. $\times 10^{-3}$) corrected to a 9,000 lb. load applied on a 11.8-inch diameter plate

$R^2 = 0.86$ Standard Error = 3.20 mils Sample Size = 713

Anexo 6

HOJA DE DATOS DE CAMPO

PROYECTO: Tesis / VB / FWD
TIPO DE PAVIMENTO: Concreto Asfáltico
CARGA DE EJE: 18,000 lbs
PRESION DE INFLADO: 80 psi
FECHA: Agosto / 2007
REALIZADO POR: Frank Dowe / UES
TEMPERATURA: 33 grados celsius



ESTACION	LECTURAS DE DEFLECTOMETRO				DEFLEXIONES (10 ² mm)			OBSERVACIONES
	R0*0	R1*	R2*	∞	D0	DR1	DR2	
39+125					0.005			<div style="border: 1px dashed black; height: 100%; width: 100%;"></div>
39+375					0.008			
39+625					0.004			
39+875					0.006			
40+125					0.008			
40+375					0.0065			
40+625					0.007			
40+875					0.01			
41+125					0.017			
41+375					0.006			
41+625					0.009			
41+875					0.008			
42+125					0.008			
42+375					0.009			
42+625					0.006			
42+875					0.006			
43+125					0.01			
43+375					0.009			
43+625					0.006			
43+875					0.002			
44+125					0.008			
44+375					0.008			
44+625					0.008			
44+875					0.008			
45+075					0.007			

Anexo 7

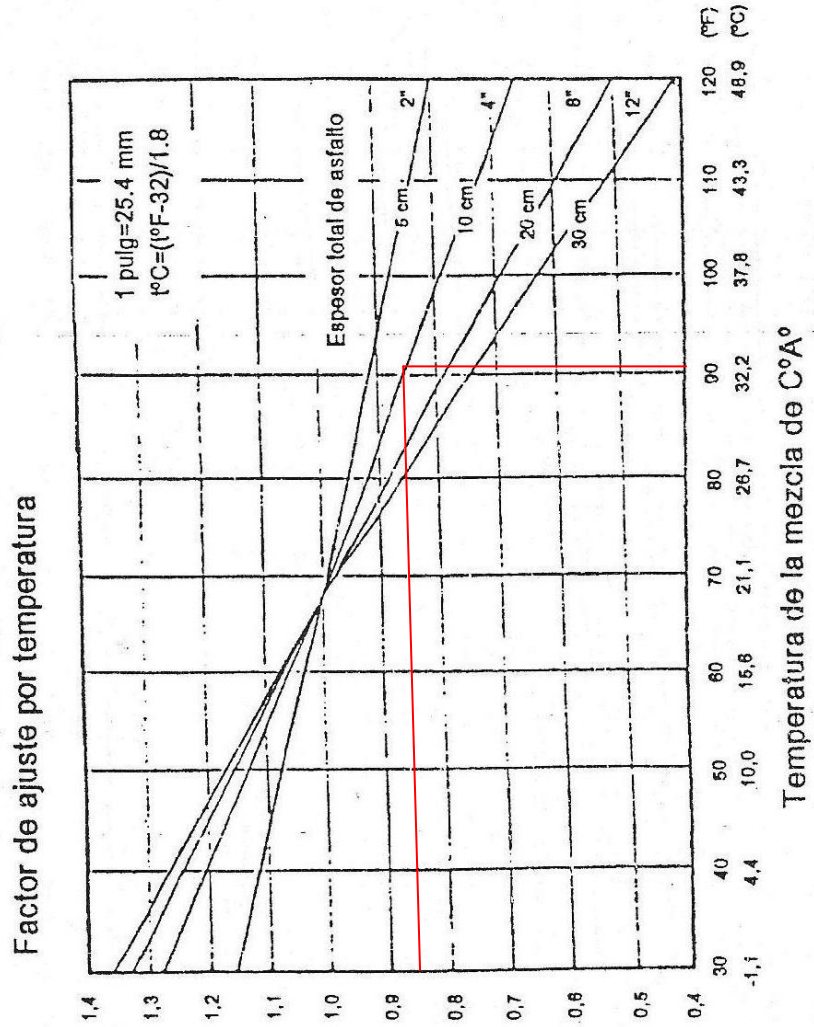


Fig. 11.4. Ajuste para d_0 por temperatura para pavimento con base granular o tratada con asfalto

Refuerzo de concreto asfáltico sobre pavimentos de concreto asfáltico