



**MODELO DE FALLO DE MATERIALES GRANULARES EN FIRMES DE
CARRETERAS EN GALICIA**

Ignacio Pérez
Ana R. Pasandín

Universidade da Coruña
E. T. S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

A Coruña, España



RESUMEN

Este artículo analiza el comportamiento a la deformación permanente de un material granular (zahorra artificial) utilizado para capa de base de carreteras de medio/bajo tráfico en Galicia. El material es sometido ensayos triaxiales dinámicos con aplicación de ciclos de cargas repetidas.

Se clasifica la respuesta estructural del material granular de acuerdo a la aplicación de ciclos de carga. Se ajustan tres modelos que expresan la deformación permanente en función del número de ciclos de carga. Dos de estos modelos han sido utilizados ampliamente en la literatura científica. Las predicciones de estos modelos previamente estudiados por otros investigadores fueron buenas. Sin embargo, a largo plazo estas predicciones tienden a subestimar los valores reales. En contraste, un tercer modelo – que es la suma de dos conocidos modelos – ofrece a largo plazo excelentes predicciones, ya que ni subestima ni sobrestima los valores reales.



1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras de medio/bajo tráfico se construyen con materiales granulares que juegan un papel estructural muy importante. El diseño estructural de los firmes de carreteras de medio/bajo tráfico requiere la descripción del comportamiento a la deformación permanente de los materiales granulares. En concreto, se requiere predecir la formación de deformaciones plásticas en las capas de base granulares.

Como es sabido, el ensayo triaxial con cargas repetidas ha sido ampliamente utilizado para determinar el comportamiento a la deformación permanente de los materiales granulares. En estos ensayos la acumulación de deformación permanente es un proceso gradual donde en cada aplicación de carga se produce un pequeño incremento de la deformación permanente.

En este sentido, Pérez et al (2006) realizaron diversos análisis relacionados con la deformación permanente. En sus conclusiones puntualizaron que los modelos matemáticos que predicen la acumulación de la deformación permanente en función de los ciclos de carga presentan ciertas deficiencias. A largo plazo estos modelos tienden a sobrestimar o a subestimar los valores observados. En esta comunicación se ha realizado un trabajo adicional con el fin de mejorar las predicciones. El objetivo es examinar la aplicabilidad de un modelo matemático de regresión no lineal que depende del número de ciclos de carga para predecir el desarrollo de deformaciones plásticas en capas granulares de carreteras de medio/bajo tráfico. El modelo no está disponible en la literatura técnica y consiste de la combinación de dos modelos conocidos: el modelo de Sweere y el modelo de Wolf.

2. MODELOS DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

La deformación permanente de los materiales granulares se va estabilizando gradualmente al incrementarse el número de ciclos de carga, haciendo posible definir un valor límite para la acumulación de la deformación permanente. Esta estabilización solamente se alcanza cuando los esfuerzos aplicados son bajos, ya que para esfuerzos elevados se produciría un incremento continuo de la deformación permanente y en un deterioro gradual del firme (Werkmeister et al, 2001; Werkmeister et al, 2004). Cuando el desarrollo típico de las curvas de la deformación permanente (bajo ciclos de cargas repetidas y con esfuerzos de diferente magnitud) se representa en una doble escala logarítmica, se obtienen tres rangos diferentes de comportamiento:

- Rango A. En una gráfica con doble escala logarítmica $\log(\epsilon_{1p})-\log(N)$, las curvas de la deformación permanente están representadas por una línea recta. Los esfuerzos aplicados son bajos y no se alcanza el fallo.



- Rango B. Se produce cuando se aplican esfuerzos más elevados, la deformación permanente se puede incrementar pero todavía no se alcanza el fallo.
- Rango C. Se produce cuando el número de cargas y los esfuerzos aplicados son elevados. El material granular alcanza el fallo. Cuando los esfuerzos son muy elevados el fallo se alcanza con pocos ciclos de carga.

3. MÉTODOS EXPERIMENTALES Y MATERIALES

El material granular ensayado fue árido granítico machacado frecuentemente utilizada como capa de base de firmes de carreteras en Galicia. Su curva granulométrica corresponde a una zahorra artificial ZA25 definida en el PG3 (2002). Se compactaron probetas de 100mm de diámetro y 200 mm de altura. Estas probetas fueron ensayadas con su contenido de humedad óptimo y densidad seca máxima. Los ensayos se realizaron en un aparato triaxial dinámico. Se ensayaron once probetas sujetas a diferentes trayectorias de tensiones. Se aplicaron 2×10^5 ciclos de carga con una frecuencia de 1 Hz.

Las trayectorias de tensiones que se aplican en los ensayos triaxiales se seleccionaron partiendo de los esfuerzos producidos en una sección de firme para carreteras de medio/bajo tráfico (Figura 1). Es de suponer que si la sección está correctamente diseñada, su comportamiento estructural debería ser estable y además debería estar dentro del rango A de la deformación permanente o como máximo dentro del rango B.

4. MODELO PROPUESTO

En la tabla 1 están expuestos los modelos de Sweere (ecuación 1) y Wolf (ecuación 2) para la predicción de la deformación permanente en función del número de ciclos de carga. Asimismo, está expuesta la ecuación 3, combinación de los dos modelos anteriores, que será explicada a continuación.

Se ha comprobado que la ecuación 1 tiende a subestimar los valores medidos mientras que la ecuación 2 tiende a sobrestimarlos, produciéndose predicciones sesgadas (Pérez et al, 2006). Por consiguiente, con el propósito de mejorar las predicciones se decidió investigar la posibilidad de ajustar otro modelo. De esta forma, ya que la ecuación 1 produce subestimaciones y la ecuación 2 sobreestimaciones, el objetivo es unir los dos modelos para producir estimaciones no sesgadas. La aplicabilidad de este modelo estará limitada a carreteras de medio/bajo tráfico cuya respuesta estructural esté dentro de los rangos A y B.

El modelo en cuestión (ecuación 3 de la tabla 1) está formado por dos sumandos: el primer sumando es el modelo de Sweere y el segundo sumando es el modelo de woff. Como resultado está conformado por cinco parámetros (Figura 2).



El primer término de la ecuación 3 produce un incremento lineal de $\varepsilon_{1p}(\%)$ en relación con el número de ciclos de carga N sobre una gráfica en una escala $\log(\varepsilon_{1p})-\log(N)$. Tiene una pendiente igual a ∞ para $N=0$, e igual al producto de los dos coeficientes A_1 y B_1 para $N=1$.

El segundo término de la ecuación 3 reproduce un incremento lineal de $\varepsilon_{1p}(\%)$ con respecto a N sobre una escala $\varepsilon_{1p}-N$, después de un cierto número de ciclos de carga, Éste incremento es asintótico a $(m N + A)$ para grandes valores de N . Tiene una pendiente igual al producto de los dos coeficientes A_2 y B_2 para $N=0$. El modelo tiene una curvatura determinada por los valores de los coeficientes B_1 y B_2 y una pendiente final igual a m .

5. RESULTADOS

Los parámetros de la ecuación 3 se ajustaron mediante el método de Levenberg-Marquardt (1963). La tabla 2 muestra los valores de los parámetros para las once trayectorias de tensiones, así como los coeficientes de determinación. En dicha tabla $q=\sigma_1 -\sigma_3$ es la tensión desviadora aplicada durante los ensayos triaxiales y $p=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$ es el primer invariante de tensiones donde σ_1 =Esfuerzo principal mayor y σ_3 =Esfuerzo principal menor=esfuerzo de confinamiento.

La figura 3 refleja tanto los valores predichos por la ecuación 3 como los valores medios y observados durante los ensayos triaxiales. Puede observarse, que para todas las trayectorias de tensiones los datos experimentales están muy cercanos a las líneas continuas del modelo. El ajuste se puede considerar satisfactorio ya que en todos los casos los coeficientes de determinación son superiores al 99,50%.

6. CONCLUSIÓN

La ecuación 3 ofrece excelentes predicciones ya que ni sobrestima ni subestima los valores medidos. Por tanto las ecuaciones 1 y 2 trabajan mejor conjuntamente que separadamente. El modelo estudiado ofrece una excelente descripción del comportamiento del material a la deformación permanente producida dentro de los rangos A y B en secciones de carreteras de medio/bajo tráfico.

Finalmente, es importante clarificar que esta comunicación presenta un planteamiento inicial al problema. Por tanto, se necesita seguir investigando con un mayor número de trayectorias de tensiones. El siguiente paso sería hacer los parámetros del modelo dependientes del nivel de esfuerzos. También, es necesario tener en cuenta que estos resultados están basados en ensayos de la deformación permanente en equipos triaxiales de cargas repetidas y no en auscultaciones en secciones de firmes de carreteras.



Tabla 1. Modelos de la deformación permanente.

Modelos que relacionan la deformación permanente con el número de ciclos de carga			
Ecuación	Modelo	Referencia	Parámetros
1	$\varepsilon_{1p}(\%) = A \cdot N^B$	Sweere (1990)	A, B
2	$\varepsilon_{1p}(\%) = (m \cdot N + A)(1 - e^{-B \cdot N})$	Wolff et al (1994)	A, B, m
3	$\varepsilon_{1p}(\%) = A_1 \cdot N^{B_1} + (m \cdot N + A_2)(1 - e^{-B_2 \cdot N})$	-----	A_1, B_1, m, A_2, B_2

Tabla 2. Valores de los parámetros.

Stress Path	q (kPa)	p (kPa)	σ_3 (kPa)	A_1	B_1	m	A_2	B_2	R_2
P1	200.00	116.67	50.00	0.210	0.041	1.842×10^{-7}	0.025	-0.018	99.70
P2	227.00	125.66	50.00	0.275	0.045	3.149×10^{-7}	0.071	-0.017	99.97
P3	250.00	133.33	50.00	0.465	0.026	4.522×10^{-7}	0.062	-0.031	99.83
P4	275.00	141.66	50.00	0.472	0.054	2.337×10^{-6}	0.142	-0.006	99.94
P5	300.00	150.00	50.00	0.446	0.153	2.651×10^{-6}	0.753	-0.004	99.96
P6	324.00	180.00	72.00	0.258	0.037	2.927×10^{-7}	0.041	-0.013	99.73
P7	273.00	128.00	37.00	1.036	0.028	2.411×10^{-6}	0.025	-0.005	99.94
P8	245.00	112.00	30.00	1.375	0.019	2.555×10^{-6}	0.071	-0.004	99.80
P9	217.00	99.00	27.00	1.224	0.024	2.430×10^{-6}	0.062	-0.005	99.91
P10	191.00	91.00	27.00	0.957	0.042	2.391×10^{-6}	0.142	-0.002	99.95
P11	165.00	85.00	30.00	0.509	0.046	2.623×10^{-6}	0.753	-0.000	99.96



Figura 1. Sección de firme.

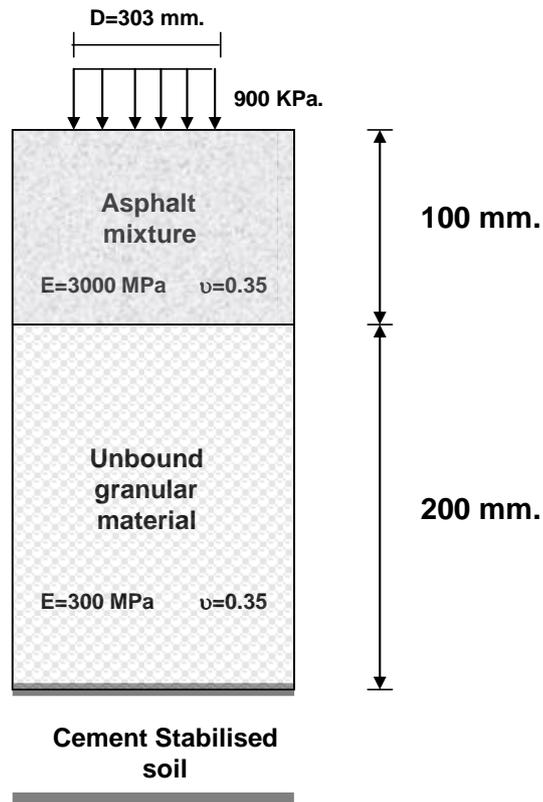


Figure 2. Parámetros de la ecuación 3.

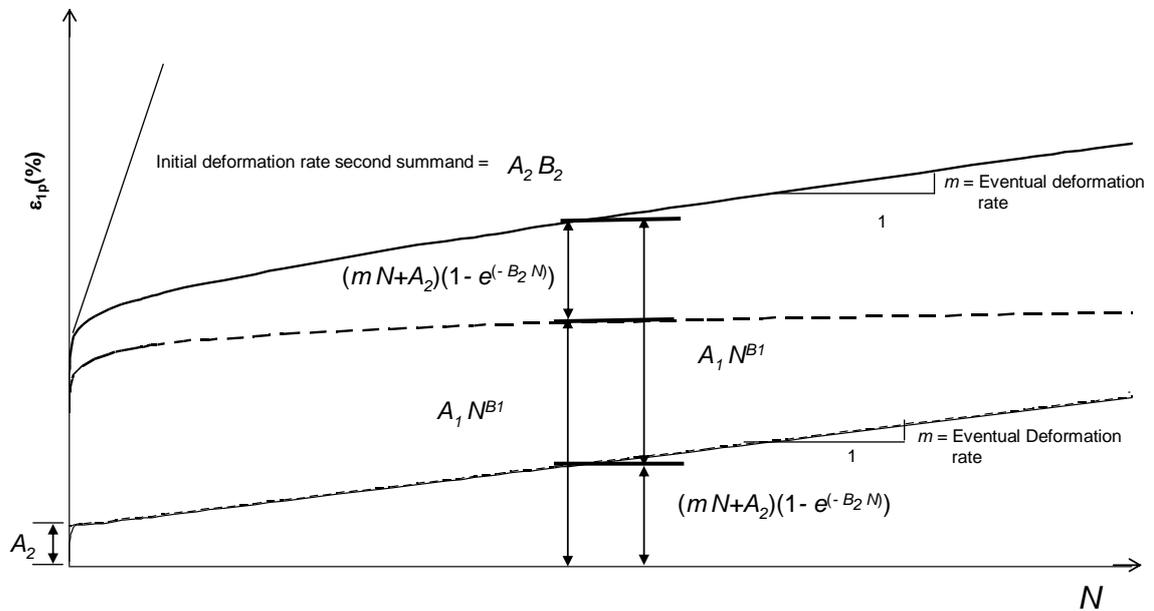
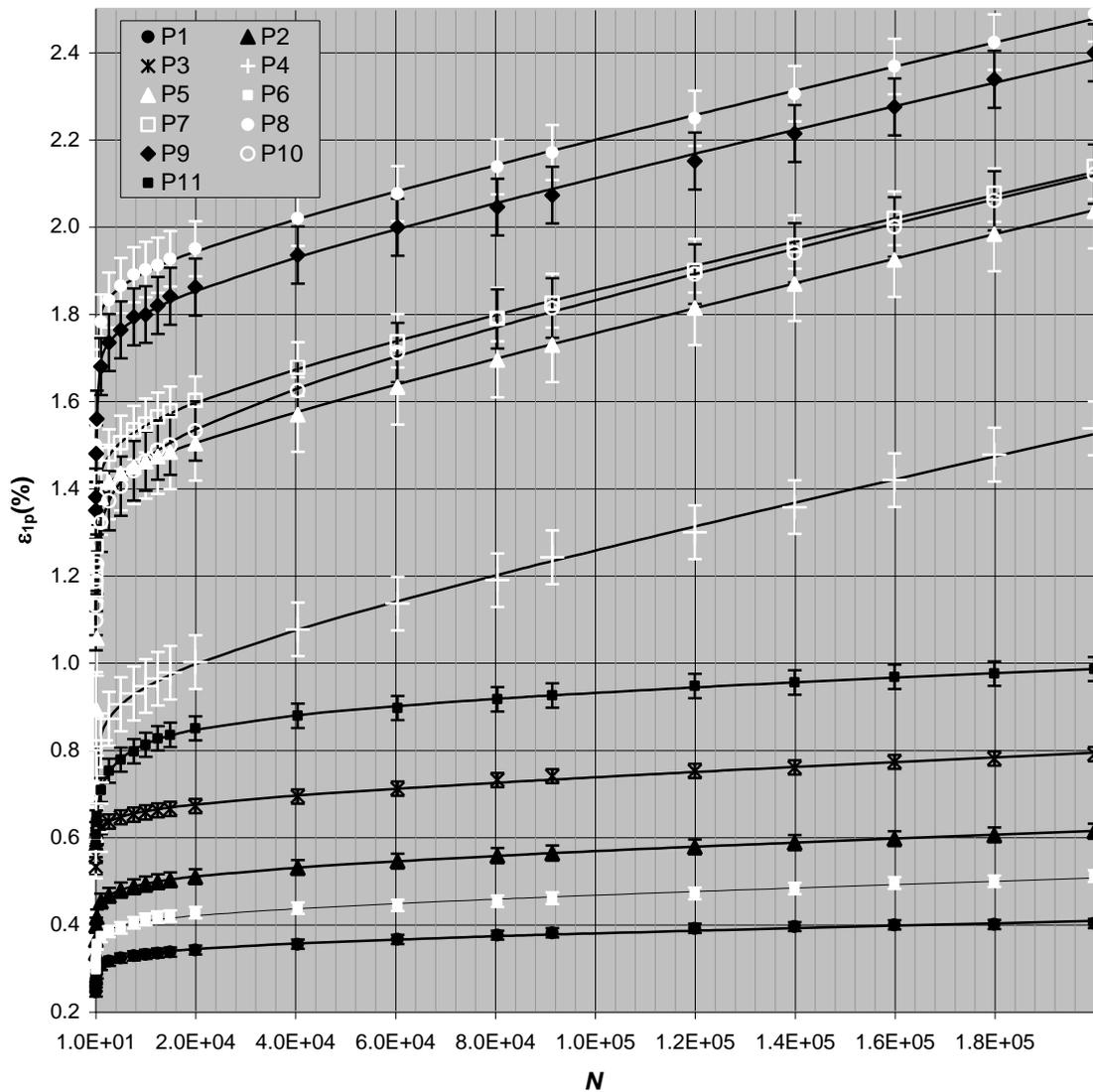




Figure 3. Predicción de la deformación permanente.





REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Marquardt DW. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 1963, 11: 431-441.
- Ministerio de Fomento. Anexo actualización PG-3. Capas estructurales de firmes. Anexo del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. In: Bustos; G., editor. PG-3 Anexo de actualización. Ediciones Liteam, 2002. p. 1-15.
- Ministerio de Fomento. Secciones de firme de la instrucción de carreteras. In: Bustos; G., editor. 6.1-IC Texto Oficial. Madrid: Ediciones Liteam, 2002. p. 1-22.
- Pérez I, Medina L, Romana MG. Permanent deformation models for a granular material used in road pavements. *Construction and Building Materials* 2006, 20: 790-800.
- Sweere GTH. Unbound granular bases for roads. Ph.D. Thesis, University of Delft, 1990.
- Werkmeister S, Dawson A, Wellner F. Permanent deformation behaviour of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record* 2001; 1757: 75-81.
- Werkmeister S, Dawson A, Wellner, F. Pavement design model for unbound granular materials. *Journal of Transportation Engineering* 2004; 130: 665-674.
- Wolff H, Visser A. T. Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport* 1994; 105: 259-272.