

DISEÑO DE FIRMES MEDIANTE EL EMPLEO DE MODELOS DE PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES GRANULARES

I. Pérez*, L. Medina*, M. Romana*

* Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. Campus de Elviña. 15071 A Coruña. España. Tel.: +34- 981-167000; Fax:+34-981-167170

- Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid. España. Tel.: +34- 1 3366765; Fax:+34-1 3366654.

Introducción

El presupuesto dedicado a la construcción de firmes de carreteras supera el 25% del total de los recursos dedicados a la construcción de carreteras en el mundo. Dentro de los firmes, los empleados con más frecuencia son los denominados flexibles y semiflexibles, que se componen de capas granulares sobre las que se apoyan capas tratadas con ligantes bituminosos. Además, las capas granulares pueden emplearse como bases de firmes rígidos, si se trata de materiales de calidad no erosionables.

Las capas granulares tienen, pues, un papel muy importante en el comportamiento de los firmes. De hecho, la vida útil del firme tiene mucho que ver con la calidad y respuesta de la capa granular. Sin embargo, el relativo bajo coste de estos materiales y su consideración de material heterogéneo y escasamente manufacturado ha llevado tradicionalmente a una consideración insuficiente de los mismos en términos de la predicción de su comportamiento estructural.

Aún así, diversos investigadores han obtenido modelos de predicción de la deformación permanente, pero no han sido completamente incorporados en la normativa técnica de dimensionamiento de firmes de la mayoría de los países. Por este motivo el objetivo de este artículo es examinar la aplicabilidad de los principales modelos que predicen la deformación permanente acumulada en función del número de ciclos de carga y del nivel del esfuerzo. Por tanto, se buscará que este trabajo vaya dirigido hacia la incorporación de estos modelos en el dimensionamiento analítico de firmes en España. El material granular que se ensayará será un árido granítico machacado, utilizado frecuentemente como capa de subbase en firmes carreteras en la Comunidad Autónoma de Galicia.

Material granular empleado y fabricación de la probeta

El material granular es un árido muy utilizado en la construcción de firmes de carreteras en la provincia de A Coruña de la Comunidad Autónoma de Galicia. Cabe decir que su curva granulométrica (figura 1) está inscrita dentro del huso correspondiente al material granular denominado **ZA25**, especificado en el “**Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes**” de España (Ministerio de Fomento, 2002a). En la tabla 1 están reflejados los resultados de otros ensayos de caracterización. Todos cumplen las condiciones impuestas en dicho pliego, con excepción del *coeficiente de Los Ángeles* cuyo valor supera el 30% especificado como máximo (el valor es ligeramente superior, un 37%).

El material se ha elegido para realizar los ensayos por ser un material empleado en bases y subbases granulares, y al mismo tiempo tiene un tamaño máximo de 25 mm, compatible con el equipo triaxial disponible, que permite realizar ensayos con dimensiones máximas de la probeta de hasta 100 mm de diámetro por 200 mm de altura.

Para la fabricación de la probeta se elaboró un molde especial cilíndrico de aluminio, conformado por dos piezas de tal manera que pudiera abrirse longitudinalmente para extraer con una mayor facilidad la muestra compactada. En la primera parte del experimento, se compactaron cuatro probetas de material granular en el molde (pero sin disponer la membrana envolvente), obteniéndose sus densidades secas y humedades. A continuación se fabricaron las probetas que se sometieron al ensayo triaxial. Antes de la compactación del material se adhirió una primera membrana a la pared del recipiente, aplicando un vacío. A continuación, la compactación se realizó en tres tongadas, durante 20 segundos por cada capa mediante un martillo vibrante. Las probetas se compactaron con la humedad óptima (6.4%), y de forma que se alcanzara la densidad seca máxima de referencia (2.3 g/cm^3). Después de haber sido realizada la compactación y antes de realizar los ensayos dinámicos propiamente dichos, la muestra se mantuvo durante 24 horas en una cámara húmeda a una temperatura de 20° C con una humedad relativa del 95%.

Equipo triaxial y trayectoria de tensiones

Los ensayos se llevaron a cabo empleando un equipo triaxial dinámico formado, fundamentalmente, por una unidad principal que contiene el sistema generador de la carga axial y por una cámara extraíble. Dispone de tres controladores que generan la presión de cámara, la de cola y la de aire en las muestras parcialmente saturadas. El fluido empleado es normalmente agua desaireada, si bien con probetas de materiales granulares puede emplearse también aceite. Las señales analógicas enviadas por los transductores y la célula de carga se reciben en un módulo donde se transforman en señales digitales. El sistema posee un convertidor de las señales digitales enviadas por el ordenador. Este sistema se encuentra dentro de la unidad principal y posibilita la transmisión de órdenes del usuario al controlador del motor. Todo el sistema es controlado por un PC, en el que se ha instalado el software adecuado para permitir una adecuada y cómoda comunicación entre el usuario y el equipo triaxial. El software permite escoger el tipo de ensayo a realizar y la elección de todos los parámetros del mismo, la elección de trayectorias tensionales, los datos a almacenar, etc.

Como se ha indicado, este equipo está limitado a probetas de un máximo un diámetro de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Además, el equipo permite someter la probeta a tensiones axiales desviadoras de carácter cíclico, pero no es factible variar al mismo tiempo las tensiones radiales de confinamiento.

La trayectoria de tensiones se eligió en función de los esfuerzos producidos en una sección de firme empleada en España. En concreto se estudió la sección **031** de la “**Orden circular 10/2002 sobre secciones de firme y capas estructurales de firmes**” (Ministerio de Fomento, 2002b) conformada por 30 cm de mezclas bituminosas (capa de rodadura + capa intermedia + base) y una subbase de 25 cm de material granular que descansan sobre una explanada del tipo **E3** (un suelo con pocos finos, plasticidad baja y un **CBR** superior a 20). Por consiguiente, se calcularon las tensiones principales en la sección en cuestión, adoptando como hipótesis de carga un eje simple de 13 toneladas con ruedas sencillas, con una presión de contacto de 900 kPa y una huella circular de 15.16 cm de radio. El cálculo se realizó con un modelo **3D** de la sección y un programa de diferencias finitas (**FLAC 3D**), y su

resultado fue que en la capa de subbase la relación máxima entre la tensión desviadora (**q**) y la tensión normal media (**p**) es igual 2. Por esta razón, se decidió someter la probeta a una trayectoria de tensiones con unas relaciones **q/p** crecientes hasta alcanzar la máxima de 2. Con este cometido se realizaron cinco ensayos dinámicos de 200000 ciclos de carga con una onda senoidal de 1 Hz de frecuencia. En los mismos se aplicó un esfuerzo de confinamiento constante (σ_3) de 50 kPa, con unas tensiones desviadoras máximas (**q**), alcanzadas en los picos de los ciclos, de 200 kPa; 227 kPa; 250 kPa; 275 kPa y 300 kPa. Como es lógico, durante los ensayos las tensiones desviadoras oscilaban entre cero y la máxima requerida.

Modelos de deformación permanente

Deformación permanente en función del número de ciclos

Sweere (1990) investigó la relación existente entre el logaritmo de la deformación unitaria permanente axial acumulada y el logaritmo de las repeticiones de carga. En sus investigaciones encontró una buena relación lineal entre ambos factores. Sin embargo, concluyó que resultaba más exacto un modelo no lineal de dos parámetros que predice directamente la deformación permanente en función del número de ciclos:

$$\varepsilon_{1p} = A \cdot N^B \quad (1)$$

siendo ε_{1p} la deformación unitaria permanente axial acumulada después de **N** ciclos de carga realizados mediante un ensayo triaxial dinámico. **A** y **B** son parámetros de regresión no lineal. Como puede apreciarse, la ecuación 1 predice una deformación infinita para un número de ciclos infinito.

Otro modelo no lineal fue el utilizado por Wolff *et al* (1994). Éstos midieron directamente la deformación permanente producida en la capa de base granular de un firme, comprobando que para un gran número de ciclos ($N > 10^6$) los valores predichos por la ecuación 1 divergen de los valores reales. Por eso propusieron un modelo de la forma siguiente:

$$\varepsilon_{1p} = (m \cdot N + A)(1 - e^{-B \cdot N}) \quad (2)$$

siendo **m**, **A** y **B** parámetros de regresión no lineal. La ecuación 2 también predice una deformación infinita para un número de ciclos infinito.

Por otra parte, diversos investigadores (Paute *et al* (1988) han demostrado que existe una relación lineal entre el logaritmo de la derivada de ε_{1p} con respecto a **N** ($\ln \delta \varepsilon_{1p} / \delta N$) y el logaritmo del número de ciclos $\ln(N)$. A partir de esta hipótesis Paute *et al* (1988) obtuvieron una ley exponencial que sirve para predecir la acumulación de la deformación permanente:

$$\varepsilon_{1p}(N) = A \cdot N^B + C \quad (3)$$

siendo **A**, **B** y **C** coeficientes de regresión no lineal. Esta ecuación también tiene el inconveniente de predecir una deformación infinita para un número de ciclos infinito.

Por otro lado, Hornych *et al* (1993) y Paute *et al* (1994) argumentaron que los estudios realizados en los *Laboratoires des Ponts et Chaussées* han demostrado que las deformaciones permanentes que se producen

durante los 100 primeros ciclos son muy erráticas y dependen excesivamente de las condiciones de elaboración de la probeta de material granular y de su colocación en la celda triaxial. Por eso dedujeron un modelo en el que le restaron a la deformación permanente después de N ciclos la deformación permanente en los 100 primeros ciclos. La expresión en cuestión, analizada por Hornych *et al* (1996) y Paute *et al* (1994; 1996) se conoce en la literatura técnica como el “*Modelo de Paute*”:

$$\varepsilon_{1p}^*(N) = A \cdot \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right] \quad (4)$$

siendo $\varepsilon_{1p}^*(N)$ la deformación unitaria axial permanente acumulada restando los 100 primeros ciclos. A y B son parámetros de regresión no lineal. Según Paute *et al* (1994) ambos parámetros A y B son casi siempre positivos. De acuerdo a estos autores, solamente en algunos ensayos se obtienen valores negativos o sin un significado físico claro cuando el valor de B es muy pequeño. Por tanto, esta última ecuación tiene la clara ventaja, con respecto a los tres primeros modelos, de que para $B > 0$, $\varepsilon_{1p}^*(N)$ tiende hacia un límite finito A para N igual a infinito. En la ecuación 4 el parámetro A es considerado como el valor límite de la deformación axial permanente acumulada cuando N tiende a infinito. Por otro lado, según Paute *et al* (1994), cuando el parámetro B es demasiado pequeño, debe considerarse un valor práctico como límite de la deformación permanente. En la práctica, los autores recomiendan comparar el valor de A con el valor de dos veces la deformación permanente correspondiente a los primeros 20000 ciclos; que es igual a $2 \varepsilon_{1p}^*(20000)$. Cuando A sea mayor que $2 \varepsilon_{1p}^*(20000)$ debe tomarse como valor práctico éste último.

Deformación permanente en función del esfuerzo

Los cuatro modelos presentados anteriormente muestran el gran inconveniente de no tener en cuenta el nivel de esfuerzos aplicado al material granular. Por esta razón Paute *et al* (1994) realizaron ensayos con diferentes trayectorias de tensiones en los cuales se demostraba que la variación del parámetro A (límite de la deformación permanente) con respecto al nivel de esfuerzo se puede expresar mediante la ecuación denominada como “*segunda parte del modelo de Paute*”:

$$A = \frac{\frac{q}{(p+p^*)}}{a - b \cdot \frac{q}{(p+p^*)}} \quad (5)$$

siendo a y b coeficientes de regresión. En la fórmula anterior p^* es un parámetro definido mediante la intersección de la línea de falla del material, obtenida mediante ensayos triaxiales estáticos; y el eje de p en un espacio de tensiones p - q (Paute *et al* (1994)). En la ecuación 5, cuando la ecuación de la línea de falla es $q_f = m \cdot p + s$ entonces el valor de p^* es igual a s/m ; siendo q_f la carga de rotura, m la pendiente de la línea y s el término independiente. Esto indica, por un lado, que A se incrementa cuando la relación q/p aumenta y, por otro, que A es infinito cuando se alcanza un valor límite (igual a a/b) para la relación $q/(p+p^*)$. Tal y como manifestó Lekarp (Lekarp, 1997), es evidente que si se conoce la línea de falla del material, bastará conocer un solo valor de q/p para poder estimar los coeficientes a y b de la ecuación 5.

Otro modelo que relaciona la deformación permanente con el nivel de esfuerzos es el propuesto por el propio Lekarp (1998):

$$\frac{\varepsilon_{1p}(N_{ref})}{(L/p_0)} = a \cdot \left(\frac{q}{p}\right)_{max}^b \quad (6)$$

siendo:

$$\frac{\varepsilon_{1p}(N_{ref})}{(L/p_0)} = \text{Deformación unitaria axial permanente acumulada para un número dado de ciclos } N_{ref} (N_{ref} > 100) \text{ dividida entre la longitud de la trayectoria de tensiones.}$$

$$L = (q^2 + p^2)^{0.5} = \text{Longitud de la trayectoria de tensiones.}$$

$$(q/p)_{max} = \text{Relación de esfuerzos máxima.}$$

$$a, b = \text{Parámetros de regresión.}$$

$$p_0 = \text{Esfuerzo de referencia igual a 1 kPa.}$$

Lekarp (1998) utilizó como deformación permanente acumulada de referencia la correspondiente a 20000 ciclos, obteniendo buenos coeficientes de determinación. Este investigador argumentó que la pérdida de exactitud en la predicción debido a la reducción del número de ciclos es de muy poca importancia práctica.

Clasificación del material granular utilizando el “*shakedown concept*”

Con el fin de clasificar la respuesta estructural del material a las aplicaciones de los ciclos de carga y, por tanto, al esfuerzo se empleará el criterio propuesto por Werkmeister *et al* (2003). Según este criterio, un material puede estar, según su comportamiento, en uno de estos tres casos:

- “*Rango A*”, (*Plastic Shakedown*), cuando el índice de deformación permanente (deformación permanente por ciclo de carga) disminuye rápidamente hasta llegar a un estado de equilibrio. La deformación es enteramente resiliente y no se producen deformaciones permanentes. El material no alcanza el fallo.
- “*Rango B*”, (*Plastic Creep*), cuando el índice de deformación permanente puede disminuir o aumentar. Aunque la deformación no es enteramente resiliente, la deformación permanente es aceptable. Para un gran número de ciclos de carga el material puede alcanzar el fallo.
- “*Rango C*”, (*Incremental Collapse*), cuando la deformación permanente aumenta muy rápidamente, ocurriendo el fallo con un número de ciclos de carga relativamente pequeño.

En la figura 2 está representado ε_{1p}/N versus ε_{1p} para las cinco condiciones de esfuerzos en que se realizaron los ensayos triaxiales dinámicos. En ésta se observa que en las tres curvas con tensiones desviadoras de 200 kPa; 227 kPa y 250 kPa, a medida que disminuye el citado índice, la deformación unitaria axial permanente acumulada se incrementa relativamente muy poco. De tal forma que se originan tres líneas sensiblemente verticales y paralelas, que están indicando que en la práctica se ha producido una estabilización del material granular. Utilizando la clasificación del “*shakedown concept*” de Werkmeister, se puede decir que el material está en estos casos en el “*rango A*”. Por lo tanto, bajo estas cargas, según dicha clasificación, con este rango no se producirían roderas plásticas en el material. Por otro lado, en la misma figura se aprecia muy claramente que para $q=275$ kPa, el incremento de ε_{1p} es mucho más acentuado. Aquí la línea ya no es casi vertical, es menos inclinada y la

disminución del índice no produce una estabilización de la deformación permanente, sino que con el aumento de \mathbf{N} se origina un fuerte aumento de ϵ_{1p} . Posiblemente, al principio el material está entre el “*rango B*” y el “*rango C*”, aunque al aumentar \mathbf{N} se pasa manifiestamente a un “*rango C*”, con lo que se producirán roderas plásticas. Por último, en la línea que representa el caso de $q=300$ kPa, al principio el incremento de ϵ_{1p} es todavía mucho más acentuado. Curiosamente, parece que se produce una ligera estabilización en la zona central (entre $\epsilon_{1p}=1.4\%$ y $\epsilon_{1p}=1.6\%$), para aumentar considerablemente ϵ_{1p} al final de la curva. Aquí, el material está en el “*rango C*”, sobre todo al final de la línea, lo que indica que se producirían roderas plásticas.

Bondad de ajuste de los modelos

En la tabla 2 se observan todos los valores de los parámetros de las ecuaciones 1, 2, 3, 4; así como los coeficientes de determinación R^2 . En la figura 3 están representados gráficamente los valores predichos por la ecuación 1 (*Modelo de Sweere*) y los datos reales para las cinco tensiones desviadoras. En general se puede apreciar que los datos reales se aproximan a las líneas continuas de los modelos. En este sentido, el ajuste se puede considerar satisfactorio, ya que en todos los casos los coeficientes de determinación (R^2) arrojaron un resultado por encima del 93% (tabla 2). Una cuestión interesante es que el análisis estadístico de los residuos indicó que a largo plazo (esto es, para un elevado número de ciclos), esta ecuación tiende a subestimar los valores reales de ϵ_{1p} .

Por el contrario, tal y como se aprecia en la Figura 4, los coeficientes de determinación (R^2) de la ecuación 2 (*Modelo de Wolff*) para $q=200$ kPa; $q=227$ kPa y $q=250$ kPa, no dan valores tan satisfactorios como los ofrecidos por la ecuación 1. Aún así los ajustes son aceptables, del orden del 85%. En las curvas correspondientes a $q=275$ kPa y $q=300$ kPa, el ajuste es bastante mejor, siendo R^2 superior al 93% (tabla 2). Del análisis de los residuos se dedujo que a largo plazo la ecuación 2 tiende a sobrestimar valores reales de ϵ_{1p} .

Por otro lado, al realizar los análisis de regresión no lineal de la ecuación 3 se obtuvieron los valores de los tres coeficientes \mathbf{A} , \mathbf{B} y \mathbf{C} (tabla 2). En la figura 3 se observa un ajuste muy bueno entre los valores estimados y los valores observados de la deformación permanente (R^2 superiores al 95%). La ecuación 3 también subestima los valores reales de ϵ_{1p} a largo plazo.

La ecuación 4 (*Modelo de Paute*) presenta valores de R^2 superiores al 90%, excepto en el caso de $q=275$ kPa, en el que vale 81%. Los valores de \mathbf{B} son siempre negativos y pequeños. En la figura 3 se ve claramente que los valores de los parámetros \mathbf{A} (Tabla 2) no representan el límite de $\epsilon_{1p}^*(\mathbf{N})$. Por eso los valores prácticos son los correspondientes a $2 \epsilon_{1p}^*(20000)$, reflejados en la tabla 3. Obsérvese que en las curvas correspondientes a la ecuación 4 de la figura 3, los límites de las tendencias de crecimiento de $\epsilon_{1p}^*(\mathbf{N})$ (que predice el modelo) se aproximan bastante a estos valores prácticos. A largo plazo, la ecuación 4 también subestima los valores reales de $\epsilon_{1p}^*(\mathbf{N})$.

Por otra parte, se realizaron tres ensayos triaxiales estáticos que permitieron determinar la línea de falla del material granular mediante la ecuación $q_f=1.25 p+171.28$. Por tanto, se tomó como pendiente de la recta $m=1,25$ y como término independiente $s=171.28$. A partir de estos resultados, se obtuvieron los valores de los parámetros \mathbf{a} y \mathbf{b} de la ecuación 5 (*segunda parte del Modelo de Paute*). Como se observa en la tabla 3, los parámetros \mathbf{a} y \mathbf{b}

son diferentes para los cinco valores de las tensiones desviadoras. Este hecho se aprecia claramente en la figura 4, donde aparecen cinco curvas diferentes. Además, el valor práctico de **A** tiende a infinito cuando **m** se acerca a 1.25. Si se cumpliera la segunda parte del *modelo de Paute* deberían coincidir exactamente las cinco curvas.

Por último, para estimar los parámetros de la ecuación 6 (*Modelo de Lekarp*) se decidió seguir el mismo criterio adoptado por el autor (Lekarp, 1998). Por eso, se tomaron los valores de la deformación permanente correspondiente a 20000 ciclos. Los parámetros **a** y **b** de la ecuación 6 son 1.439×10^{-5} y 11.892 respectivamente. El coeficiente **R²** es igual al 94.80%. En la figura 5 se puede observar el ajuste de este modelo: existe una buena coincidencia entre los valores observados y los predichos por el modelo teórico.

Deformaciones plásticas (roderas)

Para estimar la profundidad de las roderas debidas a la deformación permanente de la subbase granular se tendrán en cuenta las deformaciones unitarias axiales $\epsilon_{1p}(\%)$ experimentadas con el mayor nivel de esfuerzos ($q/p_{\max} = 2$); es decir, las que se corresponden con la tensión desviadora **q**=300 kPa y la tensión esférica **p**=150 kPa, producida a su vez por una carga de 13 toneladas en la sección **031**. Dicha profundidad es, sencillamente, el producto de la predicción de la deformación unitaria $\epsilon_{1p}(\%)$ por el espesor de la subbase granular (250 mm). Las deformaciones se han obtenido con las fórmulas 1, 2, 3 y 4. Además, se ha desechado la segunda parte del modelo de Paute, ya que, como se ha visto en el apartado anterior, no se cumple en este caso. Tampoco se ha utilizado el modelo de Lekarp porque no tiene en cuenta el número de ciclos a largo plazo.

Por otro lado, cabe mencionar que en la norma de firmes española está previsto que la sección **031** soporte entre 4000 y 2000 vehículos pesados por día en el carril de servicio. Conocida esta información, en este artículo se tomaron 4000 vehículos pesados por día para estimar (mediante la ecuación 7) el número de ejes de 13 toneladas previstos en el año de proyecto en el carril de servicio:

$$N_T = VP \times C_1 \times A_1 \times 365 \quad (7)$$

siendo:

- N_T** = Número de ciclos de la carga estándar de 13 toneladas durante el período de servicio del firme.
- VP** = Intensidad diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto, en el año de puesta en servicio.
- C₁** = Factor de crecimiento.
- A₁** = Factor de equivalencia de un vehículo pesado en ejes estándar.

Con una tasa de crecimiento anual prevista del 2% para un período de 20 años se tiene un factor de crecimiento (**C₁**) igual a 24.30. Por otro lado, el factor de equivalencia (**A₁**) es igual a 0.70. Bajo estas premisas el período de servicio es igual a un número de ejes estándar (**N_T**) es igual a 24.83×10^6 . En la figura 6 se aprecia que la deformación plástica predicha con la ecuación 2 crece muy rápidamente con el número de ejes **N**. Sin embargo, con las ecuaciones 1, 3 y 4; la deformación crece mucho más lentamente. Así, en el período de servicio del firme, con la ecuación 2 se predice una rodera plástica de 211.30 mm; mientras que con las ecuaciones 1, 3 y 4 se predicen deformaciones de 7.76 mm; 6.42 mm y 4.03 mm, respectivamente (Tabla 4 y Figura 6).

Discusión de los resultados

De los resultados de los ensayos triaxiales se desprende que el crecimiento de la deformación permanente no se comporta de la misma manera en todos los estados de carga. En las curvas con tensiones desviadoras de 200, 227 y 250 kPa se produce un crecimiento muy lento de ϵ_{1p} , dando prácticamente lugar a una estabilización (“*rango A*”) de Werkmeister. Por otra parte, en las curvas con tensiones desviadoras de 275 y 300 kPa el crecimiento es mucho más acentuado y no se aprecia una estabilización del material (“*rango C*”). Este resultado se debe a que cuando los valores de las tensiones desviadoras están más cercanos a la línea de falla del material se produce una notoria aceleración del incremento de ϵ_{1p} .

Empleando las ecuaciones 1, 3 y 4 se obtiene un mejor ajuste para los estados de tensiones de 200 kPa, 227 kPa y 250 kPa, mientras que en la ecuación 2 el coeficiente R^2 es mayor para los casos de 275 kPa y 300 kPa.

La ecuación 1 (*Modelo de Sweere*) da un ajuste muy bueno, aunque, como se ve claramente en la figura 3, cuando el material granular se encuentra en “*rango C*” (a partir de 100000 ciclos aproximadamente) subestima los valores reales de la deformación. Como se apuntó anteriormente, este modelo tiene el inconveniente de dar, predicciones situadas por debajo de los valores reales para números de ejes elevados.

Tal y como se observa en la figura 3, cuando el material está en el “*rango C*” la ecuación 2 (*Modelo de Wolff*) se ajusta mejor a partir de 10000 ciclos. Las mayores discrepancias entre los valores previstos y observados se manifiestan durante los primeros 1000 ciclos. No obstante, hay que tener cuidado a la hora de realizar predicciones a largo plazo, ya que este modelo es muy conservador.

La ecuación 3 (*modelo no lineal de tres parámetros*) es la que presenta un mejor ajuste entre los datos reales y los previstos. Sin embargo, este modelo presenta el mismo inconveniente de la ecuación 1. Como se aprecia en la figura 3, subestima los valores reales de ϵ_{1p} cuando el material está en el “*rango C*”. Por lo tanto, también tienen la desventaja de ofrecer a largo plazo valores de la deformación inferiores a los reales.

La ecuación 4 (*Modelo de Paute*) también subestima los valores reales para un gran número de ciclos en el “*rango C*”. Además, como se observa en la tabla 2, los valores de \mathbf{B} son siempre pequeños y negativos. El hecho de que los valores de los parámetros \mathbf{A} no coincidan con los límites de la deformación permanente, indica que este modelo no funciona adecuadamente, ya que la ventaja de este modelo debería ser la predicción del límite de la deformación permanente para un número de ciclos infinito. Sin embargo, en este caso hubo que adoptar los valores prácticos ($2 \epsilon_{1p}^* (20000)$) como límites de la deformación permanente (tabla 3).

En cualquier caso, hay que recordar que, en realidad, las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 no son modelos completos, ya que solamente relacionan ϵ_{1p} con \mathbf{N} y no tienen en cuenta, por ejemplo, el nivel de esfuerzos aplicado.

Los resultados confirman que, como comprobó Lekarp (1997), la ecuación 5 (*Segunda parte del Modelo de Paute*) no expresa de una manera adecuada la variación del parámetro \mathbf{A} (valores prácticos) en función del esfuerzo (figura 4). En este sentido, la ecuación 5 (*Modelo de Lekarp*) origina una mejor predicción de la

deformación permanente en función del esfuerzo, aunque tiene el inconveniente de no considerar los ciclos de carga aplicados al material.

En cuanto a las predicciones de la deformación ofrecidas por las ecuaciones 1, 2 y 3, cabe decir que, como se aprecia en la figura 4, son bastante similares hasta un número de ciclos igual a 100000. A partir de aquí las predicciones de la ecuación 2 aumentan muy rápidamente, mientras que las de las ecuaciones 1 y 3 se mantienen dentro de un mismo orden. Como es lógico, las predicciones de la ecuación 4 son diferentes porque no se tiene en cuenta la deformación permanente acumulada durante los 100 primeros ciclos (Figura 6).

Es evidente que adoptando el criterio de fallo del *Asphalt Institute* (rodera de 13 mm en la superficie del firme), la predicción ofrecida por la ecuación 2 (211.30 mm) supera ampliamente la suma de la deformación permanente máxima que se consideraría admisible aún para todas las capas del firme. Por otro lado, las predicciones de las ecuaciones 1, 3 y 4 no superan estos 13 mm, por lo que no implicarían un fallo del firme, aunque esto no signifique que estas deformaciones sean aceptables. Para poder comparar con dicho límite, habría que sumarle a la deformación prevista de la subbase granular, también, la deformación prevista para la explanada y capas de mezclas bituminosas.

Los valores obtenidos con la ecuación 2 caen del lado de la seguridad, por lo que puede considerarse que esta ley es muy conservadora y tiende a rechazar materiales que podrían ser estructuralmente válidos. Para más de 100000 ejes las ecuaciones 1, 3 y 4 están del lado de la inseguridad (en el sentido de que predicen deformaciones inferiores a las reales y podrían, consecuentemente, aceptar materiales que podrían no ser estructuralmente válidos).

Por todo ello, parece aconsejable tomar como principal criterio de fallo el hecho de que el material granular esté situado en el “*rango C*” para el número de ejes que debe soportar la sección y, por lo tanto, rechazar el uso de este material en la sección **031**, ya que se producirían roderas plásticas no admisibles.

Conclusiones

De los resultados de esta investigación se desprenden las conclusiones siguientes:

- La ecuación 1, 2 y 3 son modelos que predicen a largo plazo unas deformaciones plásticas menores de las que realmente se producen. Sin embargo, la ecuación 2 es un modelo de predicción que a largo plazo arroja resultados superiores a los reales. Todos estos modelos tienen la desventaja de no considerar el nivel de esfuerzos.
- La segunda parte del modelo de Paute no expresa adecuadamente la variación del valor del parámetro **A** (de la ecuación 4) con respecto al esfuerzo.
- El modelo de Lekarp da buenas predicciones, pero tiene el inconveniente de no considerar los ciclos de carga que se producen a largo plazo.
- El material granular analizado no resulta adecuado para su utilización como capa de subbase de la sección **031** de firmes de carreteras en Galicia. Esto es así porque con las tensiones que debe soportar cae dentro del

“*rango C*” de la clasificación del “*shakedown concept*”, lo cual manifiesta que se producirán roderas plásticas. Al mismo tiempo las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 predicen deformaciones permanentes no admisibles durante la vida de servicio del firme. No obstante, este material se puede utilizar en secciones de firme de carreteras con bajas intensidades de tráfico.

Bibliografía

- Hornych, P., Corté, J-F., Paute, J. L. (1993) “*Étude des déformations permanentes sous chargements répétés de trois graves non traitées*”. Bulletin liaison Laboratories des Ponts et Chaussées n° 184. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris.
- Lekarp, F. (1997) “*Permanent deformation behaviour of unbound granular materials*”. Licentiate Thesis. Kungl Tekniska Högskolan, Royal Institute of Technology.
- Lekarp, F., Dawson, A. (1998) “*Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials*”. Construction and Building Materials. Vol. 12, N° 1.
- Ministerio de Fomento. (2002a) “*Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*”. Tercera edición. Ediciones Liteam.
 - (2002b) “*Secciones de Firme y Capas Estructurales de Firmes*”. Orden Circular 10/2002.
- Paute, J. L., Hornych, P., y Benaben, J. P. (1994) “*Comportement mécanique des graves non traitées*”. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, 190, 27-38.
- Paute, J. L., Hornych, P., y Benaben, J. P. (1996) “*Repeated load triaxial testing of granular materials in the French network of Laboratories des Ponts et Chaussées*”. Flexible Pavements, Proceedings of the European Symposium Euroflex 1993. Lisboa, Portugal, 20-22 Septiembre.
- Paute, J. L., Jouve, P., Martínez, J., y Ragneau, E. (1988) “*Modele de calcul pour le dimensionnement des chaussées souples*”. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, 156, 21-36.
- Sweere, G. T. H. (1990). “*Unbound Granular bases for Roads*”. Phd thesis, University of Delf, The Netherlands.
- Werkmeister, S., Dawson, A., Wellner, F. (2003) “*Permanent deformation behaviour of granular materials and the shakedown concept*”. Transportation Research Record 1757, Transportation Research Board. Washington, D.C.
- Wolff, H., Visser, A. (1994) “*Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design*”. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport.

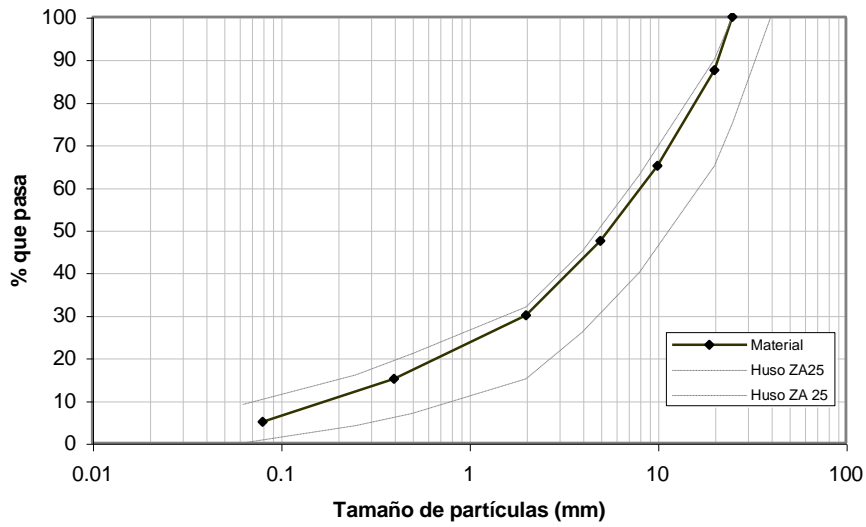


Figura 1. Granulometría del material.

ENSAYO	PARÁMETRO	RESULTADO
Proctor Modificado	Densidad seca (g/cm^3)	2.3
	Humedad óptima (%)	6.4
Límites de Atterberg	No plástico	No plástico
Equivalente de Arena	Equivalente de Arena	51
Desgaste de Los Ángeles	Coefficiente (%)	37
Contenido de materia orgánica	Porcentaje (%)	0.19
Coefficiente de limpieza	Coefficiente (%)	1.3
Índice de Lajas	Índice de Lajas (%)	3.0
Caras de fractura	Porcentaje (%)	100

Tabla 1. Ensayos de caracterización.

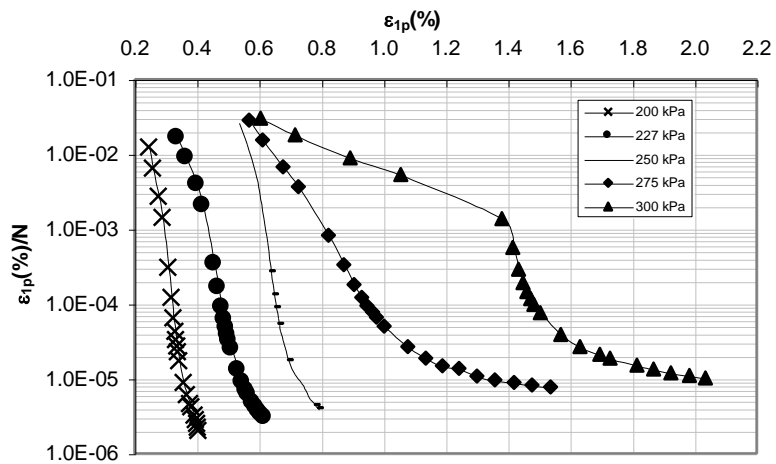


Figura 2. Índice de deformación permanente acumulada versus deformación permanente acumulada.

Parámetro	q (kPa)	Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4
A	200	0.211	0.318	0.042	103.088
	227	0.293	0.469	0.115	149.463
	250	0.472	0.636	0.021	130.154
	275	0.374	0.871	0.021	303.645
	300	0.585	1.400	11.068	46.073
B	200	0.051	-0.062	0.129	-1.467 x 10 ⁻⁴
	227	0.058	-0.051	0.101	-1.624 x 10 ⁻⁴
	250	0.039	-0.081	0.204	-1.819 x 10 ⁻⁴
	275	0.107	-0.038	0.305	-2.738 x 10 ⁻⁴
	300	0.098	-0.014	0.011	-28.665 x 10 ⁻⁴
C	200	-----	-----	0.192	-----
	227	-----	-----	0.202	-----
	250	-----	-----	0.518	-----
	275	-----	-----	0.518	-----
	300	-----	-----	-10.759	-----
m	200	-----	5.329 x 10 ⁻⁷	-----	-----
	227	-----	8.444 x 10 ⁻⁷	-----	-----
	250	-----	8.936 x 10 ⁻⁷	-----	-----
	275	-----	3.533 x 10 ⁻⁶	-----	-----
	300	-----	3.347 x 10 ⁻⁶	-----	-----
R ²	200	98.07	85.36	98.86	93.48
	227	98.16	87.51	98.42	93.55
	250	94.83	86.47	98.02	92.10
	275	93.86	93.90	97.73	82.01
	300	94.03	94.03	95.26	91.38

Tabla 2. Parámetros de los modelos

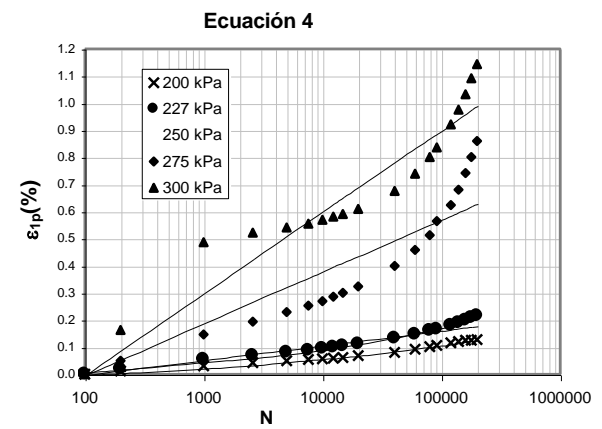
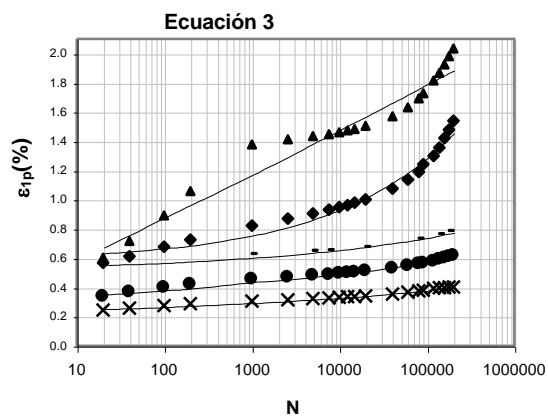
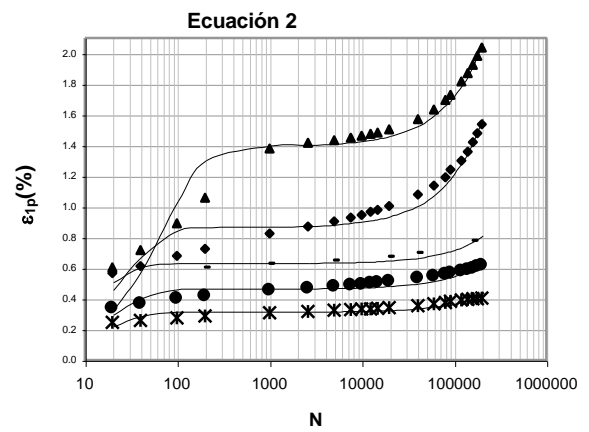
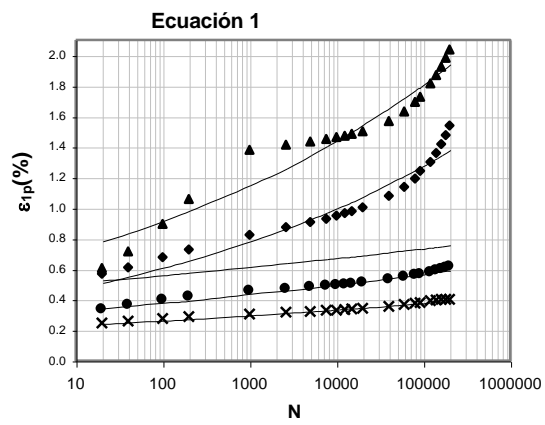


Figura 3. Deformación permanente versus ciclos de cargas.

q(kPa)	A	a	b
200	0.135	15.820	12.690
227	0.222	12.630	10.131
250	0.216	16.492	13.228
275	0.649	7.247	5.813
300	1220	5.260	4.219

Tabla 3. Resultados de la segunda parte del Modelo de Paute

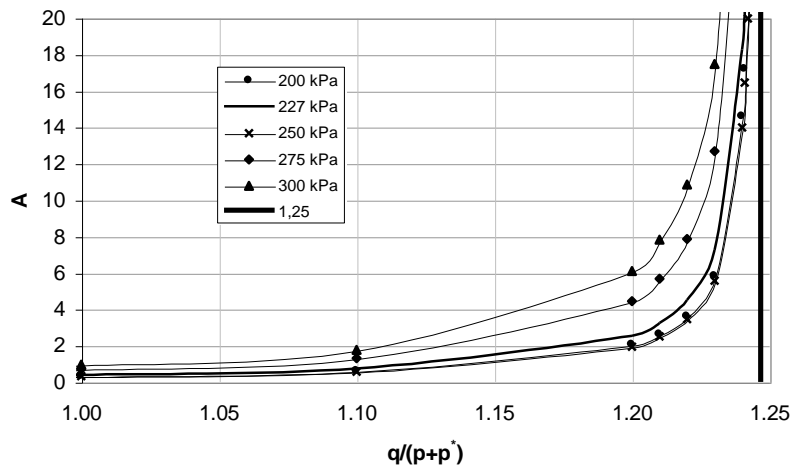


Figura 4. Segunda parte del Modelo de Paute

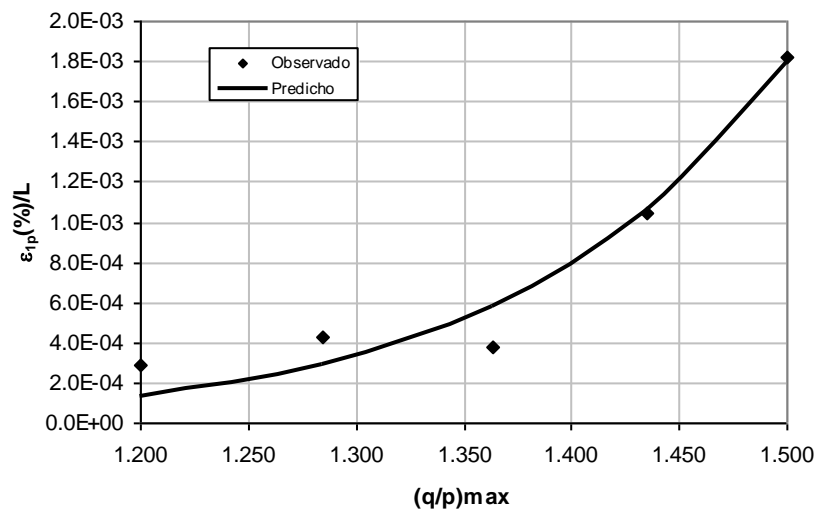


Figura 5. Modelo de Lekarp.

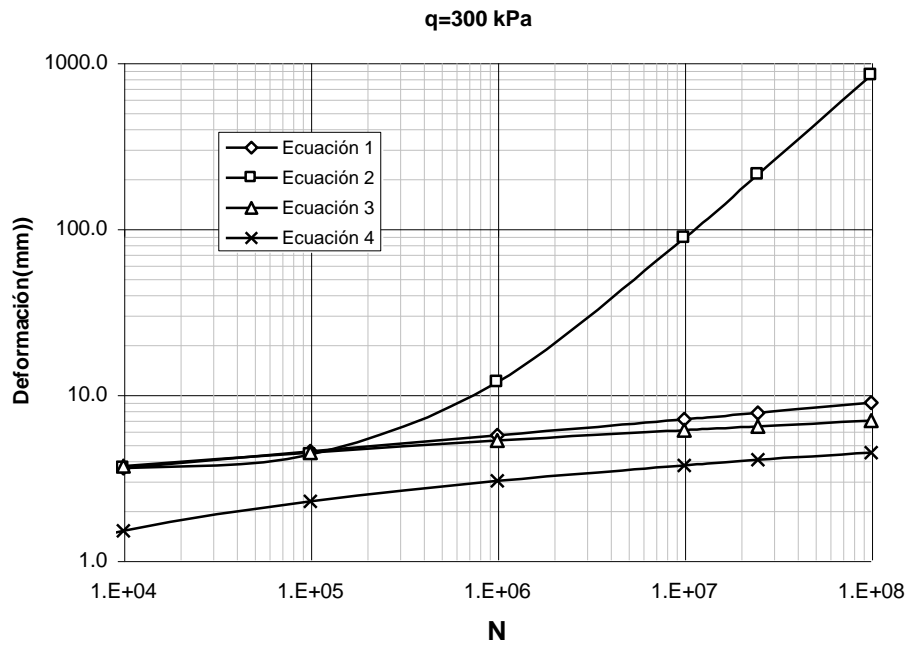


Figura 6. Predicción de la deformación permanente en función del número de ciclos de carga.

N_T	Ecuación	$\varepsilon_{1p}(\%)$	Rodera (mm)
24.83 x 10 ⁶ ejes de 13 t	1	3.10	7.76
	2	84.52	211.30
	3	2.57	6.42
	4	1.61	4.03

Tabla 4. Deformación permanente prevista.