

Estimación simplificada de la vida de los firmes flexibles y semiflexibles antes y después de un refuerzo

MARTA ALONSO ÁNCHUELO (*); ÓSCAR GUTIÉRREZ-BOLÍVAR ÁLVAREZ (**)

RESUMEN Como segunda parte del artículo "Estimación simplificada de las deflexiones de los firmes flexibles y semiflexibles", se ha desarrollado un estudio en el que, siguiendo la misma metodología expuesta en dicho artículo, se han obtenido expresiones simplificadas para estimar el valor de la vida de firmes flexibles o semiflexibles. La estimación de la vida de un firme es algo fundamental en el campo de la Gestión de Firmes para poder planificar las estrategias de conservación. Además, se ha analizado la importancia relativa de cada una de las características de los firmes que aparecen en las expresiones obtenidas y que son el espesor de mezcla bituminosa y de material granular, el módulo de elasticidad de la explanada, la deflexión y el radio de curvatura. Con todas ellas se ha pretendido establecer una especie de número estructural que permita tener idea, de una forma simplificada, de la vida teórica del firme. Además, se expone someramente un método que permite realizar cálculos para estimar la vida de un firme reforzado a partir de su vida residual, del espesor del refuerzo, de la tipología inicial (espesor de mezcla bituminosa, espesor de material granular, módulo de elasticidad de la explanada), deflexiones y radio de curvatura y que permiten analizar la importancia relativa de cada uno de estos parámetros.

SIMPLIFIED ESTIMATION OF THE LIFE OF FLEXIBLE AND SEMIFLEXIBLE PAVEMENTS, BEFORE AND AFTER OVERLAY

ABSTRACT A study has been carried out as second part of the article "Simplified Estimation of Flexible and Semiflexible Pavements Deflections". Same method has been used and some expressions have been obtained to estimate the flexible and semiflexible pavements life values. Pavement life is very important in Pavement Management Field for planning rehabilitation strategies. Also, the relative weight of some parameters has been analyzed. These parameters are bituminous and granular material thickness, subgrade modulus, deflection and curvature radius. They have been used to obtain a kind of structural number which gives an approximate theoretical pavement life value. Moreover, a simplified method is shown to estimate reinforced pavement life using its residual life, the overlay thickness, the bituminous and granular material thickness, the subgrade modulus, the deflection and the curvature radius. It allows to analyze their relative weight.

Palabras clave: Gestión de firmes; Conservación; Rehabilitación; Refuerzo; Firme flexible; Firme semiflexible; Vida; Vida residual; Estudio analítico.

1. INTRODUCCIÓN

En el artículo "Estimación simplificada del valor de la deflexión en firmes flexibles y semiflexibles" publicado en esta revista en números anteriores, se indicaba el método y los resultados y conclusiones obtenidos de un estudio teórico de gran cantidad de secciones de firmes flexibles y semiflexibles. Se establecieron fórmulas simplificadas para estimar los valores de la deflexión, de su radio y del módulo de elasticidad de la explanada y la importancia relativa de los diferentes parámetros utilizados para definir las secciones estructurales.

No obstante, en el campo de la conservación no es suficiente conocer el valor estimado de la deflexión y del radio.

También es necesario estudiar, aunque sea de forma aproximada, la vida previsible del firme para, a partir de ella, poder determinar si es preciso reforzar, el espesor de dicho refuerzo y el momento óptimo de actuación. Por ello, se ha ampliado el campo de análisis, más restringido en el artículo al que se ha hecho mención, estudiando la posibilidad de obtener una especie de número estructural que estime la vida aproximada de un firme. Se la ha relacionado, por un lado, con los espesores de los materiales y el módulo de elasticidad de la explanada y, por otro, con unos parámetros procedentes de la auscultación, como son la deflexión y su radio. Esto ha permitido determinar la importancia relativa de unos y otros sobre la vida de los firmes.

Además, se expone un método para determinar el espesor de refuerzo de un firme teniendo en cuenta su vida residual en el momento del refuerzo y su forma de obtención. Como vida residual se toma, como se explica más adelante, la diferencia entre la vida total previsible del firme y la consumida hasta un momento dado debido al paso de las cargas. Utilizando este concepto, se puede estimar el número de ejes tipo

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios de Caminos del CEDEX. Ministerio de Fomento.

que puede soportar el firme teniendo en cuenta el tráfico que ya ha pasado. También se ha estudiado la vida del firme una vez reforzado teniendo en cuenta la vida residual de las capas antiguas, el espesor de refuerzo y el tráfico que va a circular por la carretera durante el período de proyecto. Por último, se han obtenido fórmulas simplificadas que permiten estimar la vida de estos firmes reforzados.

Para el estudio, se han asumido las hipótesis del artículo mencionado y ya publicado. Pero, además, ha sido necesario añadir otras hipótesis referentes a las leyes de fatiga. Se deben tener en cuenta las limitaciones que estas hipótesis y datos previos producen.

2. METODOLOGÍA

El método seguido para realizar el estudio parte del ya indicado en el artículo "Estimación simplificada del valor de las deflexiones en firmes flexibles y semiflexibles". En resumen, consistía en el cálculo de los valores de las tensiones y deformaciones de un número elevado de secciones, que pretendían abarcar un amplio espectro de los firmes reales. Se utilizó un programa de ordenador denominado BDALIZ confeccionado en el Centro de Estudios de Carreteras a partir del programa ALIZE. En este caso se ha ampliado el número de secciones, para poder considerar los distintos espesores de refuerzo de los firmes.

En este estudio se considera que la vida de un firme es el número de ejes tipo de 13t que puede soportar antes de agotarse. Partiendo del estado de tensiones y deformaciones de las distintas secciones y utilizando las leyes de fatiga más usuales, se ha estimado la vida de los firmes nuevos. Posteriormente, se han calculado las regresiones bilogarithmicas entre la vida del firme y varios parámetros, algunos de ellos intrínsecos y otros procedentes de la auscultación. Esto permite, además, deducir la importancia relativa de cada uno de ellos.

En el caso de los firmes reforzados, se ha introducido el concepto de vida consumida y vida residual de un firme antes del refuerzo. Para estimar la vida de un firme reforzado se ha considerado el estado de tensiones y deformaciones de la sección resultante. A los resultados se le han aplicado las leyes de fatiga. La vida obtenida se ha reducido teniendo en cuenta la vida consumida por el firme antiguo, como se explicará con más detalle más adelante.

En este caso se han establecido correlaciones bilogarithmicas entre la vida del firme reforzado, la vida residual, las deflexiones, radios, espesores de materiales (incluido el espesor de refuerzo) y el módulo de elasticidad de la explanada y se ha deducido la importancia relativa de algunos de ellos.

3. DATOS E HIPÓTESIS PARA EL CÁLCULO

Aunque los tipos y características de los firmes reales son muy variadas, se ha tratado de considerar en este estudio los datos e hipótesis que los representen lo mejor posible. En cuanto a las hipótesis de carga y módulos de materiales, se han empleado las más habituales en estudios de este tipo y que, por la experiencia, se consideran que son las más cercanas a la realidad. Para determinar la vida de los firmes se han utilizado unas leyes de fatiga que son usuales en la práctica. En lo referente a los datos de espesores de las capas y refuerzos, se han considerado los que se ajustan tanto a las instrucciones de firmes nuevos, como a las de firmes reforzados.

Todas las estructuras analizadas corresponden a firmes flexibles y semiflexibles. Los firmes flexibles están compuestos por una capa de mezcla bituminosa de espesor inferior a 15 cm, sobre otra de material granular situada por encima

de la explanada. Los firmes semiflexibles tienen idéntica estructura que los flexibles, pero el espesor de mezcla bituminosa es superior a 15 cm. En cuanto a los refuerzos estudiados, se han considerado que son de mezcla bituminosa, pudiendo catalogarse las secciones resultantes como flexibles o semiflexibles.

Los módulos de la mezcla bituminosa, tanto los del firme original como los de los refuerzos, se han considerado fijos en todos los casos. Los de las capas granulares dependientes de los de la explanada. Los módulos de la explanada pueden tomar valores comprendidos entre los extremos de las especificaciones, pero también inferiores, como se ha constatado que, a veces, ocurre en la realidad.

En cuanto a los espesores de los materiales, la mezcla bituminosa se ha hecho variar de 5 a 45 cm; y el material granular, de 20 a 50 cm. Se han considerado espesores de refuerzo de 5, 8 y 10 cm.

Con todo ello se ha tratado de cubrir un abanico suficientemente amplio de casos, con hipótesis contrastadas por la experiencia. De esta forma se puede proceder a un análisis de las relaciones entre los parámetros, teniendo como base una población representativa que proporcione un grado de confianza razonable.

HIPÓTESIS DE CARGA

La hipótesis realizada es que la carga equivale a una de 6,5 t repartida uniformemente sobre una superficie de acción formada por dos círculos de carga con las siguientes características:

- Carga en cada círculo de 8 kp/cm².
- Radio de cada círculo de carga de 11,37 cm.
- Distancia entre centros de los dos círculos de 37,5 cm.

Se ha tomado una carga de 6,5 t porque es la mitad de la considerada como eje patrón (13 t) en los estudios de dimensionamiento de firmes, y ha sido durante mucho tiempo la carga máxima admisible por eje. Se ha considerado que la carga se reparte en dos ruedas que equivalen a los círculos mencionados.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS FIRMES

- Espesores de capas de refuerzo de 5, 8 y 10 cm de mezclas bituminosas.
- Espesores de mezcla bituminosa de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 cm.
- Espesores de material granular de 20, 30, 40 y 50 cm.
- Espesor de la explanada indefinido.

HIPÓTESIS ELÁSTICAS DE LOS MATERIALES DEL FIRME

- El módulo de elasticidad de la mezcla bituminosa se considera de 60 000 kp/cm².
- El módulo de elasticidad del material granular se ha calculado aplicando la fórmula de la Shell, que tiene en cuenta el módulo de la explanada y el espesor de capa de material granular. Se corresponde con la expresión:

$$E_{\text{gran}} = E_{\text{expl}} \times 0,26 \times h^{0,45}$$

Siendo:

- E_{gran} Módulo de elasticidad del material granular (en kp/cm²).
- E_{expl} Módulo de elasticidad de la explanada (en kp/cm²).
- h Espesor de la capa de material granular (en cm).

- Los módulos de elasticidad de la explanada considerados son: 200, 300, 500, 1.000, 1.500 y 2.000 kp/cm².

Se ha realizado la hipótesis de que los módulos de elasticidad de los materiales permanecen constantes a lo largo de la vida del firme.

Los módulos de Poisson considerados son:

- Para mezcla bituminosa 0,33
- Para material granular 0,35
- Para explanada 0,35

CONDICIONES DE ADHERENCIA ENTRE CAPAS

En las secciones analizadas, se han supuesto que todas las capas están pegadas.

LEYES DE FATIGA

Las leyes de fatiga utilizadas para determinar la vida de los firmes dependen de las deformaciones horizontales o verticales, según el caso, que se han obtenido al hacer funcionar el programa BDALIZ. Sus expresiones son las siguientes:

- Para mezcla bituminosa:

$$\log \epsilon_h = -2,19093 - 0,27243 \times \log N$$

Siendo:

N Número de cargas de rotura en ejes de 13 t.

ϵ_h Deformación horizontal máxima en deformaciones unitarias.

- Para materiales granulares y explanada:

$$N = \left(\frac{\epsilon_v \times 10^6}{28.000} \right)^{-4}$$

Con todo esto, las combinaciones utilizadas en el análisis se indican en el cuadro 1. Lo que hace un total de $20 \times 1 \times 6 \times 4 = 480$ secciones de firme calculadas con el programa BDALIZ.

ESPESOR DE MEZCLA BITUMINOSA	E. DE LA MEZCLA BITUMINOSA	E. DE LA EXPLANADA	ESPESOR DE MATERIAL GRANULAR
5, 8, 10, 13, 15, 18, 20, 23, 25, 28, 30, 33, 35, 38, 40, 43, 45, 48, 50, 53	60.000	200, 300, 500, 1.000, 1.500, 2.000	20, 30, 40, 50

CUADRO 1.

RELACIÓN	PARÁMETROS	R ²	ECUACIÓN
vida = f (mb, mg, me)	log (vida), log (mb), log (mg), log (me)	0,965	vida = mb ^{4,34} mg ^{0,67} me ^{1,22} 10 ^{-3,52}
vida = f (mb, me)	log (vida), log (mb), log (me)	0,959	vida = mb ^{4,36} me ^{1,22} 10 ^{-2,40}
vida = f (mb, mg)	log (vida), log (mb), log (mg)	0,848	vida = mb ^{4,36} mg ^{0,67} 10 ^{-6,17}
vida = f (mb)	log (vida), log (mb)	0,842	vida = mb ^{4,36} 10 ^{0,05}
vida = f (me)	log (vida), log (me)	0,117	vida = me ^{1,22} 10 ^{8,31}
Siendo: mb = Espesor de la capa de mezcla bituminosa en cm. mg = Espesor de la capa de material granular en cm. me = Módulo de elasticidad de la explanada en kp/cm ² . vida = Vida del firme en ejes tipo de 13 t			

CUADRO 2.

4. EXPRESIONES SIMPLIFICADAS DE LA VIDA DEL FIRME

Como ya se ha indicado, uno de los objetivos perseguidos es el de obtener unas fórmulas simplificadas para estimar los valores de la vida de los firmes expresadas como el número de ejes tipo de 13 t que puede soportar, y establecer así un factor que viene a ser equivalente al número estructural.

Para conseguirlo, se han estudiado correlaciones bilogarithmicas entre diversos parámetros que se pueden agrupar como se indica a continuación. En un primer grupo, se relaciona la vida de los firmes con los espesores de mezcla bituminosa y de material granular y con el módulo de elasticidad de la explanada. En un segundo grupo, la relación se establece entre la vida y dos parámetros obtenidos en la auscultación de los firmes: la deflexión y su radio. En el tercer grupo se han combinado los parámetros de los dos casos anteriores.

Para estimar la vida de los firmes es fundamental saber en qué capa se produce la rotura. La vida es el menor número de ejes que produce la rotura en cualquiera de las capas del firme. En todos los casos estudiados, la rotura ocurre en la capa de mezcla bituminosa y, en concreto, en la zona de contacto con la capa de material granular debido a las deformaciones horizontales que se producen.

RELACIÓN ENTRE LA VIDA DE UN FIRME, LOS ESPESORES DE MATERIALES Y EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA EXPLANADA

Tomando la vida del firme como parámetro que se desea estimar, se ha estudiado su dependencia de otros factores. Para ello se han considerado las 480 secciones distintas y se ha procedido a su análisis. Se ha estudiado, en primer lugar, la dependencia de los espesores de mezcla bituminosa y material granular y de los módulos de elasticidad de la explanada. Posteriormente, se ha estudiado el resultado al ir prescindiendo de parámetros lo que ha permitido analizar su grado de influencia relativa.

Para la realización práctica del estudio, se han tomado logaritmos decimales de los parámetros, y se han establecido regresiones lineales múltiples entre ellos. En el cuadro 2 figuran los resultados obtenidos de las diferentes combinaciones.

La mejor de las relaciones se obtiene haciendo intervenir en la fórmula los tres parámetros, obteniéndose un grado de correlación muy bueno.

En la segunda expresión se ha eliminado el espesor de material granular y se ha mantenido el espesor de mezcla bituminosa y el módulo de elasticidad de la explanada. El coeficiente de determinación ha variado poco. Además, los exponentes que afectan al espesor de mezcla bituminosa y al módulo de elasticidad de la explanada permanecen prácticamente constantes.

En la tercera expresión se ha eliminado el valor del módulo de elasticidad de la explanada. Se aprecia que el grado de correlación ha disminuido, pero sigue siendo alto, lo que parece indicar la importancia relativa del espesor de mezcla bituminosa en la estimación de la vida del firme.

En la cuarta de las expresiones se ha eliminado el espesor de material granular y el coeficiente de determinación se mantiene prácticamente igual que el de la tercera en la que intervienen el espesor de mezcla bituminosa y de material granular. Además, el exponente de la mezcla bituminosa se mantiene casi constante, lo que hace pensar que el material granular no influye demasiado en la vida de un firme. Hay que tener en cuenta que, en las hipótesis de cálculo, el módulo del material granular depende del de la explanada, lo que puede afectar a la influencia relativa de este parámetro en las expresiones estudiadas.

La ecuación que relaciona la vida del firme y el espesor de mezcla bituminosa tiene un coeficiente de determinación elevado, lo que refleja que es la característica que más influye. Además, el exponente que le afecta en todas las ecuaciones en las que interviene se mantiene prácticamente constante.

En la última de las correlaciones sólo interviene el módulo de la explanada y su coeficiente de determinación ha disminuido notablemente.

De todo lo anterior puede deducirse que las variables más influyentes en la vida del firme son, en orden decre-

ciente, el espesor de mezcla bituminosa, el módulo de elasticidad de la explanada y el espesor de material granular.

En el gráfico 1 se aprecia, de forma más intuitiva, la importancia relativa de uno y otro factor. En él se han representado cuatro secciones de firmes que abarcan el campo de variación de las estructuras analizadas. Se observa que la vida de los firmes es más elevada cuanto mayor es el espesor de mezcla bituminosa y que el módulo de elasticidad de la explanada también influye, aunque menos. El último factor en orden de importancia es el espesor de material granular.

RELACIÓN ENTRE LA VIDA DE UN FIRME, LA DEFLEXIÓN Y EL RADIO

Como ya se ha indicado, también se han establecido regresiones bilogarítmicas que relacionan la vida de los firmes con unos datos que se podrían obtener de la auscultación estructural de las carreteras en servicio. Estos son la deflexión y su radio de curvatura.

Para ello se han tomado los datos obtenidos de aplicar las leyes de fatiga a las 480 secciones de firmes estudiados y se han relacionado con los valores de las deflexiones y radios. Se ha estudiado la relación entre la vida del firme, la deflexión y su radio, y se han ido eliminando parámetros para observar su importancia relativa (siendo la vida del firme el parámetro dependiente, como ocurría en el caso anterior) (cuadro 3).

En la primera de las expresiones en que se han utilizado la deflexión y el radio como parámetros dependientes, el coeficiente de determinación obtenido es elevado.

Al eliminar la deflexión, la relación entre la vida y el radio también tiene un valor de R^2 grande, lo que parece indicar que se puede estimar su valor utilizando este parámetro. No obstante, no es fácil en algunos casos obtener, por medio de la auscultación, valores fiables del radio de curvatura.

En lo que se refiere a la relación entre la vida del firme y la deflexión, el grado de correlación ha disminuido con

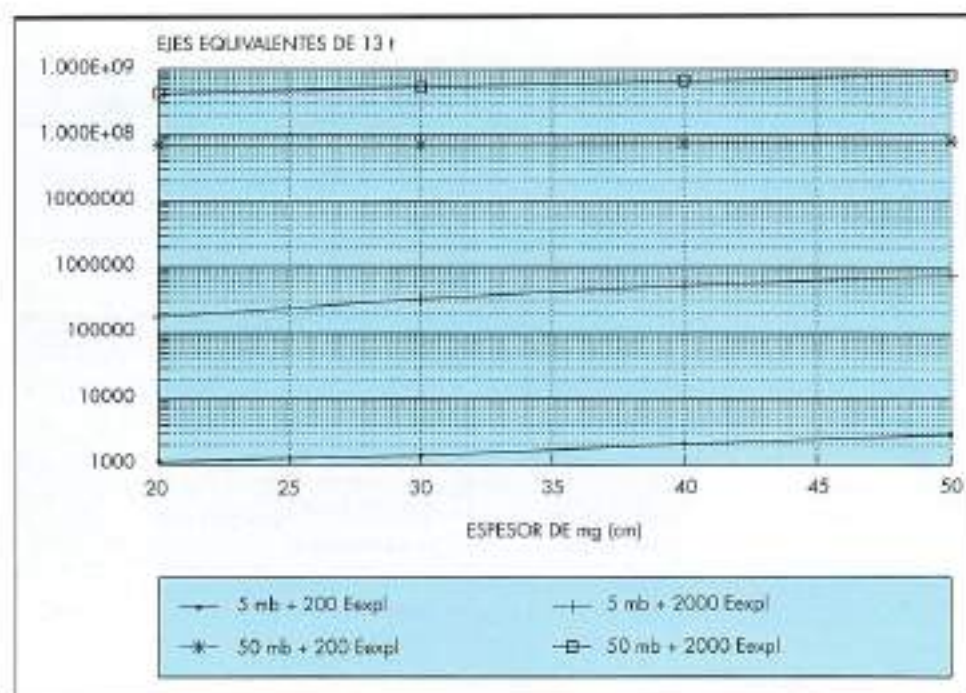


GRÁFICO 1. Variaciones en la vida de los firmes.

FUNCION	PARÁMETROS	R ²	ECUACIÓN
vida = f(df, rd)	log [vida], log (df), log (rd)	0,958	vida = $df^{-1,24}rd^{2,57}10^{1,28}$
vida = f(df)	log [vida], log (df)	0,647	vida = $df^{-2,16}10^{21,81}$
vida = f(rd)	log [vida], log (rd)	0,920	vida = $rd^{2,17}10^{-2,00}$

Siendo:
 df = Deflexión en centésimas de mm.
 rd = Radio de curvatura en m.
 vida = Vida del firme en ejes tipo de 13 t.

CUADRO 3.

respecto a las otras dos ecuaciones en las que interviene el radio.

En el gráfico 2 se han representado los valores de las deflexiones y la curva de regresión obtenida, cuya ecuación aparece en el cuadro anterior. Se observa una cierta dispersión en los datos, que es la que provoca que el coeficiente de determinación sea menor que el de las otras dos ecuaciones.

RELACION ENTRE LA VIDA DE UN FIRME, LOS ESPESORES DE MATERIALES, EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA EXPLANADA, LA DEFLEXIÓN Y EL RADIO DE CURVATURA

A continuación se han establecido relaciones que combinan los parámetros de los dos casos anteriores, es decir, las características geométricas y elásticas del propio firme, y parámetros que se pueden determinar a partir de la auscultación estructural.

Todas las expresiones obtenidas son el resultado de realizar regresiones bilogarithmicas entre unos y otros parámetros, siendo el término dependiente la vida del firme.

En las ecuaciones que se comentan a continuación, no aparecen todas las combinaciones posibles; ya que, al realizar las correlaciones, algunos resultados obtenidos no eran

lógicos (algunos exponentes que afectaban a los parámetros tenían el signo contrario a lo que indica el sentido común, por ejemplo, valores negativos del espesor de las capas). Esto puede deberse a la existencia de una correlación interna entre parámetros que, en un principio, se habían considerado como independientes. Por ello, en el cuadro 4 sólo aparecen las expresiones cuyos resultados parecen lógicos.

El coeficiente de determinación de todas las expresiones es elevado. Es un resultado coherente, si se tiene en cuenta que en los dos apartados anteriores se han obtenido buenos resultados utilizando menos parámetros de los que se han empleado ahora como combinación de los dos anteriores.

Parece claro, al comparar entre sí las expresiones 2^a y 3^a, y 4^a y 5^a que, prescindir del radio de curvatura como parámetro cuando en la misma ecuación aparecen la deflexión y el espesor de mezcla bituminosa, no influye perceptiblemente sobre el grado de correlación de la ecuación.

Además, al comparar las ecuaciones 3^a y 5^a, se aprecia que el espesor de material granular tampoco tiene mucha influencia sobre la vida del firme, por tanto en los firmes flexibles y semiflexibles basta considerar el espesor de la mezcla bituminosa y la deflexión del firme para poder estimar su vida de un modo razonable.

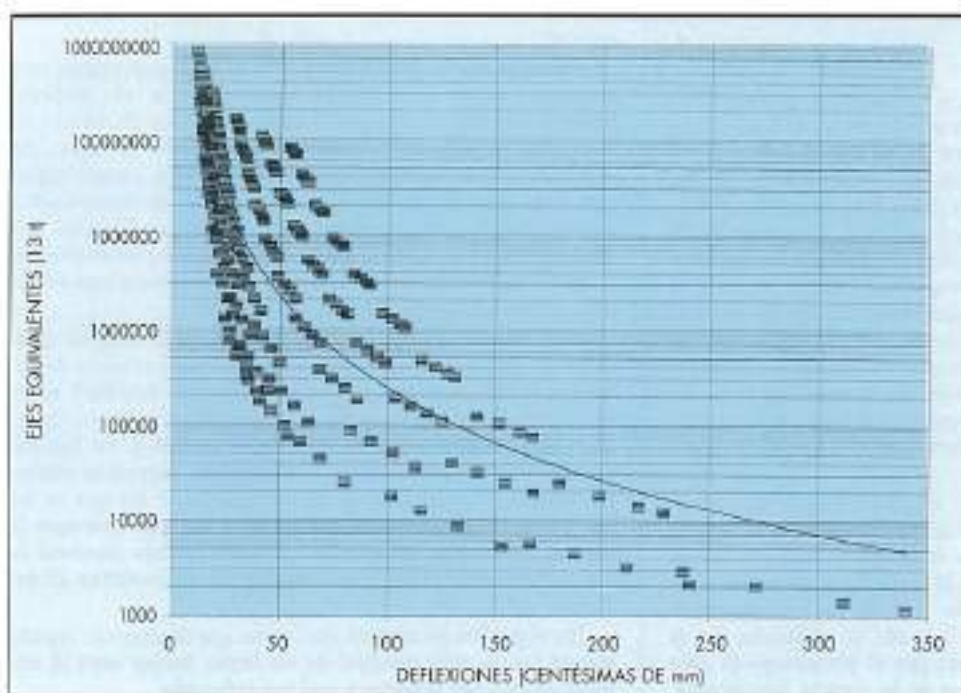


GRÁFICO 2. Relación vida del firme - deflexión.

FUNCION	PARÁMETROS	R ²	ECUACIÓN
vida = f (mb, mg, me, rd)	log (vida), log (mb), log (mg), log (me), log (rd)	0,967	$vida = mb^{0.34} mg^{0.13} me^{1.07} rd^{0.04} 10^{0.04}$
vida = f (mb, mg, df, rd)	log (vida), log (mb), log (mg), log (df), log (rd)	0,981	$vida = mb^{0.15} mg^{0.15} df^{-1.08} rd^{0.14} 10^{0.08}$
vida = f (mb, mg, df)	log (vida), log (mb), log (mg), log (df)	0,981	$vida = mb^{0.15} mg^{0.15} df^{-1.08} 10^{0.08}$
vida = f (mb, df, rd)	log (vida), log (mb), log (df), log (rd)	0,980	$vida = mb^{0.03} df^{-1.07} rd^{0.11} 10^{0.05}$
vida = f (mb, df)	log (vida), log (mb), log (df)	0,980	$vida = mb^{0.17} df^{-1.71} 10^{0.12}$

Siendo:

mb = Espesor de la capa de mezcla bituminosa en cm.
mg = Espesor de la capa de material granular en cm.
me = Módulo de elasticidad de la explanada en kg/cm².
df = Deflexión en centímetros de mm.
rd = Radio de curvatura en m.
vida = Vida del firme en ejes tipo de 13 t.

CUADRO 4.

5. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE REFUERZO DE FIRMES FLEXIBLES Y SEMIFLEXIBLES

Para estimar el espesor necesario de refuerzo de un firme flexible o semiflexible, se han considerado dos parámetros nuevos, que son la vida residual del firme original y el tráfico que se prevé va a circular por el firme reforzado durante su vida de proyecto.

Para determinar la vida residual de un firme es necesario conocer, en primer lugar su vida teórica total. Es decir, el número de ejes de 13 t (N) que provocaría el agotamiento total del firme. En segundo lugar es necesario partir del número de ejes de 13 t (N₀), que han circulado por la carretera desde su puesta en servicio.

Con todo esto se calcula la vida residual como el porcentaje de vida del firme no consumida. De forma práctica se considera el número ejes de 13 t que pueden circular en el futuro por la carretera antes de que se fatigue (N-N₀) y se divide por la vida total del firme N, expresando el resultado en tanto por ciento. La fórmula que se aplica es:

$$V_r = \frac{N - N_0}{N} \times 100$$

A partir de la vida residual, y haciendo una previsión del tráfico que va a circular por la carretera en el periodo de proyecto N₀, se puede determinar el espesor de refuerzo de un firme. Así, por ejemplo, si se tiene un firme cuya vida total es de N ejes de 13 t, y dicho firme ha consumido el 30% de su vida, la vida residual será del 70%. Si se calcula la vida del firme reforzado, añadiendo el espesor de refuerzo, y el resultado fuera de N₁, la vida que en realidad le queda al firme es 0,7 N₁ que debe coincidir con el número de ejes que se prevé va a circular por la carretera en el periodo de proyecto N₀. Se puede estimar entonces el espesor de refuerzo necesario para cumplir esta condición, despejando la incógnita de las expresiones simplificadas que relacionan la vida del firme reforzado con otros parámetros y que se analizarán a continuación.

Hay que tener en cuenta que, al reforzar un firme, disminuye la deformación de la fibra inferior de la capa de mezcla bituminosa. Al aplicar las leyes de fatiga, el número de ejes que aguantaría el firme reforzado sería N₁, si no hubiera soportado ninguna carga. Cuando el firme ya ha consumido parte de su vida antes de ser reforzado, se considera que la nueva vida será N₁ multiplicado por el porcentaje de vida que le queda a la fibra inferior de la mezcla bituminosa.

Como es evidente, esta nueva vida obtenida es mayor que la que le quedaría al firme si no se reforzara, ya que N₁ siempre será mayor que N.

Se han realizado numerosos cálculos sobre la vida de los firmes reforzados considerando espesores de refuerzo de 5, 8 y 10 cm sobre las estructuras originales. Se ha representado en el gráfico 3, la vida de cuatro firmes sin reforzar, que tienen características extremas dentro de los analizados, para ver cuál será su vida con un refuerzo de 5 cm y una vida residual del 20%. Esto permitirá determinar como influye el espesor de refuerzo en el aumento de la vida de un firme para una misma vida residual.

El aumento de número de ejes que soporta un firme, para el mismo espesor de refuerzo, es mayor cuanto más espesor tiene la mezcla bituminosa del firme existente antes del refuerzo. El espesor de material granular tiene una influencia relativa menor en la vida del firme una vez reforzado.

En cuanto al módulo de elasticidad de la explanada, cuanto mayor es su valor, mayor es el número de ejes que soporta el firme con el refuerzo, pero este aumento parece proporcionalmente menor que en el caso de la mezcla bituminosa.

De todo esto se puede concluir que la característica que tiene más importancia sobre el aumento de la vida de firme para un espesor de refuerzo dado es el espesor de mezcla bituminosa, seguido del módulo de elasticidad de la explanada y del espesor de material granular. Por ello, parece lógico que, a la hora de plantear una estrategia de conservación preventiva, el actuar sobre los firmes menos flexibles sea más rentable que hacerlo sobre los que tienen un menor espesor de mezcla bituminosa, porque con el mismo espesor de refuerzo se consiguen mejores resultados.

Otro aspecto digno de analizar, sobre todo dirigido a establecer una estrategia de conservación preventiva de los firmes, es la importancia que tiene la vida residual sobre el aumento del número de ejes que soportará un firme después de reforzado. Por ello, en el gráfico 4, se han representado dos firmes de características extremas dentro del campo de variación de los estudiados, a los que se les ha aplicado un refuerzo de 5 cm y en los que aparecen la vida de los firmes reforzados variando la vida residual de los firmes originales en el momento de realizar el refuerzo.

En el gráfico se aprecia que, como era de esperar, cuanto mayor sea la vida residual de un firme, mayor será el número de ejes que soportará una vez reforzado.

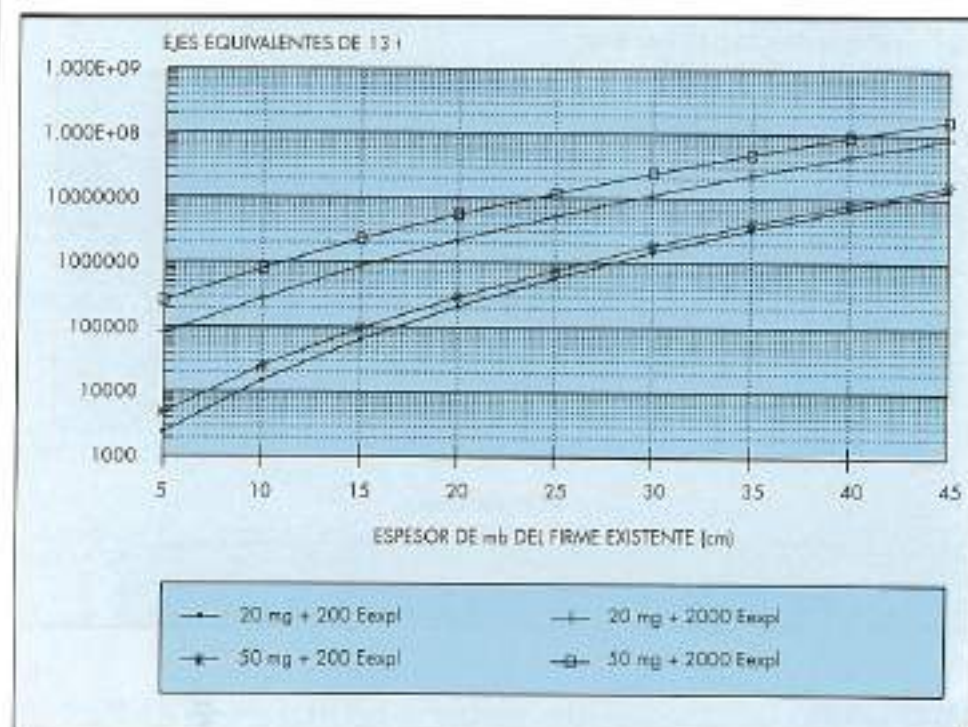


GRÁFICO 3. Vida del firme para refuerzos de 5 cm y vida residual del 20%.

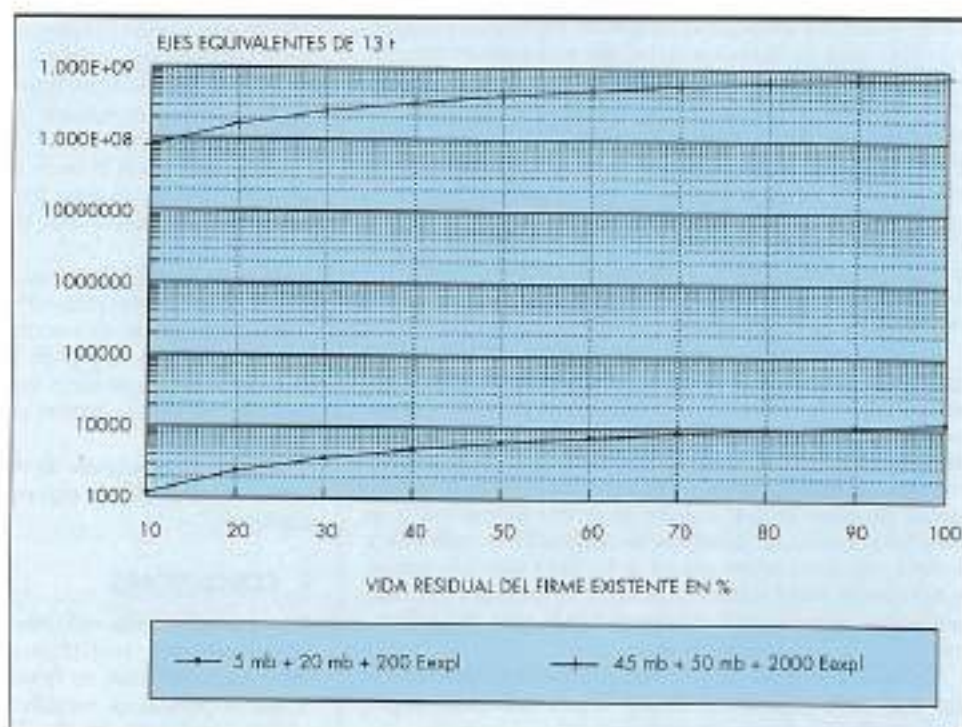


GRÁFICO 4. Importancia de la vida residual en el refuerzo de un firme.

A continuación, se ha estudiado el aumento de vida de un firme concreto, para distintas vidas residuales, cuando se le refuerza con un espesor de 5 cm de mezcla bituminosa. El resultado es el reflejado en el gráfico 5.

En el gráfico se aprecia de nuevo que cuanto mayor sea la vida residual de un firme, mayor será el número de ejes que soportará una vez reforzado. Esto parece confirmar la hipóte-

sis de que una conservación preventiva dará mejores resultados que una actuación correctiva. No obstante, al tratarse de líneas rectas, no se puede saber con los datos que se tienen, cuál será el momento idóneo para actuar. Para determinarlo, será necesario realizar estudios económicos y de rentabilidad más detallados en los que influirán aspectos tales como el crecimiento del tráfico, el interés del dinero, el tipo de firme, etc.

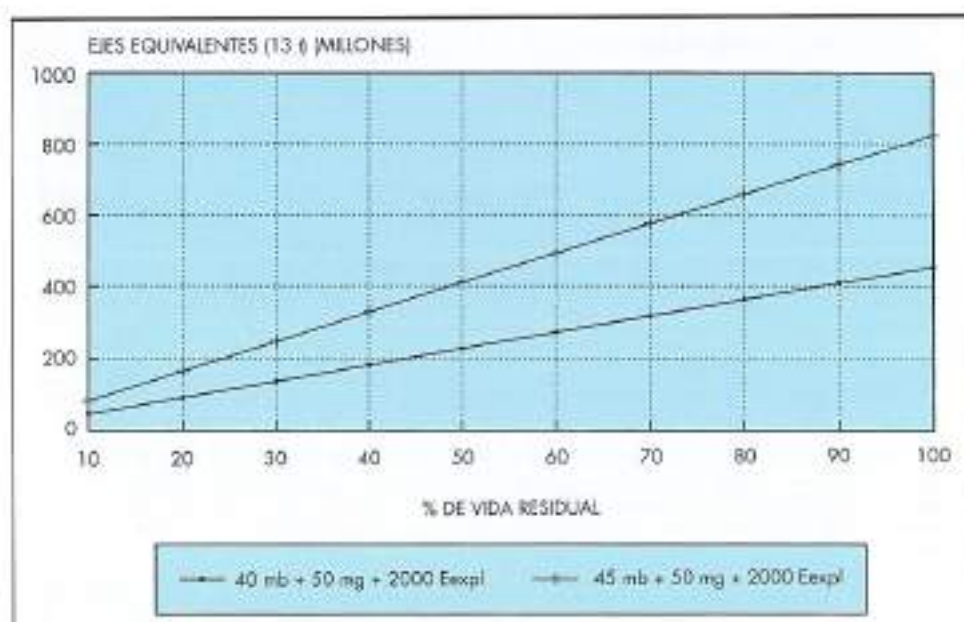


GRÁFICO 5. Vida de un firme para refuerzo de 5 cm.

6. EXPRESIONES SIMPLIFICADAS DE LA VIDA DE UN FIRME REFORZADO

Un aspecto muy interesante para estimar de forma sencilla la conveniencia o no de un determinado espesor de refuerzo es la obtención de fórmulas en las que se pueda estimar la vida de un firme una vez realizado el refuerzo. Haciendo previsiones sobre el tráfico que va a circular por un determinado firme, se puede deducir de forma aproximada el espesor de refuerzo sin necesidad de acudir a métodos de cálculo más complejos.

La utilidad de estas fórmulas no se reduce únicamente a lo anterior, sino que, también se puede utilizar para hacer previsiones sobre la vida que tendrá el firme reforzado. Esto es útil sobre todo a la hora de establecer las estrategias de conservación de las carreteras.

Para obtener estas fórmulas, se han establecido regresiones bilogarithmicas entre diversos parámetros, que son el espesor de mezcla bituminosa, el espesor de material granular, el módulo de elasticidad de la explanada, la deflexión, su radio de curvatura, el espesor de refuerzo y la vida residual que tenía el firme original en el momento de realizar el refuerzo. De todos ellos, el espesor de mezcla bituminosa y de material granular, el módulo de la explanada, la deflexión y el radio, son parámetros que ya se ha visto que influyen en la vida de un firme sobre el que no se ha actuado. Por ello, también se incluyen en la estimación de la vida de un firme reforzado.

El espesor de refuerzo y la vida residual son características necesarias para el estudio de firmes reforzados y, por tanto, también influirán en su vida.

En el cuadro 4, se ha tomado la vida del firme reforzado como parámetro dependiente. Como es lógico, en todas ellas aparece la vida residual del firme original y el espesor de refuerzo. El resto de los parámetros se han combinado y se han ido eliminando para poder analizar su importancia relativa.

En el cuadro 4, se presentan algunas combinaciones (no todas), de los parámetros citados, en las que se observa un buen grado de correlación.

Si se comparan entre sí las expresiones 2^a y 3^a y 4^a y 5^a (en las que la única diferencia es que se ha eliminado el radio de curvatura como parámetro), se observa que el coeficiente de determinación obtenido disminuye muy poco, por lo que parece que el radio no influye apenas en la vida del firme, siempre que aparezca la deflexión y el espesor de la mezcla bituminosa en la fórmula.

En todas las expresiones aparece el espesor de mezcla bituminosa, ya que es una característica del firme que, como ya se ha indicado a lo largo del artículo, influye de manera determinante en su vida; y, además, la tipología del firme original es muy importante en la vida después de realizado el refuerzo.

Al comparar las ecuaciones 2^a y 4^a , entre sí, y 3^a y 5^a , se observa que la única diferencia entre ellas es que se ha prescindido del espesor de material granular y que el grado de correlación varía muy poco. Esto parece indicar que, como ya se ha repetido en otras ocasiones, el espesor de material granular no influye mucho en la estimación de la vida del firme reforzado.

En cuanto al espesor de refuerzo, en todas las expresiones se observa que su exponente permanece prácticamente constante.

7. CONCLUSIONES

Este artículo puede considerarse como la continuación de uno ya publicado, cuyo título es "Estimación simplificada del valor de la deflexión en firmes flexibles y semiflexibles" en el que se exponía un método que ha servido de base para la realización de este estudio. No obstante, se ha considerado que, además de la estimación de las deflexiones, radios de curvatura y módulos de elasticidad, podría ser interesante, especialmente para la conservación de los firmes, analizar la vida tanto de los firmes nuevos como de los reforzados.

Las regresiones obtenidas entre la vida de los firmes y distintos parámetros han permitido, por una parte, deducir la importancia relativa de cada uno de ellos; por otra, disponer de una herramienta sencilla para estimar la vida de los firmes reforzados y no reforzados con un grado de correlación

FUNCIÓN	PARÁMETROS	R ²	ECUACIÓN
$\text{vida} = f(\text{mb}, \text{rf}, \text{mg}, \text{me}, \text{rd})$	$\log(\text{vida}), \log(\text{mb}), \log(\text{rf}), \log(\text{mg}), \log(\text{me}), \log(\text{rd})$	0,970	$\text{vida} = \%VR (\text{mb}^{1,77} \text{rf}^{1,48} \text{mg}^{0,43} \text{me}^{0,81} \text{rd}^{0,55}) 10^{-2,99}$
$\text{vida} = f(\text{mb}, \text{rf}, \text{mg}, \text{df}, \text{rd})$	$\log(\text{vida}), \log(\text{mb}), \log(\text{rf}), \log(\text{mg}), \log(\text{df}), \log(\text{rd})$	0,979	$\text{vida} = \%VR (\text{mb}^{1,77} \text{rf}^{1,48} \text{mg}^{0,25} \text{df}^{-1,33} \text{rd}^{0,28}) 10^{1,42}$
$\text{vida} = f(\text{mb}, \text{rf}, \text{mg}, \text{df})$	$\log(\text{vida}), \log(\text{mb}), \log(\text{rf}), \log(\text{mg}), \log(\text{df})$	0,978	$\text{vida} = \%VR (\text{mb}^{1,77} \text{rf}^{1,48} \text{mg}^{0,27} \text{df}^{-1,46}) 10^{1,49}$
$\text{vida} = f(\text{mb}, \text{rf}, \text{df}, \text{rd})$	$\log(\text{vida}), \log(\text{mb}), \log(\text{rf}), \log(\text{df}), \log(\text{rd})$	0,977	$\text{vida} = \%VR (\text{mb}^{1,78} \text{rf}^{1,48} \text{df}^{-1,33} \text{rd}^{0,27}) 10^{1,49}$
$\text{vida} = f(\text{mb}, \text{rf}, \text{df})$	$\log(\text{vida}), \log(\text{mb}), \log(\text{rf}), \log(\text{df})$	0,977	$\text{vida} = \%VR (\text{mb}^{1,74} \text{rf}^{1,48} \text{df}^{-1,48}) 10^{1,34}$
$\text{vida} = f(\text{mb}, \text{rf})$	$\log(\text{vida}), \log(\text{mb}), \log(\text{rf})$	0,967	$\text{vida} = \%VR (\text{mb}^{1,75} \text{rf}^{1,48}) 10^{1,31}$

Siendo:

mb = Espesor de la capa de mezcla bituminosa en cm antes del refuerzo.

rf = Espesor de refuerzo del firme en cm.

mg = Espesor de la capa de material granular en cm.

me = Módulo de elasticidad de la explosada en kg/cm².

df = Deflexión en centímetros de mm del firme antes del refuerzo.

rd = Radio de curvatura en m antes del refuerzo.

%VR = Vida residual del firme en % antes de realizar el refuerzo.

vida = Vida del firme reforzado en ejes tipo de 13 t.

CUADRO 5.

ción conocido. Además, hay que tener en cuenta que es frecuente desconocer la totalidad de los parámetros que tienen influencia en la vida de los firmes. Las expresiones obtenidas permiten una estimación con un grado de correlación conocido, aunque se desconozcan algunos de ellos.

Se debe tener en cuenta que se ha partido de ciertas hipótesis que determinan el campo de aplicación de este estudio. No obstante, la metodología sería válida en otros casos, variando las hipótesis o datos de partida.

Por último, cabe señalar que el método seguido tiene la peculiaridad de realizar un análisis estadístico sobre datos obtenidos a partir de cálculos analíticos. La razón principal

es que frecuentemente se desconoce alguno o varios de los parámetros que determinan la vida del firme. Por ello parece lícito aplicar métodos estadísticos a resultados analíticos, ya que se ha estudiado una población suficientemente representativa de los casos que se dan en la realidad.

RECONOCIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a D. Francisco Sinis sus ideas, que han inspirado este trabajo. A D. Alfonso Téllez, su trabajo en la realización del programa de ordenador utilizado. A D. Francisco Achútegui, sus sugerencias y apoyo.

FE DE ERRATAS DEL ARTÍCULO

"ESTIMACIÓN SIMPLIFICADA DEL VALOR DE LA DEFLEXIÓN EN FIRMES FLEXIBLES Y SEMIFLEXIBLES"

A continuación se adjunta la tabla 4 correspondiente al artículo publicado en el número 108/1997 (página 69) de la revista *Ingeniería Civil*, que contenía tres fallos en los signos de los exponentes de la deflexión en las ecuaciones primera, segunda y tercera:

RELACIÓN	PARÁMETROS	R ²	ECUACIÓN
$f(\text{df}, \text{rd}, \text{mb}, \text{mg})$	$\log(\text{me}), \log(\text{df}), \log(\text{rd}), \log(\text{mb}), \log(\text{mg})$	0,985	$\text{me} = \text{df}^{-1,32} \text{rd}^{-0,18} \text{mb}^{-0,59} \text{mg}^{-0,23} 10^{0,70}$
$f(\text{df}, \text{mb}, \text{mg})$	$\log(\text{me}), \log(\text{df}), \log(\text{mb}), \log(\text{mg})$	0,979	$\text{me} = \text{df}^{-1,28} \text{mb}^{-0,62} \text{mg}^{-0,24} 10^{1,40}$
$f(\text{df}, \text{mb})$	$\log(\text{me}), \log(\text{df}), \log(\text{mb})$	0,969	$\text{me} = \text{df}^{-1,27} \text{mb}^{-0,61} 10^{0,00}$
$f(\text{df}, \text{rd})$	$\log(\text{me}), \log(\text{df}), \log(\text{rd})$	0,964	$\text{me} = \text{df}^{-1,46} \text{rd}^{-0,66} 10^{0,75}$
$f(\text{df})$	$\log(\text{me}), \log(\text{df})$	0,691	$\text{me} = \text{df}^{-1,91} 10^{0,21}$
$f(\text{rd}, \text{mb}, \text{mg})$	$\log(\text{me}), \log(\text{rd}), \log(\text{mb}), \log(\text{mg})$	0,495	$\text{me} = \text{rd}^{0,26} \text{mb}^{-1,08} \text{mg}^{-0,28} 10^{1,79}$
$f(\text{rd}, \text{mb})$	$\log(\text{me}), \log(\text{rd}), \log(\text{mb})$	0,482	$\text{me} = \text{rd}^{0,70} \text{mb}^{-1,99} 10^{0,81}$
$f(\text{rd})$	$\log(\text{me}), \log(\text{rd})$	0,040	$\text{me} = \text{rd}^{0,18} 10^{2,11}$

Siendo:

mb = Espesor de la capa de mezcla bituminosa en cm.

mg = Espesor de la capa de material granular en cm.

me = Módulo de elasticidad de la explosada en kg/cm².

df = Valor de la deflexión en centímetros de mm.

rd = Radio de curvatura en m.

TABLA 4.

Calidad de Vida

Drayfil®

Miles y miles de metros de láminas impermeabilizantes de PVC. **DRAYFIL**, instalados en todo tipo de obras, embalses, edificios, túneles, piscinas, depósitos... Hacen de nuestras láminas imprescindibles en guardar lo que necesitamos: **agua** y nos protegen de lo que no deseamos: **humedades**, para una mejor calidad de vida.

