

9º CONGRESO DE LA VIALIDAD URUGUAYA

Presentación de Trabajo Técnico

“Metodología para la valoración modular por retrocálculo según Guía AASHTO93 de capas no ligadas mediante la utilización del Light Weight Deflectometer”

1 Tecnologías de pavimentación

Julián Rivera, Luciano Brizuela, Natalia Alderete, Martín Villanueva

LEMaC, Centro de Investigaciones Viales

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata.

Avda. 60 y 124, La Plata, Buenos Aires, Tel/Fax: (0221) 4890413

lemac@frlp.utn.edu.ar

1. Resumen

Uno de los empleos del Falling Weight Deflectometer (FWD) es el de establecer espesores de refuerzo con mezcla asfáltica en vías a ser rehabilitadas, mediante la aplicación de la técnica de retrocálculo de la Guía AASHTO93, de uso difundido en nuestra región. Esto se logra generando las deflexiones por impacto sobre la capa asfáltica a ser reforzada en todos los tramos involucrados, permitiéndose, si se quiere, el empleo posterior de espesores diferentes en cada tramo o conjunto de estos.

A partir de lo expuesto es dable pensar que podría realizarse una aplicación análoga para determinar espesores reducidos de pavimentación con mezcla asfáltica, si esta deflexión se provocara sobre la capa de base terminada, de lo cual se ha podido constatar han existido experiencias exitosas a nivel mundial. Dicha aplicación resultaría sumamente útil por ejemplo en reciclados profundos, pavimentación urbana, etc., es decir lugares en donde podrían existir heterogeneidades tales como tipología y condiciones de la subrasante, materiales aportados, proceso de compactación, etc., y donde las solicitaciones de tránsito no fueran muy elevadas (en términos de ejes equivalentes).

Pero el costo elevado de un FWD torna difícil este tipo de aplicaciones, ya que debería contarse con un equipo a disposición en obras que posiblemente no revistan la envergadura necesaria.

Con la aparición en la región hace unos años de equipos similares pero de bajo peso y costo, como es el caso de los Light Weight Deflectometer (LWD), desde el LEMaC, Centro de Investigaciones Viales de la UTN La Plata, se han conducido análisis en pos de lograr la aplicación de los mismos con la finalidad ya expuesta.

El análisis a nivel internacional de tal emprendimiento permitió relevar iniciativas similares, pero que habían llegado como conclusión al empleo de una constante única de calibración entre los LWD y los FWD, lo cual según el análisis por la teoría de las capas elásticas no sería recomendable, debiéndose registrar modelos de correlación en lugar de una única constante.

Esto llevó a la necesidad de desarrollar un plan de trabajos para arribar a una metodología de aplicación más ajustada, basada en la medición sobre tramos de prueba y ensayos en laboratorio, el cual fuera presentado para su discusión en la octava edición de este Congreso en 2011.

Dicho plan de trabajo fue aplicado, arribándose finalmente a la metodología buscada, la cual es presentada en su versión final en esta nueva edición del Congreso.

La misma presenta los modelos de correlación hallados y sus correspondientes coeficientes de determinación asociados.

2. Introducción

La práctica habitual en la pavimentación de vías con volúmenes medios o bajos de tránsito es la de establecer un paquete estructural flexible multicapas tipo, sobre todo en lo que hace a vías urbanas de las redes secundarias o terciarias.

Al dimensionar este paquete, el proyectista debe considerar que será aplicado sobre diversas tipologías de suelos de subrasante. Además, según los factores limitantes del proyecto hidráulico asociado, los niveles de umbrales de los frentistas, etc., se establecerán cotas de rasante que determinarán secciones en las cuales habrá que efectuar la apertura de caja, sólo un perfilado superficial o agregar capas adicionales por corresponder su terraplenado. Todas estas cuestiones también son asociables a diferentes aportes de la subrasante.

La solución de compromiso adoptada generalmente es la de establecer un valor de cálculo que sea superado por una dada cantidad de los puntos analizados para ponerse del lado de la seguridad, indicando un percentil por encima del 50 %, lo que en la aplicación de la Metodología AASHTO93 significa mayor Confiabilidad y mayor inversión inicial (AASHTO, 1993).

Pero existen otros aspectos que también condicionan al proyectista. Uno de ellos es el hecho de que aunque se establezca claramente una tipología para las subbases y bases, es habitual especificar cierta tolerancia en cuanto al coeficiente de compactación admisible, redundando en que en obra luego se tenga un rango de valores de aporte estructural, aun para un único paquete estructural diseñado.

Otro de estos aspectos condicionantes es la existencia también de un espectro en cuanto al volumen de tránsito y su clasificación en las vías incluidas en el programa de pavimentación.

Ante estos hechos el proyectista también debe efectuar una toma de decisiones poniéndose del lado de la seguridad, dando lugar a paquetes estructurales sobredimensionados en gran parte de las vías a ser pavimentadas mediante un programa de pavimentación en particular, con las correspondientes implicancias económicas que esto conlleva.

La solución a los inconvenientes puestos de manifiesto se obtendría modificando la forma habitual en que se realiza la contratación de estas tareas, especificando no sólo un paquete estructural tipo, sino un paquete tipo hasta el nivel de base incluido y distintas alternativas de capa de rodamiento por separado (tratamiento superficial, carpeta asfáltica en 4 cm, carpeta asfáltica en 5 cm, etc.) que serán asignadas expeditivamente para cada vía en cuestión en función de su tránsito estimado, de la subrasante en particular que presenten y del aporte estructural real de las bases, al momento de ser terminadas.

De entre estas cuestiones la primera se resuelve a través de un análisis de la demanda, que no es motivo de abordaje de este trabajo.

Las otras dos cuestiones podrían resolverse mediante la aplicación de la metodología de retrocálculo según AASHTO93. Ésta es comúnmente utilizada para la determinación de espesores de refuerzo asfáltico sobre vías ya pavimentadas. Se idealiza mediante la misma un paquete estructural tricapa (subrasante, paquete existente y refuerzo a colocarse), siendo que la sollicitación con el Falling Weight Deflectometer (FWD) se efectúa sólo sobre dos de estas capas (subrasante y paquete existente). De esa forma se obtiene la respuesta modular de ambas capas. Esta respuesta modular del paquete existente se toma para la estimación de su Número Estructural Efectivo (SN_{eff}), es decir, sin incluir por otra vía específica la presencia de la capa de refuerzo por sobre el paquete existente (AASHTO, 1993). Esto es lo que justifica, a entender de los autores, la aplicación de la deflexión directamente sobre la base para establecer el espesor de la capa asfáltica de rodamiento, lo

que por otro lado se ha podido constatar ha sido práctica llevada adelante en forma exitosa en experiencias relacionadas (George, 2006). De todos modos, para reducir la probabilidad de incluir un error en tal sentido, atribuible a una marcada modificación de la rigidez del paquete más allá de la evidentemente considerada por quienes han desarrollado la metodología de retrocálculo según AASHTO93, se ha decidido que el trabajo a efectuarse posea sólo aplicabilidad para la estimación de espesores de pavimentación reducidos, como sería el caso de los correspondientes a vías urbanas de segundo y tercer orden. Para establecer a ciencia cierta el límite de su validez se deberán efectuar en un futuro análisis en particular, los cuales escapan a la finalidad de este trabajo.

Así planteada la situación, mediante la aplicación del retrocálculo según AASHTO93 para la finalidad propuesta, se determinaría el Módulo Efectivo hasta la capa de base terminada (E_p), lo cual permite estimar su número estructural efectivo SN_{eff} , y el Módulo Resiliente de la subrasante (Mr), que posibilita estimar el Número Estructural requerido (SN). Por diferencia entre ambos números estructurales se establece cuál es la solución de capa de rodamiento que corresponde entre las alternativas especificadas (EICAM, 1998).

Pero existe un claro factor limitante para la aplicación de la citada metodología de trabajo, el cual reside en el hecho de que no resulta económicamente justificable el contar con un equipo FWD en forma constante en obra para ser utilizado con este único fin. Este aspecto se puede resolver si se instrumenta adecuadamente el empleo de un equipo de reciente disponibilidad a nivel regional, como es el caso del Light Weight Deflectometer (LWD). El mismo resulta mucho más económico que el FWD, tanto que su precio justificaría su uso en la aplicación planteada. Pero la metodología de retrocálculo de AASHTO93 ha sido desarrollada considerando los condicionantes propios del FWD. Es decir, los modelos son de aplicación cuando la sollicitación dinámica ejercida es del orden de los 40 KN (correspondiente a la mitad del eje de 80 KN utilizado de referencia) lo cual no sucede con el LWD, en donde la sollicitación es mucho menor (aproximadamente 7 KN para la masa de 10 kg).

Desde el LEMaC, se ha planteado un proyecto I+D en busca de obtener las correspondientes correlaciones que permitan instrumentar el uso de las mediciones con el LWD, para la aplicación del retrocálculo según AASHTO93. Se presentan los resultados obtenidos.

3. Metodología

Para posibilitar la mejor comprensión del trabajo por parte de aquellos que no se encuentran familiarizados con los conceptos volcados, se efectúa a continuación una breve reseña en tal sentido.

3.1. Determinación del módulo resiliente en laboratorio

Cuando un vehículo circula sobre un pavimento sus ruedas transmiten cargas que generan, al interior de la estructura de ese pavimento y al suelo de fundación, un estado de esfuerzos que a su vez induce a un estado de deformaciones. Sólo parte de la deformación total generada se recupera al cesar la sollicitación aplicada. Si se extrae un elemento diferencial

de un paquete estructural y se estudian sus condiciones de borde y sollicitación, se puede ver que éste se encuentra bajo dos acciones, una de ellas está formada por el confinamiento brindado por el material circundante y su grado de compactación, y la otra es una sollicitación dinámica ocasionada por la presión producida por la impronta del neumático de los ejes que conforman el tránsito (Moreno Rubio y Martínez Reguero, 2005). Bajo este estado de carga dinámica es necesario definir una relación entre las tensiones y las deformaciones, nombrada en la bibliografía como Módulo Resiliente (M_r) que es básicamente aquella que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables y se calcula según la Ecuación 1.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

Donde:

σ_d = Esfuerzo desviante

ε_r = Deformación Específica Resiliente Axial

La obtención del M_r en laboratorio se realiza con una cámara triaxial que posibilita modelar el confinamiento lateral que le brinda el suelo circundante en el campo y un dispositivo neumático para aplicar el esfuerzo desviante que simula las acciones del tránsito.

Ahora bien, ante los habituales materiales no ligados viales con comportamiento no lineal, si el M_r se calcula como indica la Ecuación 1 queda claro que el mismo varía para distintos σ_d , por lo que este concepto le da origen a lo que se denominan ecuaciones constitutivas, que pueden representarse con diversos modelos de ajuste. Entonces, ensayando un material compactado a una densidad prefijada y con una humedad establecida, para distintas combinaciones de confinamiento y esfuerzo desviante, se puede obtener una ecuación constitutiva propia de ese material en esas condiciones, mediante el ajuste por regresión de los parámetros de calibración a un modelo dado (ICG, 2011).

3.2. Determinación del módulo resiliente en campo

Esta tarea se realiza por medio del empleo de deflectómetros de impacto, siendo el más comúnmente utilizado el FWD. El mismo viene provisto con una cantidad variable de geófonos ubicados a diversas distancias del punto de aplicación de la carga, lo cual permite la obtención del cuenco de deflexión. Debido a sus características es empleado en la evaluación estructural no destructiva de vías ya pavimentadas, generalmente cuando se analizan sus requerimientos en cuanto a rehabilitación con capas de refuerzo. Este empleo justifica su valor elevado, dado que con un FWD pueden efectuarse mediciones en forma continua a lo largo de varios kilómetros al día, siendo trasladado constantemente a distintos tramos en análisis.

En los últimos años han aparecido en el mercado regional Deflectómetros de Impacto más livianos y económicos, denominados comúnmente LWD, como el que se observa en la Figura 1. En un principio se han empleado en la verificación de la compactación de capas de base, debido a que por ejercer cargas mucho menores que las del FWD, no pueden ser

empleados sobre capas asfálticas o incluso sobre capas de base muy fuertemente cementadas (Fleming et al, 2000).



Figura 1. Light Weight Deflectometer (Fuente: TERRATEST)

3.3. Empleo de retrocálculo en función de las deflexiones

Conceptualmente, el retroanálisis de deflexiones consiste en determinar los valores de los módulos de las capas de un pavimento, que mejor modelan la forma y magnitud del cuenco de deflexiones medidas. Los módulos determinados de esta manera se consideran representativos de la respuesta estructural del pavimento, aunque puedan luego ser corregidos por el tipo de material y ubicación en el paquete (ICG, 2011).

El método de retroanálisis propuesto por AASTHO93 permite determinar el M_r de la subrasante y el Módulo Efectivo del Pavimento (E_p), datos que pueden ser luego utilizados en la evaluación de la capacidad estructural del pavimento (AASHTO, 1993). El método se basa en la hipótesis de que si existe una distancia lo suficientemente importante entre el punto O de aplicación de la carga P y el punto i donde se mide la deflexión (r_i), la misma sólo será función del M_r de la subrasante, siempre y cuando esa distancia no sea lo suficientemente importante para que el error de medición en la deflexión tenga incidencia, ya que a mayor distancia menor es la deflexión producida. Con este criterio la deflexión por debajo del punto O de aplicación de la carga será función de la relación E_p/M_r , conociendo M_r puede entonces calcularse E_p . En la Figura 2 se observa el esquema modelizado para el retrocálculo.

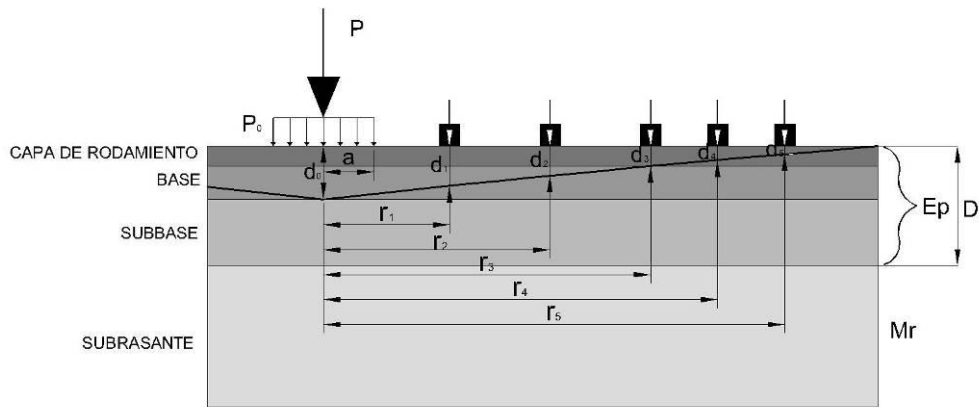


Figura 2. Esquema para análisis de retrocálculo (Fuente: Elaboración propia).

En conclusión, existen equipos como el LWD que permiten determinar deflexiones ante cargas dinámicas de manera similar a lo efectuado por el FWD, que serían aplicables mediante una correlación al modelo de retrocálculo propuesto por AASHTO93, en la pavimentación de paquetes estructurales de dos capas (bases y subrasante) mediante una adaptación en el procedimiento de empleo para suplantar las mediciones registradas por los geófonos del FWD (que se explica en el punto “Estructura de trabajo para el desarrollo de la metodología”).

En la recopilación bibliográfica se han hallado estudios que intentaron arribar a estas correlaciones. Uno de los estudios iniciales permitió arribar a la Ecuación 2 (Fleming et al, 2002), presentando un coeficiente de determinación R^2 de 0,6.

$$E_{FWD} = 1,031 \cdot E_{LWD} \quad (2)$$

Otros estudios han determinado que el módulo con el LWD se encuentra entre 0,65 y 1,60 veces el módulo con FWD (Van Gorp et al, 2000). Estudios combinados más recientes entre la USDA Forest Service, la US Army ERDC Cold Regions Laboratory, el New Hampshire DOT y la University of Maine, sobre caminos de bajo tránsito con o sin pavimentos, han arribado a una correlación de aproximadamente 0,7 (Kestler et al, 2004). Nazzal ha obtenido mejores resultados, habiendo arribado a una correlación de 0,94 con el modelo de la Ecuación 3 (Nazzal, 2003).

$$E_{FWD} = 0,97 \cdot E_{LWD} \text{ para } 12,5MPa < E_{LWD} < 865MPa \quad (3)$$

Se observa como en todos los casos se ha tendido a la obtención de un único coeficiente de correlación. Pero en realidad, al contarse con cargas dinámicas diferentes entre el FWD y el LWD, se ejercerían distintos tensores desviadores, los cuales se relacionan con la respuesta modular en forma no necesariamente proporcional. Por lo tanto, ante materiales con gráficas de relación M_r vs. σ_d con distintos tipos y grados de curvatura correspondería emplear distintas constantes de correlación (Rivera et al, 2012). Lo citado conlleva a que sea más adecuado pensar en modelos de correlación entre ambas determinaciones y no en una correlación constante, de los cuales su obtención se constituye en el objetivo del trabajo desarrollado.

3.4. Estructura de trabajo para la obtención de los modelos

Se contempló sobre pistas de prueba con diversas subrasantes y bases, el empleo del LWD y la correlación de los resultados con las deflectometrías FWD simuladas mediante la teoría de las capas elásticas, a partir de los resultados de muestras ensayadas para la obtención de módulo resiliente en laboratorio. Se instrumentó el empleo de estas simulaciones y no de la medición directa, por no contar el grupo de estudio con posibilidades de acceder a tal equipamiento durante las tareas en obra.

Se requirió así la posibilidad de acceder a vías recién construidas hasta el nivel de base, con distintos materiales constituyentes y sobre subrasantes de diferente aptitud vial. Dado que el LEMaC planteó el uso de la metodología de correlación a desarrollarse inicialmente en el ámbito en el que se desenvolvía, siendo el responsable de los controles y asesorías en pavimentación de la totalidad de la ciudad de La Plata, planteándose a su Dirección de Pavimentación la posibilidad de generar un convenio de ayuda mutua en tal sentido. Se arribó así a un acuerdo institucional, en donde el LEMaC efectuó los estudios, teniendo a La Plata como primer destinatario de los resultados de los mismos, y el Municipio incluyó en sus planes de pavimentación sobre subrasantes de diverso aporte estructural, la materialización de diversas tipologías de bases (con su correspondiente variabilidad de aporte estructural). De esta manera se contó con el espectro estructural que permitió la realización de las tareas previstas.

Pero hubo otro aspecto de relevancia que condicionó lo analizado. Este residía en el hecho de que si bien se hallaron en el mercado equipos de LWD provistos con geófonos, de manera similar a los FWD, estos presentaban un costo posiblemente por encima de los justificables para la aplicación planteada, con una complejidad instrumental que requería de ciertos cuidados especiales.

Con costos muy inferiores a estos últimos se hallaron equipos LWD no provistos de geófonos, que resultaron más adecuados técnico/económicamente a la finalidad planteada, pero requirieron de una forma de medición especialmente diseñada para la aplicación de la metodología de retrocálculo. Se contempló así, en lugar de la generación de una única carga y la medición de deformaciones a distinta distancia, la generación de una carga sobre la superficie de la base terminada, la excavación de ésta hasta la subrasante y la generación de una nueva carga en este nivel, tal como se observa en la Figura 3, considerando que la respuesta modular no era disturbada de esta forma.

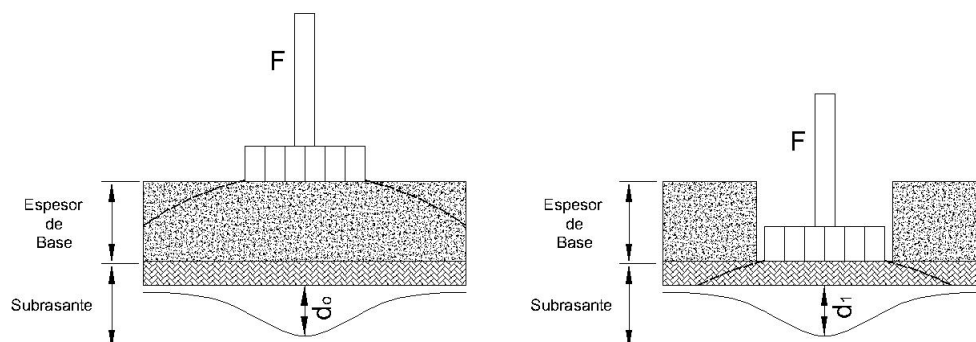


Figura 3. Forma de medición propuesta (Fuente: Elaboración propia)

Mediante estos pasos se registró una deflexión $d_{0_{LWD}}$ sobre la base y un Mr_{LWD} a nivel de subrasante, utilizables mediante las debidas correlaciones en la determinación del E_p y del Mr_{FWD} para retrocálculo, respectivamente. Es justamente el hecho de que estas mediciones fueran afectadas por una respectiva correlación lo que dio validez a la metodología, ya que cualquier discusión planteada en torno a la misma quedó excusada en el hecho de que en el retrocálculo intervienen mediciones corregidas en función de lo que hubiera arrojado el FWD. Cabe señalar que en la Figura 3 se esquematizó un paquete bicapa (subrasante y base) a ser complementado para establecer el paquete tricapa con la capa de refuerzo. Debe entenderse allí, y en todo este documento, que la capa de base puede estar constituida por una o más capas.

Dado que las deflexiones con el FWD se obtuvieron por simulación y no por su medición directa, apareció como una tercera componente el empleo de la teoría de las capas elásticas, mediante la cual al considerar las curvas constitutivas de la base y subrasante, ante una carga de 40 KN en una impronta de radio 15 cm, permitió obtener los desplazamientos y respuestas modulares registrables con el FWD (Giovanon y Pagola, 2005). Esto se realizó mediante la aplicación del programa BackVid, del cual se ve en la Figura 4 una pantalla de su aplicación.

El contar con los valores de cálculo esperables para la deflexión $d_{0_{FWD}}$ a nivel de base y el Mr_{FWD} , permitió la aplicación de las Ecuaciones 4 y 5 finales.

$$Mr_{FWD} = \alpha.Mr_{LWD} \quad (4)$$

$$d_{0_{FWD}} = \beta.d_{0_{LWD}} \quad (5)$$

Donde:

Mr_{FWD} = Módulo resiliente obtenible con el FWD para la subrasante

Mr_{LWD} = Módulo resiliente obtenido con el LWD para la subrasante

$d_{0_{FWD}}$ = Deflexión obtenible con el FWD sobre la base

$d_{0_{LWD}}$ = Deflexión obtenida con el LWD sobre la base

$\alpha;\beta$ = Coeficientes de correlación resultantes

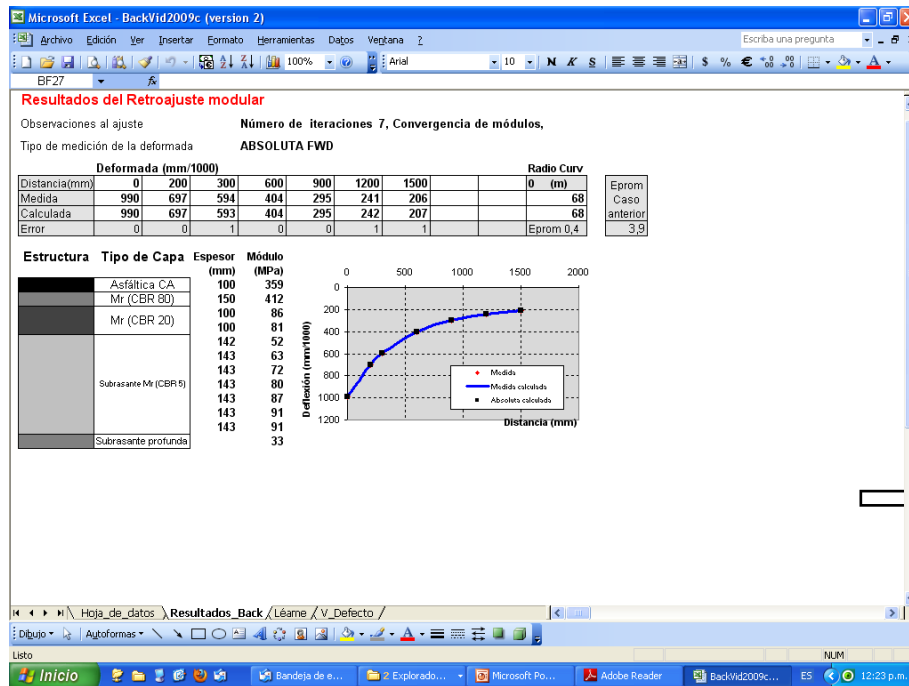


Figura 4. Pantalla del programa BackVid empleado (Fuente: Elaboración propia)

En resumen, la metodología de estudio fue:

- Selección de las vías a ser auscultadas con la combinación de subrasantes de diverso aporte estructural con distintas tipologías de bases.
- Realización sobre la base terminada del análisis con LWD para determinar los d_{0LWD} .
- Determinación con densímetro nuclear de la densidad y humedad de la capa de base, retiro de la misma en una superficie de 0,5 m por 0,5 m y toma de una muestra.
- Determinación con el LWD del Mr_{LWD} .
- Determinación con densímetro nuclear de la densidad y humedad de la subrasante y toma de una muestra.
- Remoldeo en laboratorio de las muestras de subrasante y base con la humedad y densidad medidas en campo.
- Determinación en laboratorio de las curvas constitutivas de cada una de las muestras de base y subrasante tomadas.
- Inclusión de las curvas constitutivas en el modelo de capas elásticas, mediante BackVid, simulación de la carga de 40 KN y determinación de los Mr_{FWD} y d_{0FWD} .
- Según las leyes de variación observadas, obtención de los parámetros α y β de correlación o modelos de correlación no lineal correspondientes.

4. Resultados

De acuerdo a las tareas planteadas, en base al convenio alcanzado con la Municipalidad de La Plata, se procedió a ejecutar los tramos de prueba propuestos para su correspondiente análisis. Se obtuvieron 12 tramos de prueba diferentes, de los cuales para los materiales constituyentes se determinaron las humedades y densidades in situ, efectuándose luego en laboratorio el ensayo de módulo resiliente AASHTO T307-99(2003). En la Figura 5 se observan imágenes recolectadas durante las pruebas de campo.



Figura 5. Imágenes recolectadas durante el análisis de los primeros tramos de prueba

Con las series de resultados para cada material en cuanto a M_r , σ_d y σ_3 obtenidos, se realizaron las regresiones múltiples no lineales para obtener los coeficientes de ajuste A , B y C en cada caso del modelo de ecuación constitutiva utilizado por el sistema BackVid, que se observa en la Ecuación 6.

$$M_r = A \cdot 0,1 \cdot \left(\frac{\theta}{0,1} \right)^B \cdot \left(\frac{\sigma_d}{0,1} \right)^C \quad (6)$$

Donde:

$$\theta = \sigma_d + 3 \cdot \sigma_3$$

σ_3 = Tensión de confinamiento

Con estos datos y configurando el semi-eje equivalente en el BackVid se simularon las deflexiones obtenibles con el FWD, para arribar a los $d_{0_{FWD}}$ y $M_{r_{FWD}}$ de cada punto analizado.

Se procedió entonces a efectuar el cálculo de los coeficientes de conversión para arribar en cada caso desde el d_{0LWD} y Mr_{LWD} al d_{0FWD} y Mr_{FWD} , respectivamente, según la forma de las Ecuaciones 4 y 5.

Pudo observarse entonces, y tal cuál ya había sido previsto, que los coeficientes obtenidos no resultaron constantes, por lo que se procedió a determinar su ley de variación en función del incremento de la correspondiente variable independiente. En las siguientes figuras (Figura 6 a 9) puede observarse como el mayor grado de ajuste (mayor coeficiente de determinación) se alcanza con regresiones logarítmicas para los d_0 y lineales para los M_r . Las gráficas han sido obtenidas para las masas de 10 kg y 15 kg con las que viene provisto el equipo, siendo según el fabricante el rango óptimo de empleo módulos de 15 a 70 MPa para la masa de 10 kg, y de 70 a 120 MPa para la masa de 15 kg.

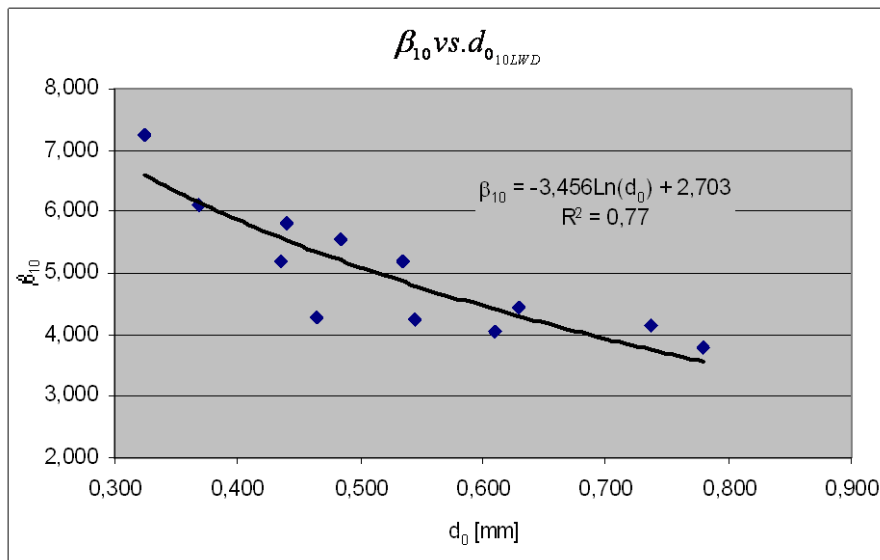


Figura 6. Gráfica coeficiente vs. d_0 para masa de 10 kg

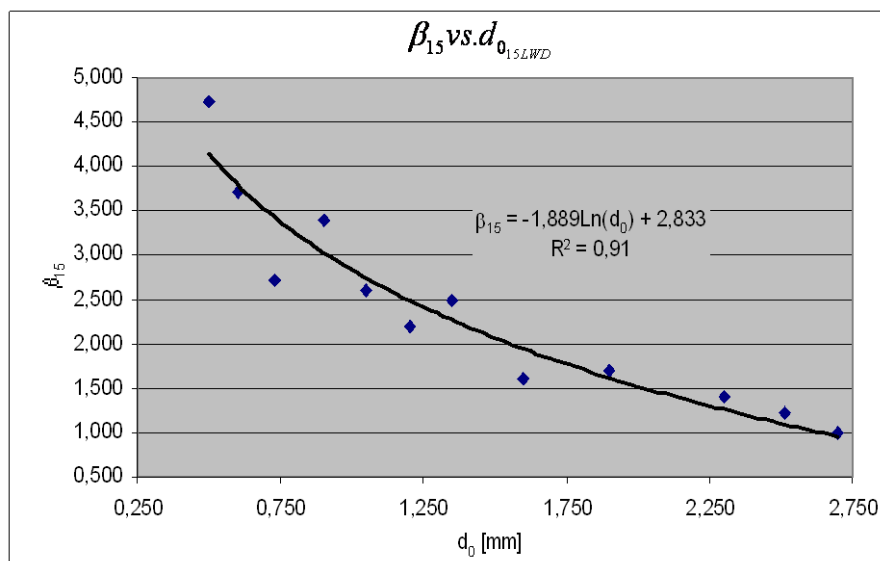


Figura 7. Gráfica coeficiente vs. d_0 para masa de 15 kg

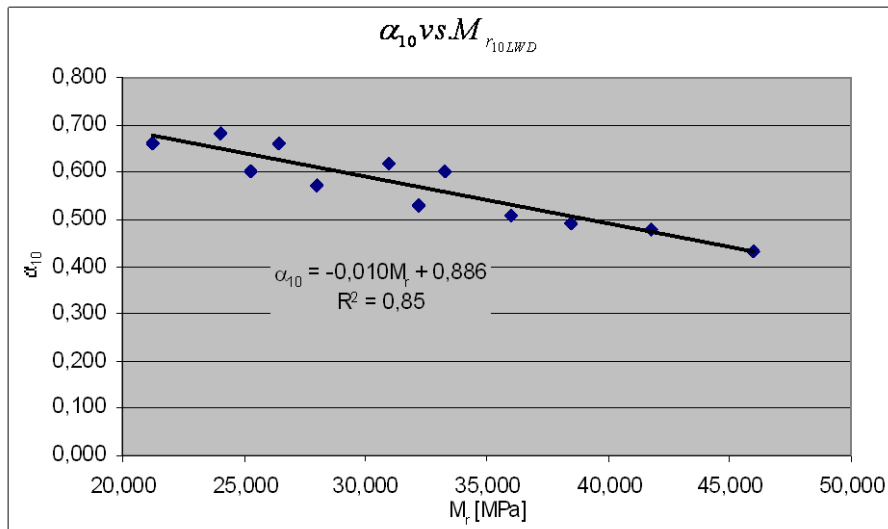


Figura 8. Gráfica coeficiente vs. M_r para masa de 10 kg

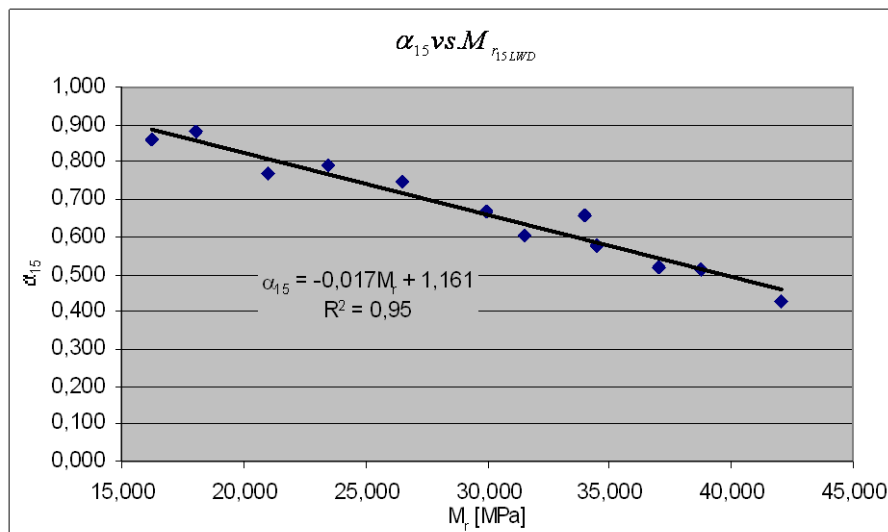


Figura 9. Gráfica coeficiente vs. M_r para masa de 15 kg

5. Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos permitieron arribar en cada caso a funciones de regresión que resultaron estadísticamente válidas, obteniéndose coeficientes de determinación de van desde 0,77 a 0,95.

Se observa además que en el caso de las relaciones entre los módulos resilientes de la subrasante obtenibles con ambos equipos (Figura 9 y 10), la regresión lineal ofrece una pendiente negativa muy baja (del orden del 0,01), lo cual hace que en el rango bajo de módulos la correlación sea casi constante y en valores cercanos a los hallados en los antecedentes de otros autores citados (aproximadamente 0,90 y 1,15 para masa de 10 kg y 15 kg, respectivamente). Este aspecto en cierta forma valida los resultados obtenidos, al menos en ese entorno modular.

6. Conclusiones

Se arriba a las siguientes conclusiones:

- De acuerdo a los tramos de prueba, se ha podido arribar a coeficientes de correlación α_{10} y α_{15} aplicables en la expresión $Mr_{FWD} = \alpha \cdot Mr_{LWD}$, a partir de mediciones de $M_{r_{10LWD}}$ y $M_{r_{15LWD}}$ (realizadas con la masa de 10 kg y 15 kg del equipo LWD), calculables por medio de las Ecuaciones 7 y 8, respectivamente.

$$\alpha_{10} = -0,010 \cdot M_{r_{10LWD}} + 0,886 \quad (7)$$

$$\alpha_{15} = -0,017 \cdot M_{r_{15LWD}} + 1,161 \quad (8)$$

- De acuerdo a los tramos de prueba, se ha podido arribar a coeficientes de correlación β_{10} y β_{15} aplicables en la expresión $d_{0_{FWD}} = \beta \cdot d_{0_{LWD}}$, a partir de mediciones de $d_{0_{10LWD}}$ y $d_{0_{15LWD}}$ (realizadas con la masa de 10 kg y 15 kg del equipo LWD), calculables por medio de las Ecuaciones 9 y 10, respectivamente.

$$\beta_{10} = -3,456 \cdot \ln d_{0_{10LWD}} + 2,703 \quad (9)$$

$$\beta_{15} = -1,889 \cdot \ln d_{0_{15LWD}} + 2,833 \quad (10)$$

- La metodología de aplicación a la que se arriba se anexa la final del documento.

7. Referencias

- AASHTO (1993). "Guide for design of pavement structures 1993". American Association of State Highway and Transportation Officials, ISBN 1-56051-055-2, EEUU.
- EICAM (1998). "Curso de actualización de diseño estructural de caminos, método AASHTO93". Universidad Nacional de San Juan, Argentina.
- Fleming P.R., Lambert J.P., Rogers C.D.F. y Frost M.W. (2002). "In-Situ assessment of stiffness modulus for highway foundation during construction". Loughborough University, Loughborough, Reino Unido.
- Fleming P.R., Rogers C.D. y Frost M.W. (2000). "A Comparison of Devices for Measuring Stiffness In-Situ". *5th Int. Symp. on Unbound Aggregates in Roads (UNBAR 5)*, EEUU.
- George K.P. (2006). "Portable FWD (Prima 100) for in situ subgrade evaluation". Report FHWA/MS-DOT-RD-06-179, University of Mississippi, EEUU.

- Giovanon O.H., Pagola M. (2005). "Backcalculation of Moduli using BACKMOD Software". *International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, University of Ulster, Irlanda.
- ICG (2011). "Guía de diseño mecanístico-empírico de pavimentos. Manual práctico". Instituto de la Construcción y Gerencia. Autorizada por AASHTO (PT-56), Perú.
- Kestler M., Eaton R., Berg R., Steinert B., Smith C., Aldrich C. y Humphrey D. (2004). "Handheld in-situ testing devices for estimating the stiffness of trails and low volume roads". Transportation System Workshop, Ft. Lauderdale, EEUU.
- Moreno Rubio J., Martínez Reguero A.H. (2005). "Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas". Trabajo académico, Universitat Politècnica de Catalunya, <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/3252>, España.
- Nazzal M.D. (2003). "Field Evaluation of In-Situ Test Technology for QC/QA During Construction of Pavement Layers and Embankments". M.S. Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge LA, EEUU.
- NCHRP (2004). "Guide form mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures". National Research Board, 1-37A team, EEUU.
- Rivera J.J., Brizuela L.G., Alderete N. y Villanueva M.R. (2012). "Avances en el desarrollo de la metodología para valoración por retrocálculo de capas no ligadas mediante la utilización del Light Weight Deflectometer" (T014). XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito (ISBN 978-987-28682-0-8), Argentina.
- Van Gorp C., Groenendijk J. y Beuving E. (2000). "Experience with various types of foundation tests". *5th Int. Symp. on Unbound Aggregates in Roads (UNBAR 5)*, EEUU.

Metodología LEMaC para determinación de aporte estructural efectivo en vías sin pavimentar mediante LWD y retrocálculo según AASHTO93 (LEMaC-LWD)

ALCANCES

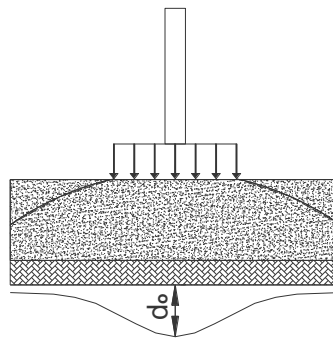
La metodología es aplicable para la determinación del número estructural efectivo (SN_{ef}) en mm en vías no pavimentadas en donde existe una capa no ligada (o conjunto de ellas) de material aportado sobre la subrasante.

ELEMENTOS

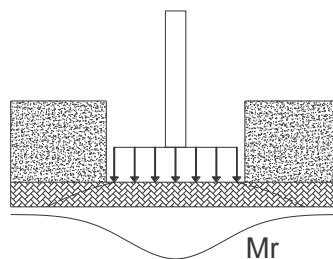
Deflectómetro de impacto liviano (LWD), provisto con masas de 10 kg y/o 15 kg..

METODOLOGIA

- Determinación de la deflexión sobre la superficie terminada ($d_{0_{LWD}}$) con LWD.



- Excavar en una superficie de 50x50 cm hasta el nivel subrasante.
- Determinación del espesor del paquete existente actual, desde el nivel de subrasante hasta la superficie terminada (D).
- Determinación del módulo resiliente de la subrasante (Mr_{LWD}) con LWD.



- Corrección de las lecturas LWD a las obtenibles con el deflectómetro de impacto de referencia (FWD), utilizando las siguientes expresiones en función de la masa utilizada.

$$Mr_{FWD} = \alpha \cdot Mr_{LWD}$$

$$d_{0_{FWD}} = \beta \cdot d_{0_{LWD}}$$

Donde:

Mr_{FWD} = Módulo resiliente obtenible con el FWD para la subrasante

Mr_{LWD} = Módulo resiliente obtenido con el LWD para la subrasante

$d_{0_{FWD}}$ = Deflexión obtenible con el FWD sobre la base

$d_{0_{LWD}}$ = Deflexión obtenida con el LWD sobre la base

$\alpha; \beta$ = Coeficientes de correlación resultantes en función de los Mr_{LWD} y $d_{0_{FWD}}$ medidos

$$\alpha_{10} = -0,010 \cdot Mr_{10_{LWD}} + 0,886$$

$$\alpha_{15} = -0,017 \cdot Mr_{15_{LWD}} + 1,161$$

$$\beta_{10} = -3,456 \cdot \ln d_{0_{10_{LWD}}} + 2,703$$

$$\beta_{15} = -1,889 \cdot \ln d_{0_{15_{LWD}}} + 2,833$$

- Dar valor en forma iterativa al módulo combinado de las distintas capas de la estructura del paquete estructural (E_p) hasta equilibrar la siguiente ecuación.

$$d_{0_{FWD}} = 1,5 \cdot p \cdot a \left\{ \frac{1}{Mr_{FWD} \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{E_p}{Mr_{FWD}}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\}$$

Donde:

a = radio del plato de carga = 15 cm

p = presión del contacto del semieje de referencia (40 kN) = 1,13 MPa

- Efectuar el cálculo del SN_{ef} mediante la siguiente expresión.

$$SN_{ef} = 0,0024 \cdot D \cdot (E_p \cdot 1000)^{1/3}$$

Donde:

D = espesor total desde subrasante hasta superficie de pavimento (mm)

E_p = modulo combinado (MPa)