

ECUACIONES CONSTITUTIVAS DEL MÓDULO RESILIENTE DE UNA ZAHORRA ARTIFICIAL ZA (25) ELABORADA CON GRANITO DE LA PROVINCIA DE A CORUÑA

Ignacio Pérez Pérez; perez@iccp.udc.es

Luis Medina Rodríguez

Universidade da Coruña. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Manuel G. Romana García

Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

1. INTRODUCCIÓN

Una de las áreas principales de la ingeniería de carreteras es el dimensionamiento analítico de los firmes flexibles. A la hora de abordar el planteamiento analítico del dimensionamiento, un requerimiento fundamental consiste en que, con respecto a sus características de rigidez y resistencia, se empleen eficientemente los materiales que componen las capas de estos firmes.

Los materiales granulares desempeñan un importante papel estructural en este tipo de firmes. En general, las capas granulares se emplean en capas inferiores, que habitualmente se denominan **de base** y **sub-base** (Romana, 2000; Romana *et al*, 2000). Cuando estos materiales están sometidos a condiciones de esfuerzo que no alcanzan el fallo, cada aplicación de carga produce una deformación que sólo se recupera parcialmente cuando desaparece la misma. La deformación recuperable (o elástica) después de cada aplicación de carga se denomina deformación resiliente y llega a ser aproximadamente constante cuando aumenta el número de cargas, ya que con cada repetición de las cargas la velocidad de acumulación de la deformación permanente (o plástica) disminuye y el comportamiento se transforma en completamente resiliente. Consecuentemente, es común asumir que, en estos materiales, el estado de los esfuerzos que se desarrollan bajo las cargas del tráfico se gobierna por el comportamiento resiliente (Pérez *et al*, 2000a y 2000b).

Uno de los objetivos de la investigación de los firmes flexibles de carreteras consiste en establecer ecuaciones constitutivas que permitan dar predicciones del comportamiento resiliente de los materiales granulares que forman dichas capas (Pérez *et al*, 2000c y 2001). Para ello, se necesitan realizar ensayos de laboratorio donde se sometan estos materiales a la acción de cargas dinámicas que simulan el tránsito vehicular. A pesar de esto, todavía no existe una norma Española de ensayo que indique cómo se deben determinar en el laboratorio estas deformaciones resilientes. En este sentido, desde hace ya algunas décadas, en diversos países se han estado utilizando los equipos triaxiales dinámicos debido a la facilidad con que se controlan tanto los esfuerzos aplicados a la muestra como las condiciones de drenaje de la misma. No obstante, hay que matizar que el equipo triaxial solamente permite representar el estado de esfuerzos producido en un elemento del firme situado justamente debajo del centro de la rueda de un vehículo que circula por la carretera. Por todo lo dicho anteriormente, en este artículo se realizará una descripción del procedimiento de ensayo que ha sido puesto a punto, con un equipo triaxial dinámico, en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la **Universidade da Coruña**. Este ensayo se realizó con el fin de medir las deformaciones resilientes de una zahorra artificial **ZA (25)** utilizada en capas de base de carreteras. Además, se presentarán las deformaciones y esfuerzos que sufre la zahorra al someterla a tres trayectorias de tensiones de cargas triaxiales cíclicas seleccionadas para el ensayo. Por último, a partir de dichos valores se encajarán una serie de modelos que tratan de predecir el Módulo Resiliente de la zahorra artificial. Ya que estos modelos empíricos permiten representar el comportamiento resiliente de los materiales granulares se pueden emplear en los métodos analíticos de dimensionamiento de firmes (Medina *et al*, 2001).

2. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL GRANULAR

El material granular utilizado para los fines expuestos en la introducción es un árido totalmente machacado proveniente de una cantera de granito situada en la Comunidad Autónoma de Galicia. Con el fin de caracterizar este material se realizaron los ensayos de carreteras de las normas técnicas **NLT** del **Centro de Estudios de Carreteras** (CEDEX, 1992), contemplados en el artículo 501 "Zahorras Artificiales" del **Pliego de Prescripciones Generales para Obras de Carreteras, PG3**, (MOPU, 1975), modificado en el **BOE** del 5 de Septiembre de 1986.

En primer lugar se llevó a cabo un análisis granulométrico por tamizado del material, de acuerdo a la norma **NLT-104**. El resultado de dicho análisis se puede observar tanto en la tabla 1 como en la figura 1:

TAMIZ UNE	0.080	0.40	2	5	10	20	25	40
% Pasa	9	22	45	56	69	87	93	100

Tabla 1. Análisis granulométrico del material granular proveniente de la cantera.

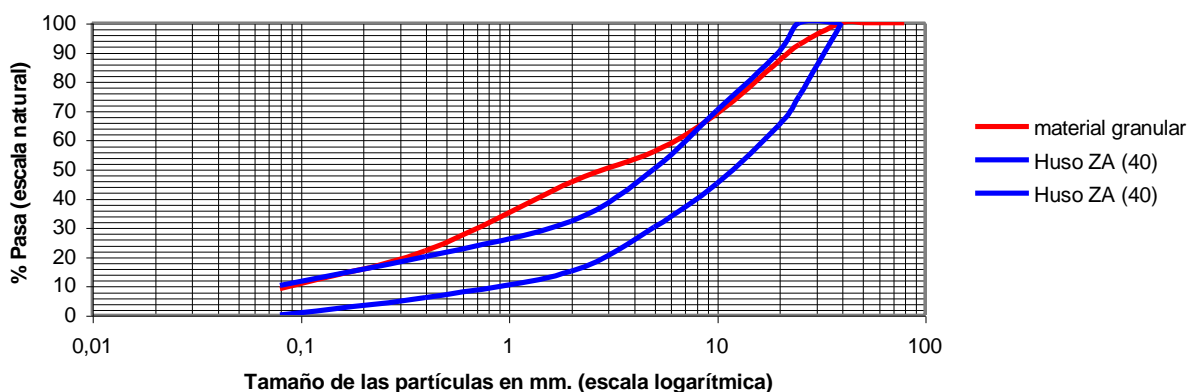


Figura 1. Curva granulométrica del material y huso de la zahorra ZA (40).

En segundo lugar se realizaron otros ensayos contemplados en el artículo del pliego mencionado anteriormente con el propósito de caracterizar la zahorra artificial. Los resultados obtenidos están reflejados en la tabla 2:

ENSAYO	PARÁMETRO	RESULTADO
Proctor Modificado: NLT-108	Densidad seca (g/cm^3)	2,10
	Humedad óptima (%)	10
Límites de Atterberg: NLT -105 y 106	No plástico	No plástico
Equivalente de Arena: NLT 113	Equivalente de Arena	51
Desgaste de Los Angeles: NLT -149	Coefficiente (%)	37
Contenido de materia orgánica: NLT -118	Porcentaje (%)	0,19
Coefficiente de limpieza: NLT -172	Coefficiente (%)	1,3
Índice de Lajas: NLT -354	I. de Lajas (%)	3.0
Caras de fractura: NLT -358	Porcentaje (%)	100

Tabla 2. Ensayos de caracterización.

Quizás entre todos los datos reflejados en la tabla anterior sea significativo que, como suele ocurrir en Galicia, la calidad de los áridos de granito no es muy buena, ya que el coeficiente de desgaste de Los Angeles supera el 35% especificado, para tráfico **T2**, **T3** y **T4**, en el artículo 501 del **PG3**; siendo éste, en concreto, de un 37%. Por lo demás, se cumplen los requisitos de plasticidad, equivalente de arena, etc. Por otro lado, como se ve en la figura 1, este material, de una manera ostensible, se sale fuera del huso granulométrico correspondiente a una zahorra artificial **ZA (40)**. Por este último motivo; y, también, por diversas consideraciones que se explicarán en el próximo apartado, se decidió fabricar la probeta de ensayo con una curva granulométrica inscrita dentro del huso correspondiente a una zahorra artificial **ZA (25)**. En la tabla 3 se puede apreciar el cernido ponderal acumulado correspondiente al huso de la zahorra artificial **ZA (25)** conjuntamente con el del material de ensayo:

TAMIZ UNE	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)	
	ZA (25)	MATERIAL
25	100	100
20	75-100	87,50
10	50-80	65,00
5	35-60	47,50
2	20-40	30,00
0,40	8-22	15,00
0,080	0-10	5,00

Tabla 3. Cernido ponderal acumulado del material granular ensayado.

3. FABRICACIÓN Y COMPACTACIÓN DE LA PROBETA

Antes de nada es muy importante tener en cuenta que el tamaño máximo del árido (en este caso 25 mm) delimita la dimensión mínima de la probeta. Por consiguiente, esto al mismo tiempo circunscribe la capacidad de la celda del equipo triaxial necesario para realizar el ensayo dinámico. En líneas generales, por un lado, se recomienda que el diámetro mínimo de la probeta sea de cuatro a cinco veces el tamaño máximo de las partículas del material y, por otro, que el diámetro sea el doble de la altura de la probeta (Boyce, 1976; Harasahim, 1993). En este sentido, el equipo triaxial disponible en la Escuela de Caminos de A Coruña solamente permite realizar ensayos con dimensiones máximas de la probeta hasta 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Por las razones aludidas anteriormente se decidió fabricar la probeta con una zahorra **ZA (25)** en vez de una **ZA (40)**.

Por otra parte, se elaboró un molde especial cilíndrico de aluminio (figura 3), conformado por dos piezas de tal manera que se abre longitudinalmente para extraer con una mayor facilidad la muestra compactada. Asimismo, acompaña a dicho molde una base de compactación y también un collar, ambos de aluminio. Estas dos piezas fueron diseñadas con el fin de facilitar la fijación de la primera membrana a las paredes interiores del molde, antes y durante la compactación. La función de esta membrana es sostener, momentáneamente, el material después de la compactación (figura 4).

La compactación se realizó mediante un martillo vibrante **KANGO** de 900 w de potencia eléctrica. En cuanto al número de capas en que, dentro del molde, se compactó la muestra se decidió seguir el criterio de las normas **NLT 310** (*Compactación con martillo vibrante de materiales granulares*) y **NLT-311** (*Densidad máxima y humedad óptima de compactación, mediante martillo vibrador, de materiales granulares con o sin productos de adición*) (CEDEX, 1992) llenando el molde en tres tongadas de forma que cada una de ellas tenga un espesor, una vez compactada, de aproximadamente igual al tercio de la altura del molde.

Antes de efectuar la compactación debe introducirse la primera membrana dentro del molde y, seguidamente, aplicar un vacío la retenga adherida a las paredes interiores del molde de aluminio. A continuación se deposita el material en tres tongadas y se compacta durante 10 segundos mediante el martillo **KANGO** (figura 3). Después de la compactación se desmonta el molde y, como la primera membrana se perfora debido a este proceso (figura 4), se coloca una segunda membrana por encima de aquélla. Se eligió un tiempo de compactación de 10 segundos por tongada persiguiendo tener la misma energía específica de compactación que se aplica en el ensayo **NLT-311**.

De la misma forma pero sin utilizar la primera membrana se compactaron cuatro probetas de material granular con diferentes humedades, obteniéndose las densidades secas y humedades que aparecen en la tabla 4. A partir de estos datos se dibujó la curva densidad seca-contenido de humedad que se refleja en la figura 2:

PUNTOS DE ENSAYO	PRIMERO	SEGUNDO	TERCERO	CUARTO
DENSIDAD SECA (g/cm^3)	4,24	5,90	6,79	8,00
HUMEDAD (%)	2,17	2,29	2,30	2,23

Tabla 4. Densidades seca- humedad.

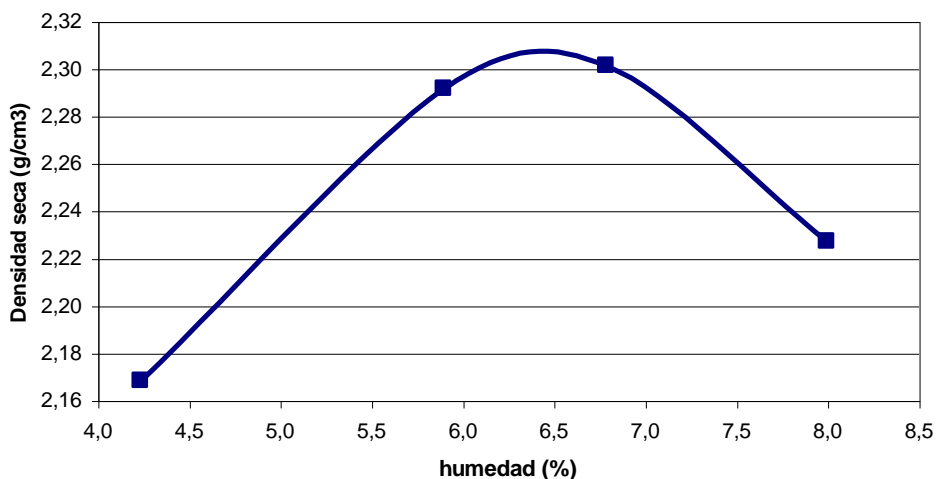


Figura 2. Gráfico densidad seca-humedad del material granular.

La probeta de material granular que finalmente se elaboró para someterla al ensayo triaxial con cargas dinámicas, se compactó con la densidad seca máxima y humedad óptima del gráfico de la figura 2 ($2,30 \text{ g/cm}^3$; 6,4%). Posteriormente, antes de realizar el ensayo dinámico propiamente dicho, la muestra se mantuvo durante 24 horas en una cámara húmeda a una temperatura de 20°C con una humedad relativa del 95%.

4. ENSAYO TRIAXIAL DINÁMICO

4.1 Descripción del equipo

El equipo empleado en la realización del ensayo es un triaxial dinámico de la casa GDS (ver figura 6). En esencia, el equipo está inspirado en el clásico triaxial de Bishop y Wesley. La diferencia básica entre ellos estriba en que los desplazamientos y fuerzas axiales en el triaxial de Bishop se generan hidráulicamente, mientras que el equipo empleado para este trabajo genera dichos movimientos y fuerzas mediante un tornillo sin fin conectado a un

motor eléctrico. El sistema está formado, fundamentalmente, por los componentes que se exponen a continuación.

La unidad principal contiene el sistema generador de la carga axial y es el lugar en el que se encuentra la base de la cámara. La carga axial se genera gracias a un servomotor sin escobillas, de corriente continua, que mueve un husillo a bolas por medio de una correa de transmisión dentada. El martinete axial está unido a un cilindro empujador por medio de una tuerca esférica que es movida por el tornillo sin fin. Para evitar el giro del cilindro empujador se emplea una guía conectada a la placa central. El cilindro empujador se conecta al martinete axial, el cual pasa a través del sistema de autobalance de martinete y a través de la base de la cámara. La base del pedestal está conectada al martinete.

En la parte superior de la unidad principal está situada la base de la cámara, y es en ella donde están dispuestas todas las conexiones hidráulicas (presión de cola, presión de cámara, presión de poro y conexiones para drenaje) y las correspondientes a los sensores para medida de deformaciones locales. La cámara es extraíble para permitir situar las probetas en el pedestal. En su parte superior, dentro de ella, está montada la célula de carga axial (el equipo dispone de varias células fácilmente intercambiables).

El equipo permite introducir sobre la muestra de suelo granular tensiones axiales desviadoras de carácter cíclico; sin embargo, no permite someterla, al mismo tiempo, a tensiones radiales con presiones de cámara variables. Es decir, es un equipo triaxial con presión de cámara constante (**CCP**), (Gajaard *et al*, 1996).

El equipo triaxial dispone de tres controladores digitales, también de la casa GDS: uno genera la presión de cámara, otro la de cola y el último, se emplea para producir la presión de aire requerida en los ensayos con muestras parcialmente saturadas.

Un controlador digital GDS es un dispositivo hidráulico, controlado por un microprocesador, que permite la precisa regulación y medida de las presiones y los cambios de volumen del fluido que manejan. Su accionamiento puede ser manual o totalmente automatizado, trabajando en este último caso como periférico del ordenador que controla todo el sistema.

El fluido empleado es agua desaireada (en los materiales granulares suele emplearse también aceite). El agua desaireada, contenida en un cilindro, es presurizada y movida por un pistón que se mueve dentro del cilindro. El desplazamiento del pistón lo causa un motor de pasos (motor de movimiento discontinuo, que desplaza $0,5 \text{ mm}^3$ en cada paso).

Las presiones del agua y del aire son medidas por medio de transductores de presión situados al final del recorrido de los pistones. Las variaciones de volumen se miden a partir del número de pasos que da el motor.

Las señales analógicas enviadas por los transductores y la célula de carga son recibidas en un módulo, independiente de la unidad principal y del ordenador, donde son transformadas en señales digitales. Las señales digitales se almacenan en el disco duro del ordenador para ser procesadas posteriormente.

Además, 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 compatible, 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 complejas, los datos a almacenar, etc. Además, permite una visualización en tiempo real, numérica o gráfica, de los datos que está generando el ensayo.



Figura 3. Compactación de la probeta.



Figura 4. Probeta compactada antes de la colocación de la segunda membrana.



Figura 5. Colocación de la probeta en el equipo triaxial.



Figura 6. Equipo triaxial.

4.2 Trayectoria de tensiones y medición de las deformaciones

Conviene aclarar que, en un primer intento de ensayo triaxial, el rozamiento producido entre los áridos y la segunda membrana provocó un pinchazo de la misma dando lugar a una rotura de la probeta y la invalidez de los resultados del ensayo. Por este motivo, con el fin de evitar el mismo contratiempo, en el segundo intento se decidió cubrirla con dos membranas más y, además, para reducir el rozamiento con los áridos se aplicó una capa de vaselina entre cada dos membranas.

Mediante juntas tóricas se sellaron los extremos de la probeta a los pedestales de apoyo superior e inferior del triaxial. De esta forma se consigue que el agua de la cámara no penetre en la probeta y pueden independizarse las presiones de cámara y cola; sólo así es posible aplicar tensiones efectivas a la muestra.

El ensayo triaxial dinámico se llevó a cabo con una onda senoidal de 1 Hz de frecuencia y permitiendo el drenaje de la probeta de material granular.

Después de saturar la probeta y consolidarla con una presión efectiva de 50 kPa se realizó un acondicionamiento de 20000 ciclos de carga con objeto de producir una estabilización de las deformaciones permanentes. Debido al hecho de estar trabajando con un equipo **CCP**, la pendiente de la trayectoria de tensiones que resulta de dividir el esfuerzo desviador cíclico (q_r) entre la variación de presión esférica (p_r), tiene que guardar obligatoriamente una relación igual a tres (figura 7). Los esfuerzos máximos y mínimos de la trayectoria de tensiones del acondicionamiento se pueden observar tanto en la tabla 5 como en la figura 8. Como puede deducirse de la tabla 5, se aplica un esfuerzo efectivo de confinamiento constante (σ_3') de 50 kPa y la tensión desviadora máxima alcanzada en los ciclos es de 130 kPa.

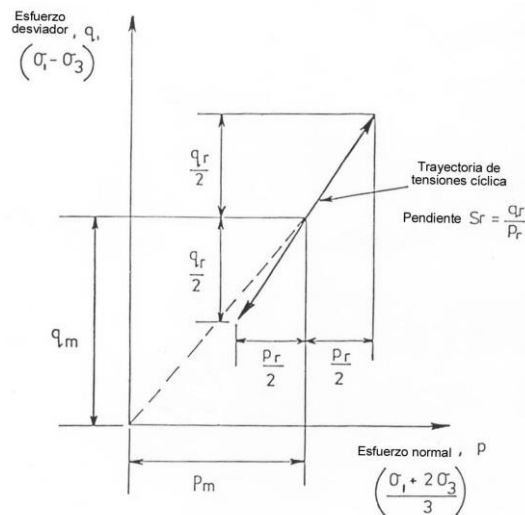


Figura 7. Componentes del esfuerzo en los ensayos triaxiales cíclicos (fuente Boyce, 1976).

σ_3' (kPa)	q' (kPa)		q'/p_r'
	min.	max.	
50	0	130	3

Tabla 5. Esfuerzos máximos y mínimos de la trayectoria de tensiones A (fuente Paute et al, 1996).

Una vez finalizado el acondicionamiento, se aplican las cargas cíclicas que tienen como finalidad producir las deformaciones resilientes que servirán para el posterior ajuste de los modelos de comportamiento. Éstas se llevan a cabo siguiendo tres trayectorias de tensiones que, también, guardan una relación $q/p_r = 3$ (figura 8). Tal y como se aprecia en la tabla 6, la primera trayectoria (**T1**) se comienza aplicando un esfuerzo efectivo de confinamiento (σ_{3r}') de 15 kPa y, también, una tensión desviadora mínima igual a cero ($q_{min}'=0$), dejando que la muestra se estabilice. Entonces, bajo el sistema de carga elegido se aplica el primer punto de la trayectoria ($q_{max}' = 15$ kPa).

Aunque el número de ciclos de carga que se aplica en cada uno de estos puntos es de 110, solamente se registraron los esfuerzos, desplazamientos axiales y presiones de poro y cola correspondientes a los ciclos 90; 100 y 110. La operación descrita anteriormente se realiza con todos y cada uno de los puntos que aparecen en las tres trayectorias (**T1**, **T2** y **T3**) contempladas tanto en la figura 8 como en la tabla 6.

T1	$\sigma'_{3r} = 15 \text{ kPa}$	$q'_{min} = 0$	$q'_{max} = 15; 30; 45; 60 \text{ kPa.}$
T2	$\sigma'_{3r} = 30 \text{ kPa}$	$q'_{min} = 0$	$q'_{max} = 25; 50; 75; 100 \text{ kPa.}$
T3	$\sigma'_{3r} = 45 \text{ kPa}$	$q'_{min} = 0$	$q'_{max} = 30; 60; 90; 120 \text{ kPa.}$

Tabla 6. Esfuerzos máximos y mínimos de las trayectorias de tensiones T1, T2 y T3 (fuente Paute *et al*, 1996).

Del mismo modo que en el acondicionamiento, los ciclos de carga se llevan a cabo mediante una onda senoidal con una frecuencia de 1 Hz. Por otra parte, conviene aclarar que, debido a que no se disponía de un equipo de extensometría que permitiera medir las deformaciones radiales de la probeta, únicamente se registraron los desplazamientos axiales.

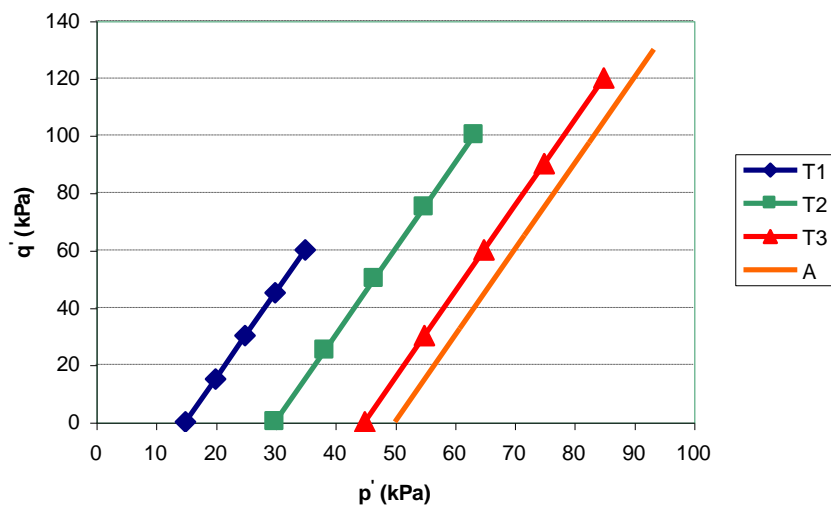


Figura 8. Acondicionamiento y trayectoria de tensiones del ensayo triaxial dinámico.

5. DEFINICIÓN Y AJUSTE DE LOS MODELOS DE COMPORTAMIENTO

Como es de todos sabido, en los materiales granulares el Módulo de Young (E) se reemplaza por el Módulo Resiliente (M_r). De esta forma, en los ensayos dinámicos triaxiales llevados a cabo con equipos **CCP** se obtiene para cada nivel de esfuerzo el Módulo Resiliente (M_r) definido mediante la sencilla expresión:

$$M_r = \frac{\Delta q'}{\Delta \epsilon'_{1r}} = \frac{\Delta(\sigma'_{1r} - \sigma'_{3r})}{\Delta \epsilon'_{1r}} \quad (1)$$

donde:

- $\Delta q'$ = Incremento del esfuerzo desviador cíclico efectivo.
- σ'_{1r} = Esfuerzo efectivo axial principal.
- σ'_{3r} = Esfuerzo efectivo de confinamiento.
- $\Delta \epsilon'_{1r}$ = Incremento de la deformación unitaria axial resiliente.

A partir de la información registrada por el sistema de adquisición de datos, se calcularon en los ciclos 90, 100 y 110 los valores correspondientes a los esfuerzos efectivos axiales (σ'_{1r}), a los esfuerzos efectivos de confinamiento (σ'_{3r}) y a las deformaciones unitarias axiales (ϵ'_{1r}). A partir del valor del esfuerzo axial y de confinamiento se calculó el esfuerzo desviador (q). A su vez, con los esfuerzos desviadores y los desplazamientos axiales unitarios se calculó, por un lado, el incremento del esfuerzo desviador cíclico ($\Delta q'$) y, por el otro, el incremento de

la deformación unitaria axial resiliente ($\Delta\varepsilon_{1r}$). A continuación, con estos últimos valores, empleando la fórmula 1, se calcularon los Módulos resilientes (M_r). También se obtuvo el primer invariante de tensiones ($\theta' = \sigma'_{1r} + 2\sigma'_{3r}$), correspondiente a la suma de los esfuerzos principales cuando el esfuerzo desviador es máximo; y, por último, la tensión tangencial octaédrica efectiva:

$$\sigma'_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} q' \quad (2)$$

Todos estos valores están reflejados en la tabla 7. Como se puede apreciar en la misma, aunque los valores del esfuerzo de confinamiento y del esfuerzo desviador se aproximan a los de la tabla 6, no coinciden exactamente. Esta pequeña discrepancia se debe a una incorrecta previsión de la rigidez de la probeta, de forma que el equipo no aplicó en los ciclos las velocidades adecuadas que permitieran llegar a esas tensiones máxima y mínima. Llegado este punto conviene decir que, debido a las limitaciones del propio equipo triaxial en relación con el hecho de no poder medir los desplazamientos o las deformaciones radiales, en esta investigación no se ha podido disgregar el comportamiento elástico del material en la parte volumétrica y en la desviadora (Pappin, 1979; Boyce, 1980; Harasahim, 1993; Paute *et al*, 1996). Por ello, en primer lugar, se decidió expresar el Módulo Resiliente en función de la presión de confinamiento efectiva, mediante el sencillo modelo de *Monismith* (Monismith *et al*, 1967):

$$M_r = K_1 \cdot \sigma'_{3r}{}^{k_2} \quad (3)$$

donde:

- σ'_{3r} = Esfuerzo efectivo de confinamiento.
- k_1 y k_2 = Constantes de regresión del material obtenidas a partir de ensayos triaxiales de carga repetida realizados sobre materiales granulares.

Este modelo ajustado ofreció un coeficiente de determinación igual a 0,65. Los valores de los parámetros son $k_1 = 4356,90$ y $k_2 = 0,65$. En la figura 9 se distingue que el ajuste de este modelo no es muy bueno, apreciándose una dispersión de los datos bastante pronunciada.

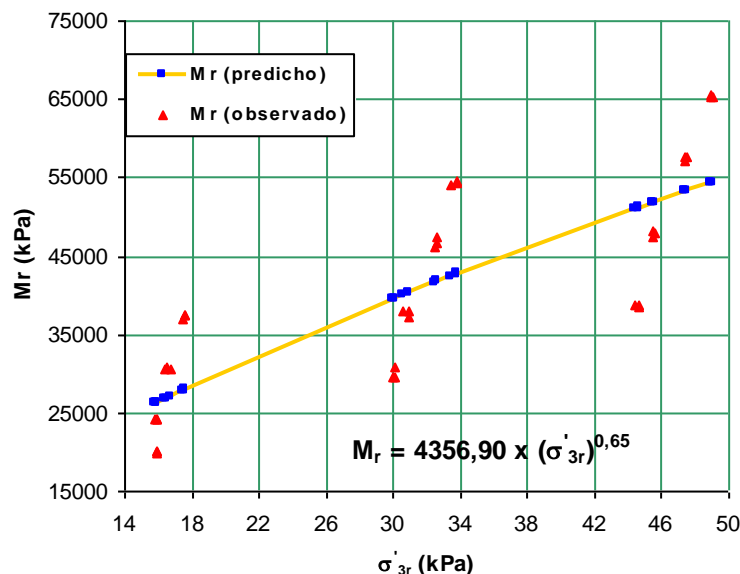


Figura 9. Modelo en función del esfuerzo de confinamiento.

σ'_{1r} (kPa)	σ'_{3r} (kPa)	$q=q'$ (kPa)	$\Delta\varepsilon_{1r} \times 10^6$	$\Delta q'$ (kPa)	M_R (kPa)	θ' (kPa)	σ'_{oct}
28,81	15,95	12,86	510,63	10,19	19947,89	60,71	6,06
28,81	15,95	12,86	510,63	10,31	20197,24	60,71	6,06
28,43	15,95	12,48	505,63	10,19	20145,15	60,32	5,88
42,58	15,84	26,74	897,50	21,77	24258,88	74,27	12,60
42,81	15,95	26,87	897,50	21,77	24258,88	74,71	12,66
42,63	15,90	26,74	900,63	21,90	24316,08	74,42	12,60
58,70	16,68	42,02	1148,75	35,27	30701,77	92,07	19,81
58,26	16,37	41,89	1153,75	35,14	30458,36	90,99	19,75
58,41	16,53	41,89	1150,63	35,40	30762,39	91,46	19,75
75,38	17,58	57,81	1325,63	49,53	37362,68	110,53	27,25
75,20	17,52	57,68	1321,88	49,40	37372,35	110,25	27,19
74,84	17,42	57,42	1329,38	49,15	36969,95	109,68	27,07
52,85	30,06	22,79	642,50	19,74	30716,21	112,96	10,74
52,72	30,06	22,66	641,88	19,86	29617,88	112,83	10,68
52,79	30,00	22,79	675,63	19,99	29587,14	112,80	10,74
78,18	30,95	47,24	1126,88	42,02	37286,13	140,08	22,27
78,82	30,95	47,87	1126,88	42,91	38077,05	140,72	22,57
78,58	30,58	48,00	1132,50	42,91	37887,92	139,74	22,63
105,91	32,58	73,34	1433,13	66,72	46553,93	171,06	34,57
105,97	32,63	73,34	1398,75	66,46	47515,96	171,22	34,57
105,61	32,52	73,08	1435,63	66,34	46206,79	170,65	34,45
132,26	33,84	98,42	1660,63	90,27	54360,54	199,93	46,40
132,28	33,73	98,55	1376,25	90,40	54478,22	199,74	46,46
131,84	33,42	98,42	1665,63	90,02	54044,47	198,67	46,40
72,95	44,43	28,52	670,63	25,97	38731,07	161,80	13,44
72,90	44,64	28,27	670,00	25,85	38577,17	162,17	13,32
72,85	44,58	28,27	665,63	25,85	38830,73	162,02	13,32
104,02	45,58	58,44	1121,25	53,86	48033,81	195,19	27,55
104,05	45,48	58,57	1121,88	53,99	48120,54	195,00	27,61
103,59	45,53	58,06	1128,13	53,60	47515,36	194,64	27,37
135,45	47,47	87,98	1423,13	82,00	57617,17	230,39	41,47
135,78	47,42	88,36	1428,75	82,38	57657,68	230,62	41,65
135,65	47,42	88,24	1442,50	82,25	57019,81	230,49	41,59
167,22	48,94	118,28	1692,50	110,77	65448,50	265,10	55,76
166,87	49,10	117,77	1693,13	110,39	65198,74	265,07	55,52
167,10	48,94	118,16	1695,00	110,52	65201,73	264,98	55,70

Tabla 7. Resultados del ensayo.

En segundo lugar, se determinó utilizar otro planteamiento bastante extendido que expresa la influencia del nivel de esfuerzo sobre el Módulo Resiliente como una función de la suma de los esfuerzos principales; es decir del primer invariante de tensiones (θ). En este sentido, Hicks (1970) sugirió la sencilla relación hiperbólica comúnmente conocida por el modelo $k-\theta$. En este modelo se muestra el comportamiento elástico no lineal de los materiales granulares mediante la ecuación que figura a continuación:

$$M_r = k_3 \cdot \theta'^{k_4} \quad (4)$$

donde:

θ' = Primer invariante de tensiones efectivas $= (\sigma'_{1r} + \sigma'_{2r} + \sigma'_{3r})$ realizando la suma de los esfuerzos principales cuando el esfuerzo desviador es máximo.

k_3 y k_4 = Constantes de regresión del material obtenidos a partir de ensayos triaxiales de carga repetida realizados en materiales granulares.

Este modelo arrojó un valor del coeficiente de determinación igual a 0,93. Como se observa en la figura 10 la dispersión de los datos es muy pequeña. Los valores de las constantes de regresión fueron las siguientes: $k_3 = 931,17$ y $k_4 = 0,76$.

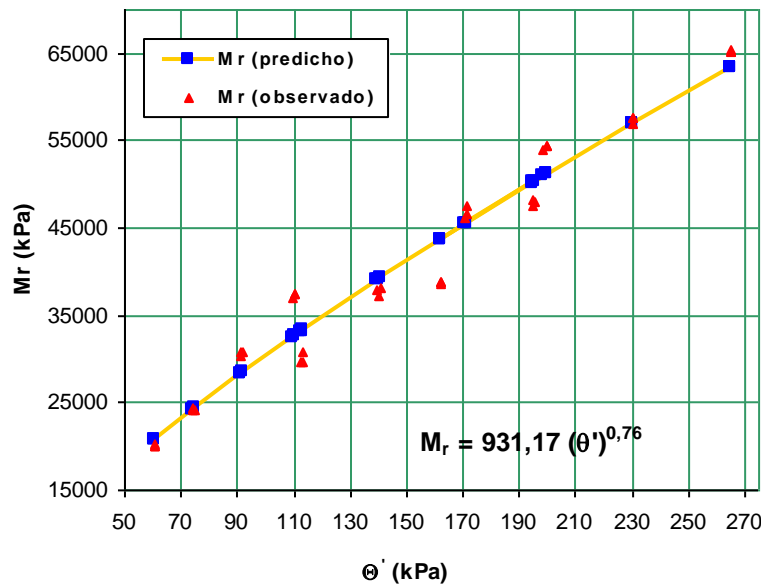


Figura 10. Modelo en función del primer invariante de tensiones.

Como es sabido, el modelo $k-\theta$ tiene el inconveniente de no considerar el efecto del esfuerzo desviador sobre las propiedades resilientes. Por esta razón, diversos estudios han demostrado que este planteamiento es insuficiente y que se requieren parámetros adicionales del esfuerzo. En este sentido, Uzan (1985) incluyó el esfuerzo desviador dentro del modelo $k-\theta$ y lo expresó de la manera siguiente:

$$M_r = k_5 \cdot (p_o) \cdot \frac{\theta'^{k_6}}{p_o} \cdot \frac{q'^{k_7}}{p_o} \quad (5)$$

donde:

q' = Tensión desviadora efectiva.

θ' = Primer invariante de tensiones efectivas $= (\sigma'_{1r} + \sigma'_{2r} + \sigma'_{3r})$ = suma de los esfuerzos principales cuando el esfuerzo desviador es máximo.

p_o = Esfuerzo de referencia de 100 kPa igual a la presión atmosférica.

k_5 , k_6 , y k_7 = Constantes de regresión del material obtenidos a partir de ensayos triaxiales de carga repetida realizados en materiales granulares.

Tal y como se aprecia en la figura 11, con el modelo de Uzan se encontró un ajuste muy bueno, concretamente, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,99. Los valores de los parámetros fueron los siguientes: $k_5 = 379,35$; $k_6 = 0,19$ y $k_7 = 0,52$.

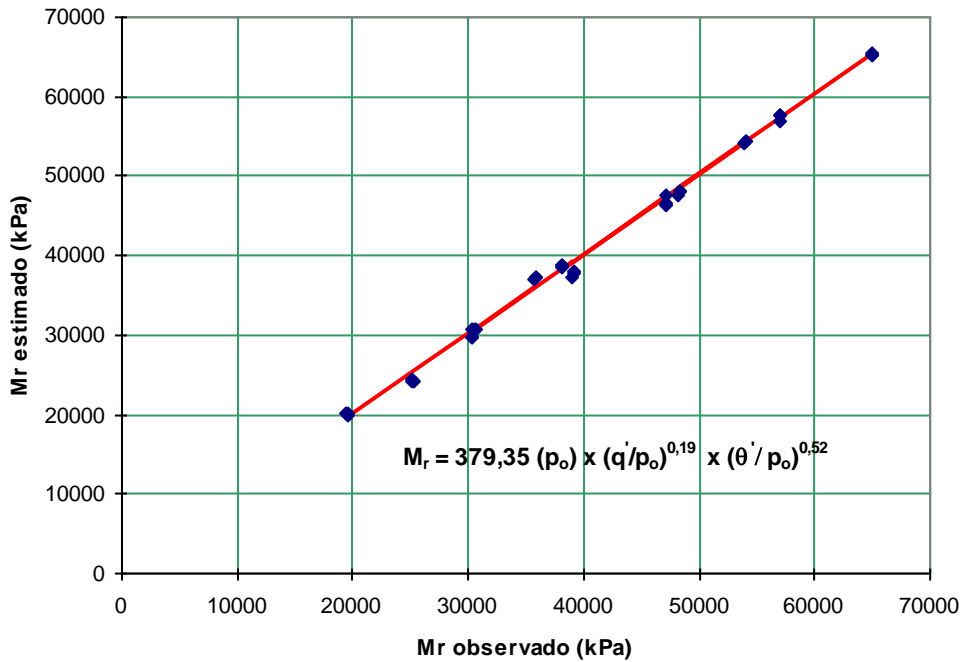


Figura 11. Ajuste del primer modelo de Uzan

Otro planteamiento llevado a cabo, más tarde, también, por Uzan para el análisis en tres dimensiones (3-D) consiste en sustituir el esfuerzo desviador efectivo por la tensión efectiva tangencial octaédrica (Uzan, 1992):

$$M_r = k_8 \cdot (p_o) \cdot \frac{\theta'^{k_9}}{p_o} \cdot \frac{\sigma_{oct}^{k_{10}}}{p_o} \quad (6)$$

donde:

$$\sigma'_{oct} = \text{Tensión tangencial octaédrica} = \sigma_{oct}' = \frac{\sqrt{2}}{3} q'$$

θ' = Primer invariante de tensiones efectivas = $(\sigma'_{1r} + \sigma'_{2r} + \sigma'_{3r})$ realizando la suma de los esfuerzos principales cuando el esfuerzo desviador es máximo.

p_o = Esfuerzo de referencia de 100 kPa igual a la presión atmosférica.

k_8, k_9, k_{10} = Constantes de regresión del material obtenidos a partir de ensayos triaxiales de carga repetida realizados en materiales granulares.

Como se observa en la gráfica 12, nuevamente se obtuvo un buen ajuste entre los valores del Módulo Resiliente estimados mediante el modelo de la expresión 5 y los valores calculados con la fórmula 1. Los valores de los parámetros fueron los siguientes: $k_8 = 438,60$; $k_9 = 0,52$ y $k_{10} = 0,19$. El coeficiente de determinación es 0,98.

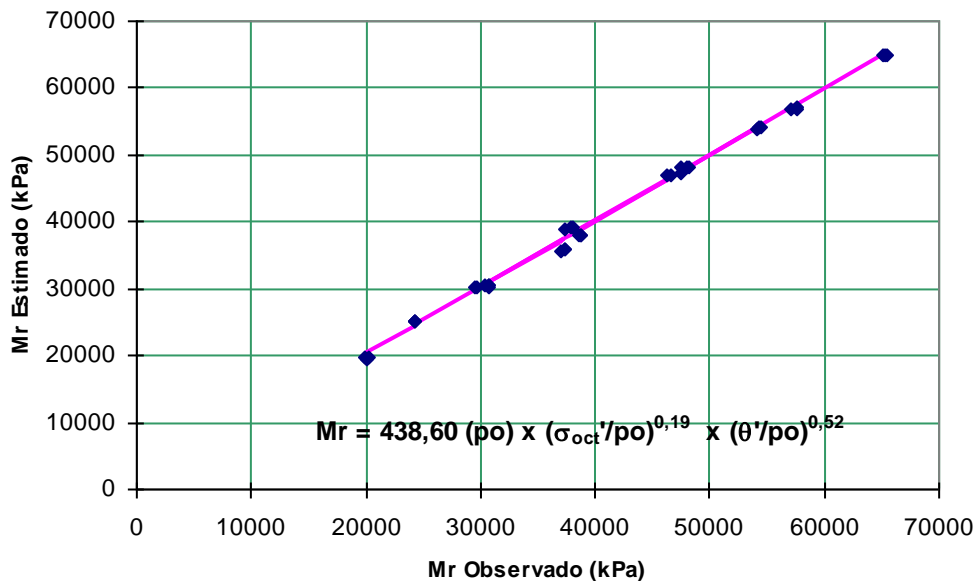


Figura 12. Ajuste del segundo modelo de Uzan

6. CONCLUSIONES

Por primera vez se llevaron a cabo en la **Universidad da Coruña** ensayos para la obtención de las deformaciones resilientes de los materiales granulares de firmes de carreteras. Aunque los ensayos se realizaron sobre una probeta de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, está previsto acondicionar el equipo triaxial para, en un futuro próximo, hacer ensayos con probetas de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura. Asimismo, con el fin de analizar más modelos, se piensa poner a punto un equipo de extensometría que permita medir tanto las deformaciones radiales como las axiales.

En esta investigación se examinaron algunos modelos que tratan de simular el comportamiento de los materiales granulares bajo cargas dinámicas, comprobándose que los dos modelos de comportamiento propuestos por Uzan, que involucran tanto el primer invariante de tensiones como el esfuerzo desviador o la tensión tangencial octaédrica, son los que producen mejores estimaciones del módulo resiliente de los materiales granulares. Después de que se haya realizado el acondicionamiento del equipo triaxial, en futuros trabajos, se estudiarán los modelos que disgregan el esfuerzo y la deformación en sus componentes volumétricas y de corte, tales como los modelos de Boyce y Pappin.

7. BIBLIOGRAFÍA

- BOE (1986). *Boletín Oficial del estado* 213. Anexo 4. 501 ZAHORRAS ARTIFICIALES.
- BOYCE, J. R. (1976). *The behaviour of a granular material under repeated loading*. Ph D Thesis. University of Nottingham.
- BOYCE, J. R. (1980). *A non linear model for the elastic behaviour of granular materials under repeated loading*. Proceedings of the International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, 285-294.
- CEDEX (1992). *Normas NLT. I.- Ensayos de Carreteras*. MOPT. Dirección General de Carreteras. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Centro de Estudios de Carreteras.
- GAJAARD, P. J., PAUTE, J. L., DAWSON, A. R. (1996). *Comparison and performance of repeated load triaxial test equipment for unbound granular materials*. Flexible Pavements, Proceedings of the European Symposium Euroflex 1993. Lisboa, Portugal, 20-22 Septiembre.
- HARASAHIM, M. (1993). *Resilient Behaviour of Granular Materials for Analysis of Highway Pavements*. Ph D Thesis. University of Nottingham.
- HICKS, R. G. (1970). *Factors influencing the resilient properties of granular materials*. PhD thesis, University of California. Berkeley. California.

- MEDINA RODRÍGUEZ, L. E., PÉREZ PÉREZ, I., CRESPO DEL RÍO, R. (2001). *Comprobación estructural de las secciones de la instrucción de carreteras 6.1 y 6.2 IC*. Aceptado para ser publicado en la Revista de Obras Públicas.
- MONISMITH, C. L., SEEDS, H. B., MITRY, F. G., y CHAN, C. K. (1967). *Prediction of pavement deflections from laboratory tests*. Proceedings of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, 109-140.
- MOPU. (1975). *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, PG3*. Dirección General de Carreteras. Madrid.
- PAUTE, J. L., DAWSON, A. R., GAJAARD, P. J., (1996). *Comparison and performance of repeated load triaxial test equipment for unbound granular materials*. Flexible Pavements, Proceedings of the European Symposium Euroflex 1993. Lisboa, Portugal, 20-22 Septiembre.
- PÉREZ PÉREZ, I., NAVARRO GÁMIR, V., ROMANA GARCÍA, M. (2000a). *Comportamiento resiliente de las capas de base de los materiales granulares*. V Congreso Nacional de Firmes. Las capas de base para firmes de carreteras. León.
- PÉREZ PÉREZ, I., NAVARRO GÁMIR, V., ROMANA GARCÍA, M. (2000b). *Modelos predictivos de la deformación permanente de las capas de base de materiales granulares sueltos empleados en los firmes flexibles*. V Congreso Nacional de Firmes. Las capas de base para firmes de carreteras. León.
- PÉREZ PÉREZ, I., NAVARRO GÁMIR, V., VÁZQUEZ SANTANA, F., MEDINA RODRÍGUEZ, L. E., ROMANA GARCÍA, M. G. (2000c): *Propiedades mecánicas de las capas de base y subbase construidas con materiales granulares en los firmes de carreteras*. VI Simposio de Carreteras y Aeropuertos. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (ISPJAE). La Habana. Cuba.
- PÉREZ PÉREZ, I., MEDINA RODRÍGUEZ, L. E., NAVARRO GÁMIR, V., ROMANA GARCÍA, M. G. (2001). *Estudio de las deformaciones resilientes de los materiales granulares sueltos utilizados en capas de base de carreteras*. Congreso Mundial de la Carretera IRF. París.
- PAPPIN, J. W. (1979). *Characteristics of granular material for pavement analysis*. PhD thesis. Department of Civil Engineering, University of Nottingham. Nottingham. England.
- ROMANA GARCÍA, M. G. (2000). *Capas de base de materiales granulares*. V Congreso Nacional de Firmes. Las capas de base para firmes de carreteras. León.
- ROMANA GARCÍA, M. G., PÉREZ PÉREZ, I., NAVARRO GÁMIR, V. (2000). *Algunas notas sobre el comportamiento de las zhorras en los firmes*. INGEOPRES. Nº 82. Mayo.
- UZAN, J (1985). *Characterization of granular material*. Transportation Research Record 1022. Transportation Research Board. Washington, D. C., 52-59.
- UZAN, J. (1992). *Resilient Characterization of Pavement Materials*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 16.