

UTILIZACIÓN SUSTENTABLE DE LOS MATERIALES DISPONIBLES EN VÍAS URBANAS NO PAVIMENTADAS A PARTIR DE SU AUSCULTACIÓN MEDIANTE LWD

J. Rivera¹, L. Ricci², L. Brizuela³, N. Alderete⁴

¹ Sub-Director LEMaC. Docente Investigador UTN. Director del Proyecto. E-mail: jrivera@frlp.utn.edu.ar

² Integrante LEMaC. Docente Investigador UTN.

³ Integrante LEMaC.

⁴ Integrante LEMaC.

LEMaC, Centro de Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata.

Av. 60 y calle 124 (1900), La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Tel/Fax: +54-221-4890413 – E-mail: lemac@frlp.utn.edu.ar – Web: www.frlp.utn.edu.ar/lemac

RESUMEN

En los últimos años han tomado relevante importancia las consideraciones ambientales en todos los aspectos que hacen al desarrollo de una comunidad, y la ingeniería vial no permanece ajena a estas cuestiones.

La problemática de la escasez de recursos se pone en evidencia constantemente, razón por la cual es importante desarrollar métodos sustentables que tengan en consideración el menor impacto ambiental posible. Justamente este es el principal objetivo del presente trabajo desarrollado en el LEMaC, Centro de Investigaciones Viales de la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina, que busca demostrar cómo los aportes de materiales sobre la subrasante natural que el municipio y los propios vecinos realizan en vías urbanas no pavimentadas tienen cierta aptitud vial aprovechable.

Con esta premisa se plantea el empleo del Light Weight Deflectometer (LWD), equipo que permite la medición del módulo resiliente de capas no ligadas en campo, con el objeto de considerar dichos aportes estructurales existentes y disminuir la utilización de materiales de canteras, aprovechando al máximo el material disponible. Para validar el empleo de este equipamiento se requiere realizar ensayos de correlación entre los valores obtenidos y el ensayo de módulo resiliente de laboratorio.

Mediante el trabajo, además, se desarrolla una metodología de utilización en campo del LWD adaptada a las condiciones locales y a los equipos disponibles. Logrando de esta manera obtener como resultado los parámetros necesarios para su posterior utilización en los actuales métodos de cálculo empírico-mecanicistas. El trabajo se basa en la optimización del procedimiento de análisis, obteniéndose menores costos de proyecto y de obra, teniendo en cuenta que la implementación del LWD para la obtención del módulo resiliente in situ satisface tanto la ecuación técnica como la económica. Todo esto está firmemente apoyado en el concepto de satisfacer las necesidades actuales sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

1. INTRODUCCIÓN

La práctica habitual en la pavimentación con mezcla asfáltica de vías urbanas en la ciudad de La Plata (Buenos Aires, Argentina), como en la mayoría de los Municipios de la región, sobre todo con volúmenes medios o bajos de tránsito (arterias de la red secundaria o terciaria), es la de establecer un paquete estructural tipo multicapas (generalmente con una única carpeta asfáltica, más un mejorado de la subrasante, subbases y/o bases).

Al dimensionar este paquete estructural tipo, el proyectista debe considerar que será aplicado sobre diversas tipologías de suelos de subrasante. Además, según los factores limitantes establecidos por el 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, secciones en donde sólo se deberá efectuar un perfilado superficial por coincidir la subrasante con la superficie actual, y secciones en las cuales se deberán 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, por ejemplo el 85 % percentil (Rivera, 2008).

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 tengan paquetes que presenten un rango de valores de aporte estructural, aún para un único paquete estructural diseñado. Otro de estos aspectos 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.

Todo lo hasta aquí citado termina dando lugar a paquetes estructurales sobredimensionados, en gran parte de las vías a ser pavimentadas, ya que se utiliza un programa de pavimentación en particular para distintas condiciones de borde. A su vez no se debe dejar de lado las correspondientes implicancias económicas que esto conlleva, generando innecesariamente un mayor impacto ambiental.

La solución a los inconvenientes puestos de manifiesto se obtiene 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 capas de subbase y base, al momento de esta última ser terminada.

De entre estas cuestiones hay una que se resuelve en forma sencilla para los propósitos de este estudio, ya que el tránsito puede estimarse rápidamente si se establecen diversos niveles del mismo, en función de ciertas particularidades del entorno de la vía en cuestión, por medio de la Metodología LEMaC para Estimación Expeditiva del TMDA en la Región Pampeana (Rivera, 2007).

Las otras dos cuestiones pueden resolverse mediante mediciones con el Falling Weight Deflectometer (FWD) sobre la base y la aplicación de la metodología de retrocálculo según AASHTO93. De esta manera se determina el módulo efectivo E_p de las capas de subbase y base, que permite la determinación del número estructural efectivo SN_{eff} , y del módulo resiliente Mr de la subrasante, que permite 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.

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 de FWD en forma constante en obra para ser utilizado con esta única aplicación. 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) tal cual se da con el FWD pero no con el LWD, en donde la sollicitación es mucho menor.

Desde el LEMaC, Centro de Investigaciones Viales de la Universidad Tecnológica Nacional La Plata, se han advertido tales situaciones, por lo cual 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 en esta oportunidad los primeros avances registrados en tal sentido.

2. CONCEPTOS PREVIOS

2.1. Determinación de Módulo Resiliente en Laboratorio

Cuando los materiales son considerados bajo las hipótesis de materiales homogéneos y elásticos, los parámetros que relacionan las tensiones con las deformaciones son el Modulo de Elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (μ) propios de cada material. Esto es aplicable a infinitas situaciones, pero no para los materiales que normalmente se utilizan para conformar los paquetes de pavimento, sobretodo por el tipo de sollicitación a la que se ven sometidos los mismos. 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. Esto implica que, en rigor, estos materiales no presenta un comportamiento lineal elástico. Es decir, 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. Bajo este estado de carga dinámica no se pueden considerar a los materiales como elásticos y por lo tanto es necesario definir una relación diferente entre las tensiones y las deformaciones, dicha relación es nombrada en la bibliografía como Módulo Resiliente (Mr) que es básicamente aquella que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables (George, 2006) 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 Mr en laboratorio se realiza con un dispositivo como el de la Figura 1, que cuenta 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.



Figura 1. Equipo para determinación de Módulo Resiliente

Ahora bien, si el M_r se calcula como indica la Ecuación 1 queda claro que el mismo varía para distintos σ_d , entonces para diferentes condiciones de borde un mismo material dará M_r diferentes, 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. El modelo en tal sentido que, por ejemplo, emplea la metodología ME-PDG es el de la Ecuación 2 (NCHRP, 2004).

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{octa}}{P_a} - 1 \right)^{k_3} \quad (2)$$

Donde:

M_r = Módulo Resiliente, psi

θ = Invariante de Tensiones = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

σ_1 = Tensión Principal mayor

σ_2 = Tensión Principal intermedia (σ_3 para el ensayo de M_R en probetas cilíndricas)

σ_3 = Tensión Principal menor (presión de confinamiento)

τ_{octa} = esfuerzo cortante octaédrico = $1/3 \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$

P_a = Presión atmosférica

k_1 = Constante propia del material

k_2 = Constante propia del material

k_3 = Constante propia del material

El ajuste consiste en determinar por regresión los parámetros k_1 , k_2 y k_3 , y el coeficiente de determinación R^2 , el cual debe ser igual o superior a 0,9 para que la ecuación sea representativa (NCHRP, 2004).

Finalmente en suelos finos, es decir la totalidad de las subrasantes existentes en la pavimentación urbana correspondiente al Partido de la Plata y a la inmensa mayoría de las localidades que conforman la región central de la Argentina, los modelos resultantes son del tipo que se observan en la Figura 2.

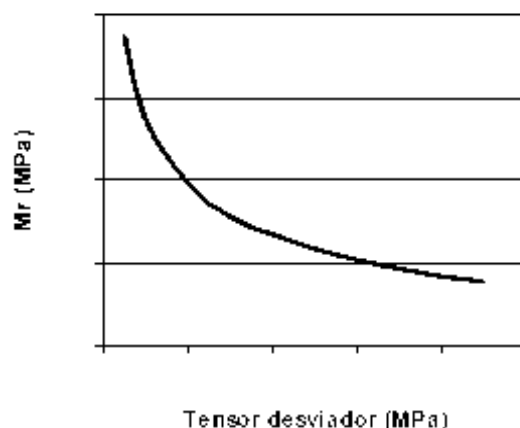


Figura 2. Forma típica del modelo de M_r en suelos plásticos, para θ constante

2.2. Determinación del Módulo Resiliente en Campo

Uno de los instrumentos que permiten la obtención de los módulos resilientes en campo, sobre una traza existente, son los Deflectómetros de Impacto. En términos generales un Deflectómetro de Impacto es un equipo que mide las deformaciones verticales (cuenco de deflexiones) generadas por una carga de impacto aplicada sobre la superficie de un pavimento. Este equipo es capaz de aplicar una carga que modela en forma adecuada la magnitud y características dinámicas de las cargas que imponen los vehículos sobre los pavimentos y mide la respuesta de éstos en forma bastante precisa.

El Deflectómetro de Impacto más comúnmente utilizado es el Falling Weight Deflectometer (FWD). Este equipo simula el paso de un eje de 80 KN (utilizado de referencia en la mayoría de las metodologías de cálculo de pavimentos) por medio de la aplicación de la carga correspondiente al eje en cada extremo (40 KN). 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 varios kilómetros al día.

En los últimos años han aparecido en el mercado regional Deflectómetros de Impacto más livianos y económicos, denominados comúnmente Light Weight Deflectometer (LWD), como el que se observa en la Figura 3. En un principio estos se han propuesto para su empleo 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).

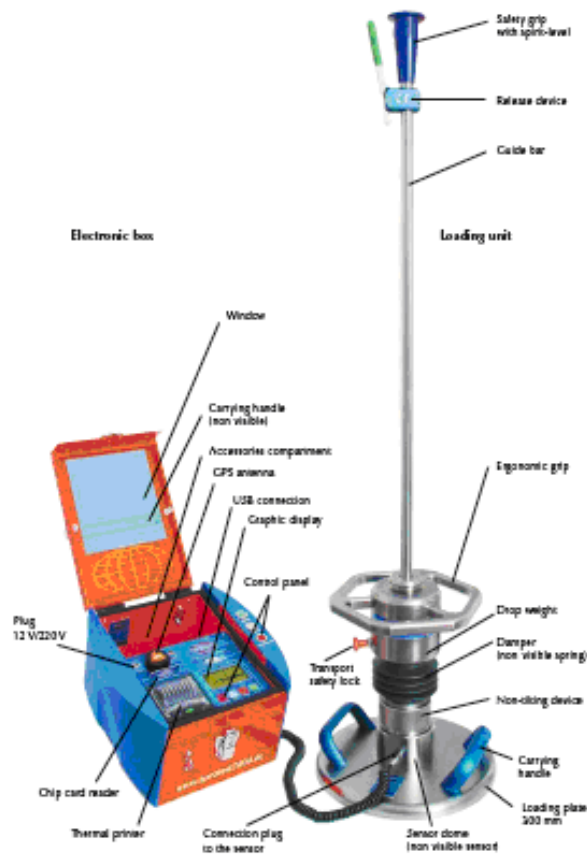


Figura 3. Light Weight Deflectometer

2.3. 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.

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). En este método el pavimento se modela como un conjunto de tres capas, una semi-infinita correspondiente a la subrasante, otra correspondiente a todas las capas del pavimento sobre la subrasante y la tercera correspondiente a la capa de refuerzo a determinarse. 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 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 4 se observa el esquema modelizado para el retrocálculo.

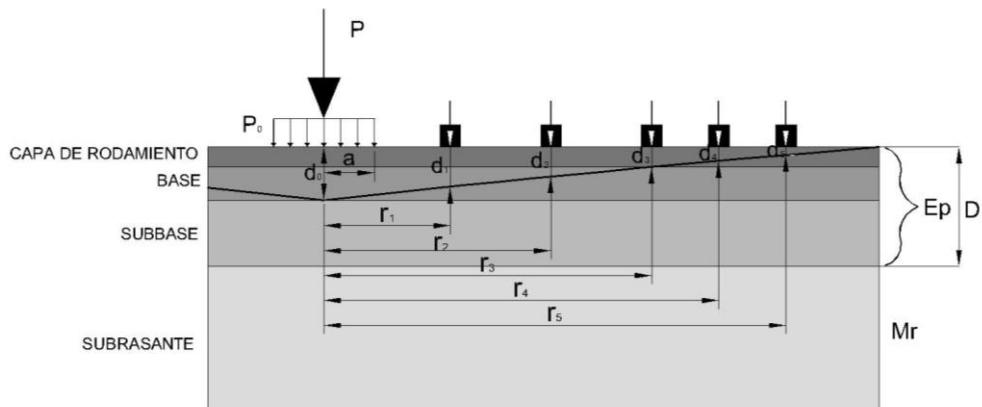


Figura 4. Esquema para análisis de retrocálculo

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 al modelo de retrocálculo propuesto por AASHTO93. Pero en suelos plásticos, dado lo analizado en la Figura 2, por aplicarse con el LWD menor σd que con el FWD es de esperarse la obtención de Mr mayores (Nazzari, 2003). Será necesario entonces determinar la correlación entre los módulos y deflexiones obtenibles con el LWD y los de referencia con el FWD, para de esa forma sí poder emplear la metodología de retrocálculo de AASHTO93 para determinación de espesores de capas asfálticas para pavimentación.

3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

3.1. Hipótesis Simplificativas

Existen una serie de condicionantes de diversa importancia que pueden restringir la obtención de las correlaciones planteadas para el trabajo. Para dar solución a este aspecto se deben establecer una serie de hipótesis simplificativas que deben ser debidamente justificadas. A continuación se ponen en relieve las dos más importantes de estas hipótesis.

La primera se relaciona con la humedad de los suelos. Es sabido que los suelos plásticos poseen distintos comportamientos en cuanto a sus características mecánicas a distintos contenidos de humedad. Es por ello que para un estudio completo se deberían tener para un mismo suelo distintas correlaciones en función de su contenido de humedad, lo cual hace más complejo el estudio en cuestión. Este aspecto suele simplificarse estableciendo que las mediciones se deben efectuar en un período determinado del año, por ejemplo luego de la estación húmeda, de forma tal de contar con un estado de humedad único (Drumm et al, 1998). Esto resulta aplicable para cierto tipo de actividades, pero para la pavimentación urbana, que en la región involucrada se efectúa a lo largo de todo el año, no lo es tanto. Por ello se ha simplificado este aspecto por medio de la demostración de que en las subrasantes en el área en estudio, en realidad, la variación de humedad no es tan significativa, dado que las mismas permanecen saturadas la mayor parte del tiempo. Es decir que, independientemente de la época del año en que se realice una medición, las subrasantes tendrán un contenido de humedad similar y cercano a la saturación, al menos en la región en estudio. Esto se demuestra aplicando parte de lo especificado por AASHTO93 para la determinación del coeficiente de drenaje, lo cual se transcribe a continuación.

Para poner el análisis del lado de la seguridad por ser más permeable se supone que la subrasante está constituida por un suelo del tipo A-4 (en rigor difícilmente este suelo en la región sea constitutivo de la subrasante, ya que habitualmente se trata de suelos más finos aún, de los tipos A-7-5 y A-7-6), presentando los valores habituales de PTN_{200} del 70 %, diámetro imaginario que deja pasar el 10 % del material (D_{10}) de 0,02 mm, densidad seca máxima (Ds_{max}) de 1,400 g/cm³ y porosidad máxima (Ne_{max}) de 0,48, que al poder drenar una

cantidad de agua C de 8 (ver Tabla 1) permite establecer una porosidad efectiva (N_e) de 0,0384, según se observa en la Ecuación 3.

$$N_e = N_{e_{\max}} \cdot \frac{C}{100} = 0,48 \cdot 0,08 = 0,0384 \quad (3)$$

Tabla 1. Cantidad de agua que se puede drenar por gravedad (Fuente: EICAM, 1998)

Material predominante	Cantidad de finos								
	<2,5%			5%			10%		
	Tipo de finos			Tipo de finos			Tipo de finos		
	Filler	Limo	Arcilla	Filler	Limo	Arcilla	Filler	Limo	Arcilla
grava	70	60	40	60	40	20	40	30	10
arena	57	50	35	50	35	15	25	18	8

Esto permite estimar la permeabilidad k de 1×10^{-4} cm/seg, según el nomograma de la Figura 5.

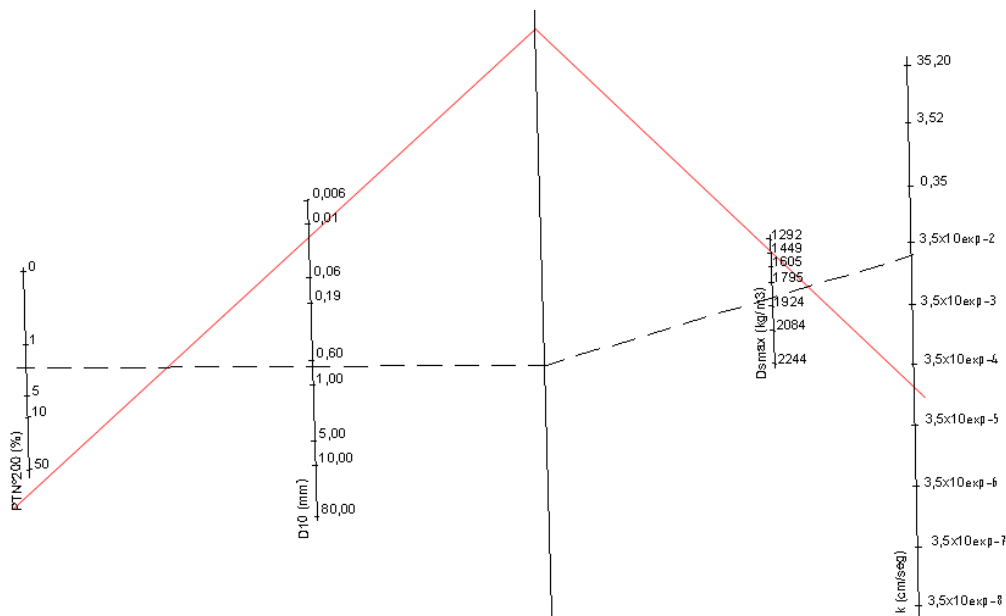


Figura 5. Abaco para estimar permeabilidad (Fuente: EICAM, 1998)

Se adopta además un espesor H a ser drenado de 20 cm, una pendiente longitudinal media S del 1,5 % y una pendiente transversal S_x típica de pavimentos asfálticos del 2,0 % para un ancho a drenar W de 365 cm (un carril en calles de un carril por sentido). Esto permite establecer mediante la Ecuación 4, la longitud de escurrimiento resultante (L_r) de 456 cm, mediante la Ecuación 5 la pendiente resultante de la base (S_r) de 0,025, la pendiente S_1 de 0,57 con la Ecuación 6 y el factor m de 46,2 días con la Ecuación 7.

$$L_r = W \cdot [(S/S_x)^2 + 1]^{0,5} = 365 \text{ cm} \cdot [(0,015 / 0,020)^2 + 1]^{0,5} = 456 \text{ cm} \quad (4)$$

$$S_r = (S^2 + S_x^2)^{0,5} = (0,015^2 + 0,020^2)^{0,5} = 0,025 \quad (5)$$

$$S_1 = \frac{Lr \cdot Sr}{H} = (456 \text{ cm} \cdot 0,025) / 20 \text{ cm} = 0,57 \quad (6)$$

$$m = \frac{Ne \cdot Lr^2}{H \cdot k} = 3.992.371 \text{ seg} = 46,2 \text{ días} \quad (7)$$

Con el gráfico de la Figura 6 se establece factor de tiempo de drenaje del 50 % (T_{50}) de 0,34, lo que permite calcular el tiempo de drenaje en días t_d de 15,7 días, según la Ecuación 8.

$$t_d = T_{50} \cdot m = 0,34 \cdot 46,2 \text{ días} = 15,7 \text{ días} \quad (8)$$

Finalmente, considerando para la región central de la Argentina un total de días de lluvia anuales (R) de 101 días (OMM, 2009), se arriba por la Ecuación 9 a una saturación porcentual teórica (P) mayor al 100 %, lo cual no es materialmente posible pero demuestra la validez de la hipótesis simplificativa empleada.

$$P = \frac{R \cdot t_d \cdot 100}{365} = (101 \text{ días} \cdot 15,7 \text{ días} \cdot 100) / 365 \text{ días} > 100 \% \quad (9)$$

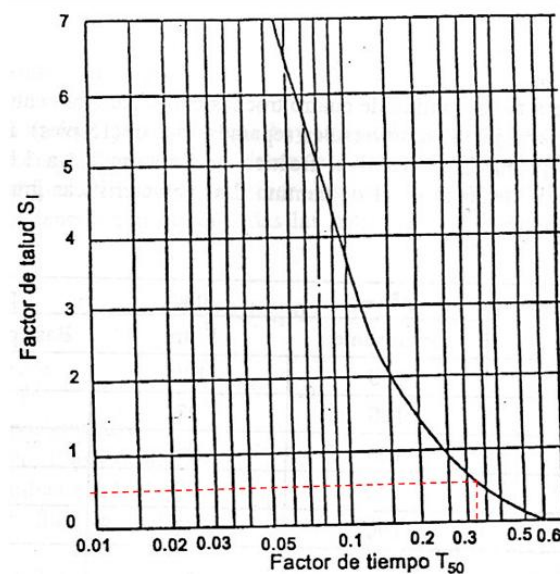


Figura 6. Factor de tiempo de drenaje del 50 % (Fuente: EICAM, 1998)

La segunda hipótesis a ser considerada al momento de realizar los ensayos en laboratorio involucra la densidad de la subrasante. La pavimentación urbana, tiene la particularidad de efectuarse en áreas con densidad poblacional. Es decir, lo habitual es que se genere una apertura de calle de tierra, se produzcan los primeros asentamientos de personas, se provean los servicios, se produzca el resto de los asentamientos y luego, por el reclamo de los vecinos, se tome la decisión de pavimentar (lo cual es diferente a lo que sucede por ejemplo en un barrio cerrado, en donde primero se pavimenta para que sea atractiva la venta de los lotes y luego se producen los asentamientos de personas). Es por ello que, si fuera necesaria la apertura de caja o la reconfiguración superficial para establecer la subrasante, se haría sobre terrenos ya consolidados por el tránsito sobre una apertura ya existente. Incluso la apertura de caja no debería ser muy significativa, ya que si bien la rasante de proyecto variará de la existente, seguramente no lo hará en forma significativa, si se la compara con los desmontes en proyectos de vías rurales. Con la necesidad de elevar el terreno para alcanzar la cota de subrasante sucede lo mismo, implicando terraplenes no significativos. Todo esto hace que lo habitual sea contar con subrasantes bien consolidadas, con densidades lo suficientemente cercanas a la densidad máxima como para despreciar una variabilidad en ese sentido.

3.2. Estructura Metodológica Propuesta para el Trabajo

La metodología de estudio contempla, sobre pistas de prueba con diversas subrasantes y bases, el empleo del LWD y la correlación de los resultados con muestras ensayadas para la obtención de módulo resiliente en laboratorio y la simulación de deflectometrías mediante la teoría de las capas elásticas.

La aplicación de esta metodología requiere la posibilidad de acceder a vías recién construidas hasta el nivel de base, con distintos materiales de base y sobre subrasantes de diferente aptitud vial. Dado que el LEMaC tiene por objetivo plantear el uso de la metodología de correlación a desarrollarse inicialmente en el ámbito en el que se desenvuelve, y que actualmente es el responsable de los controles y asesorías en pavimentación de la totalidad de la ciudad de La Plata, se ha planteado a la Dirección de Pavimentación de la Municipalidad la posibilidad de generar un convenio de ayuda mutua en tal sentido. De esta manera se ha arribado a un acuerdo institucional, en donde el LEMaC efectúa los estudios, teniendo a La Plata como primer destinatario de los resultados de los mismos, y la Municipalidad de La Plata incluye en sus planes de pavimentación en tres vías sobre subrasantes de aporte bajo, medio y alto, la materialización de bases de aporte bajo, medio y alto. De esta manera se cuenta con el espectro estructural que permite la realización de las tareas previstas.

Pero existe otro aspecto de relevancia que condiciona el diseño metodológico. Este reside en el hecho de que si bien existen en el mercado equipos de LWD que vienen provistos con geófonos, de manera similar a los FWD, estos poseen un costo inferior al de un FWD pero por encima de los justificables para la aplicación planteada, con una complejidad instrumental que requiere de ciertos cuidados especiales.

Con costos medios muy inferiores a la mitad de estos últimos existen equipos LWD menos complejos, no provistos de geófonos separados del centro de aplicación de la carga. Estos equipos resultan más adecuados técnico/económicamente a la finalidad planteada, pero requieren de una forma de medición especialmente diseñada para el desarrollo del trabajo. Esta metodología contempla 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 7.

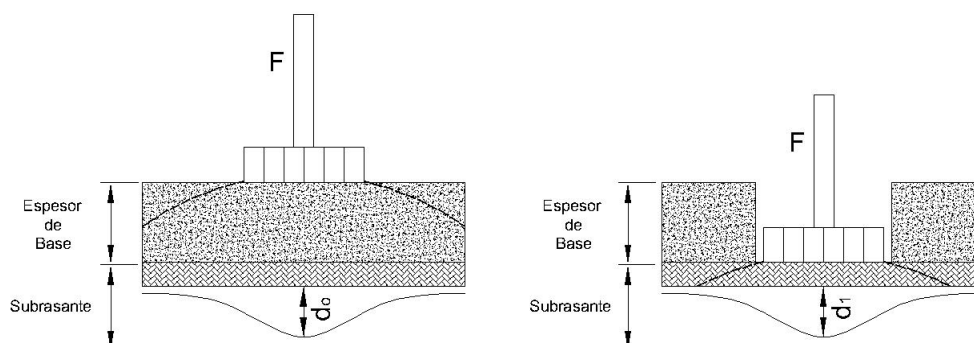


Figura 7. Forma de medición propuesta

Mediante estos pasos se registra una deflexión d_0 sobre la base y un Mr a nivel de subrasante, utilizables mediante las debidas correlaciones en la determinación de Ep y del Mr real para retrocálculo, respectivamente. Es justamente el hecho de que estas mediciones vayan a ser afectadas por una respectiva correlación lo que da validez a la metodología, ya que cualquier discusión que se quisiera plantear en torno a la misma queda excusada en el hecho de que en el retrocálculo intervendrán mediciones corregidas en función de lo que hubiera arrojado el FWD. Cabe señalar que en la Figura 7 se ha esquematizado un paquete

bicapa (subrasante, base) que será complementado para establecer el paquete tricapa con la capa asfáltica de rodamiento. Debe entenderse allí, y de aquí en adelante en este documento, que la capa de base puede estar constituida por una o más capas.

Como una tercera pata entre el FWD y el LWD aparece en la metodología el empleo de la teoría de las capas elásticas en base a las curvas constitutivas halladas en laboratorio para la base y la subrasante. Es posible la aplicación al cargar el modelo de capas elásticas con las curvas constitutivas de la base y subrasante, afectado por una carga de 40 KN en una impronta de radio 15 cm, dando como resultados en cuanto a desplazamientos y respuestas modulares las registrables con el FWD luego de la correspondiente afectación del Mr por el coeficiente C de 0,33 previsto por AASHTO93, para llevar a la medición a valores de cálculo, según se aprecia en la Ecuación 10.

$$Mr = C \left(\frac{0,24P}{d_r r} \right) \quad (10)$$

El contar con los valores de cálculo esperables para la deflexión d_0 a nivel de base y Mr , en función de la caracterización dinámica de los materiales en laboratorio, permite entonces la aplicación de las Ecuaciones 11 y 12 finales.

$$Mr_{calc} = A.Mr_{LWD} \quad (11)$$

$$d_{0,calc} = B.d_{0,LWD} \quad (12)$$

Donde:

Mr_{calc} = Módulo resiliente de cálculo para subrasante

Mr_{LWD} = Módulo resiliente según LWD de la subrasante

$d_{0,calc}$ = Deflexión de cálculo sobre la base

$d_{0,LWD}$ = Deflexión sobre la subrasante medida con LWD

$A;B$ = Coeficientes de correlación lineales (o modelos de correlación no lineales) resultantes

La inclusión de la teoría de las capas elásticas se realiza mediante la aplicación del programa BackVid desarrollado por el IMAE de la Universidad Nacional de Rosario. Este programa permite el ingreso de los datos en cuanto al eje solicitante y las ecuaciones constitutivas de la base y subrasante, obteniéndose como resultado la respuesta modular de cada capa en su fibra superior e inferior y los desplazamientos verticales producidos, simulando la lectura con el FWD (Giovanon O.H., 2005), según se ve en la Figura 8.

The screenshot shows the BACKVID software interface with the following sections:

- Programa BACKVID - IMAE para modelización, diseño y verificación**
 - Tipo de auscultación de la deformada: Frec. Hz 10,00 Medición Absoluta (FWD)
 - radio de carga (mm): 150 presión (MPa): 0,283
 - inter eje (mm): 0 trocha (mm): 2000
 - carga del eje (KN): 80 FWD carga aplicada: 40,0 presión: 0,566
- Datos de la Estructura**

Tipo de Material	Altura	Módulo (MPa)	Ecuación Mr		
			coef_A	coef_B	coef_C
2 Mr (CBR 40)	200	205	215,0	0,46	-0,24
2 Subrasante Mr (CBR 3)		37	4,8	0,00	-0,57
- Estructura Analizada**

Tipo	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Deflexión (mm)
Mr (CBR 40)	200	220	-1,46
Subrasante Mr (CBR 3)	35		-2,24

Figura 8. Pantalla del programa BackVid empleado

Finalmente, las tareas que conforman la metodología de estudio son las siguientes:

- Selección de las vías a ser auscultadas con la combinación de subrasante de bajo, medio y alto aporte estructural con bases de bajo, medio y alto aporte estructural (nueve casos en total). Para cada caso se establecen tres puntos de medición.
- En concordancia con cada punto de medición se efectúa, sobre la base terminada, el 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 el programa BackVid, simulación de la carga de 40 KN y determinación de los Mr_{calc} y d_{0calc} .
- Según las leyes de variación observadas, obtención de los parámetros A y B de correlación o modelos de correlación no lineal correspondientes.
- Presentación de los resultados y aplicación.

4. CAMPOS DE APLICACIÓN PREVISTOS

Como se ha visto, la aplicación del retrocálculo sobre mediciones efectuadas con el FWD permite determinar el espesor de capas asfálticas en pavimentos ya existentes y en nuevos pavimentos si las mediciones se han efectuado sobre las bases terminadas. También se ha visto que dada la menor carga dinámica ejercida con el LWD, no sería posible su empleo directo en el cálculo de refuerzos, por ello el trabajo en su totalidad ha sido planteado para la aplicación de retrocálculo en la determinación de espesores de pavimento sobre una base recién construida. Esto ha sido planteado en estos términos para su más sencilla explicación. Pero la metodología a desarrollarse tiene otras aplicaciones adicionales, que se desean poner en relieve en este punto.

Una de estas aplicaciones adicionales reside en la reconstrucción de capas asfálticas en vías urbanas, barrios cerrados o en tramos cortos rurales. Si, por ejemplo, la capa de rodadura presentara Índices de Estado bajos o altas Deflexiones (por ejemplo con Regla Benkelman) que indicaran su reconstrucción, pero que no implicaran un daño severo en la base, es posible se den dos alternativas de acción. La primera involucra retirar por completo la capa asfáltica, reconstituir la base y colocar una nueva capa asfáltica o una capa asfáltica que incluya el material reciclado (reciclado superficial). En este caso la aplicación de la metodología se efectuaría retirando la capa asfáltica en algunos sectores y ejecutando las mediciones correspondientes con el LWD, para luego realizar el cálculo del espesor de la capa asfáltica. Todo esto si los valores de Ep resultaran admisibles por el proyectista. En caso contrario, una posible solución es la de reforzar la capa de base y colocar una nueva carpeta asfáltica. Este refuerzo de la base se puede lograr mediante el reciclado en conjunto de la capa asfáltica existente y la totalidad o parte de la base (reciclado profundo). En este caso habría una doble aplicación de la metodología, ya que a la inicial que determinó que el Ep se ubicaba por debajo

de lo admisible, se suma otra aplicación al finalizar la base reciclada, con la cual puede determinarse el espesor de la capa asfáltica nueva.

Otro de los empleos sería en la determinación de espesores de refuerzos sobre pavimentos asfálticos existentes, que si bien se dijo no podría efectuarse de manera directa, si se podría hacer en forma indirecta. La forma de aplicación de la metodología sería retirando la capa asfáltica existente, efectuando las mediciones con el LWD y determinando el SN y el SN_{eff} hasta el nivel de base, al cual se debe adicionar un $SN_{eff_{ca}}$ correspondiente a la capa asfáltica existente, que se determinaría en forma indirecta en laboratorio mediante el ensayo de testigos y/o el remoldeo de la mezcla asfáltica extraída para posibilitar las mediciones.

5. CONCLUSIONES

Del análisis teórico y diseño metodológico planteado se pueden efectuar las siguientes conclusiones:

- En la ciudad de La Plata, como en muchos de los municipios del país y la región, existe un sobredimensionado de las capas asfálticas en la pavimentación urbana de arterias secundarias o terciarias, con el que se debe convivir en función de que el proyectista debe tomar numerosos criterios que lo pongan del lado de la seguridad, al haber un mismo paquete estructural para todas las arterias.
- Esta falencia se da porque no se ha instrumentado una metodología que permita la expeditiva medición de las características de la subrasante en la vía en cuestión y de la capacidad portante real de las bases efectuadas. Esto se debe, en parte, a que la aplicación del FWD que permitiría solucionar tal defecto no se ve económicamente justificada en estos casos.
- Existe una alternativa de solución mediante la aplicación del LWD, de reciente aparición en el mercado local, pero que no cuenta con una adaptación metodológica que permita el desarrollo del retrocálculo según AASHTO93.
- La manera de remediar esta situación es estableciendo las correspondientes correlaciones a tal efecto, lo que puede hacerse mediante la aplicación combinada de curvas constitutivas de la subrasante y base, obtenidas con el equipo de Módulo Resiliente en laboratorio, y de la teoría de las capas elásticas, simulando la medición con FWD.
- Estas correlaciones son además aplicables también en reconstrucciones de vías urbanas, barrios cerrados y tramos cortos de vías rurales, que pueden incluir reciclados superficiales o profundos, e indirectamente en la determinación de refuerzos sobre pavimentos asfálticos existentes.
- La correcta implementación de la metodología expuesta permite contar con datos más ciertos, lo que posibilita diseñar paquetes estructurales que brinden una mejor respuesta al medio, logrando así un claro uso sustentable de los recursos disponibles.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente en el desarrollo de la metodología planteada a la Dirección de Pavimentación de la Municipalidad de La Plata, por el interés y el apoyo prestado, y al Mg. Ing. Oscar Giovanon del IMAE, Universidad Nacional de Rosario, por la asistencia en cuanto a planteos teóricos efectuados y aplicación del programa BackVid.

7. REFERENCIAS

- AASHTO, "Guide for design of pavement structures 1993", American Association of State Highway and Transportation Officials, ISBN 1-56051-055-2, EEUU, 1993.
- DRUMM, E.C., RAINWATER, R. N., ANDREW, J., JADKSON, N. M., YODER, R. E., WILSON, G. V., Pavement Response due to Seasonal Changes in Subgrade Moisture Conditions, Second Int. Conf. On Unsaturated Soils, Vol. 2, Beijing, China, 1998.
- EICAM, "Curso de actualización de diseño estructural de caminos, método AASHTO93", Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1998.
- FLEMING, P. R., RROGERS, C. D., FROST, M. W., A Comparison of Devices for Measuring Stiffness In-Situ, In: *5th Int. Symp. on Unbound Aggregates in Roads (UNBAR 5)*, EEUU, 2000.
- GEORGE, K. P., Portable FWD (Prima 100) for in situ subgrade evaluation, Report FHWA/MS-DOT-RD-06-179, University of Mississippi, EEUU, 2006.
- GIOVANON, O. H., PAGOLA, M., Backcalculation of Moduli using BACKMOD Software. In: *International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, University of Ulister, Irlanda, 2005.
- NAZZAL, M. D., 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, 2003.
- NCHRP, Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, National Research Board, 1-37A team, EEUU, 2004.
- OMS, Reporte de la Organización Meteorológica Mundial, wwis.inm.es/050/c00294.htm, 2009.
- RIVERA, J. J., Desarrollo del capítulo de pavimentos en proyecto viales financiados por el BID, apunte de la Cátedra Vías III, Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. La Plata, Argentina, 2008.
- RIVERA, J. J., Metodología para la obtención del Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) por conteos diarios, Revista Saber del Consejo de Investigación de la Universidad del Oriente de Venezuela (ISSN 1315-0162), Fasc. 2, Vol. 19, pP 192-204, Venezuela, 2007.