

ALGUNAS APLICACIONES GEOTECNICAS DE LA MODELIZACION EN CENTRIFUGA

C. H. SERRANO (*)

F. J. SANCHEZ (**)

RESUMEN. Existe actualmente una gran variedad de centrifugas geotécnicas en diferentes países del mundo. Basado en la experiencia de los autores, se pretende establecer un marco de referencia del significado del método de modelización con centrifugas, sus alcances y limitaciones. Además, se incluye un breve resumen del tratamiento de un problema geotécnico mediante su uso.

ABSTRACT. A huge variety of geotechnical centrifuges is now available in different centres all over the world. Based on the authors' experience an attempt is made to establish a frame of reference on the significance of the centrifuge modelling method, its scope and limitations. Furthermore, a short summary of the centrifugal work done with a geotechnical problem is also included.

1. INTRODUCCION

Es práctica habitual en la Ingeniería, la realización de una amplia variedad de ensayos de materiales que permitan conocer aspectos tales como su reología, características tenso-deformacionales, resistencia a la fatiga, etc., constituyendo así una base para la prognosis del comportamiento de la estructura en la cual se integra el material objeto de estudio.

El suelo considerado como material, a menudo exhibe características complejas (no linealidad, anisotropía...), que tratan de conocerse usualmente mediante ensayos «de rutina» (triaxiales, edómetros...), donde se analiza con cierto detalle el comportamiento de pequeños volúmenes de suelo con el ánimo de extrapolar sus resultados a la escala real. Sin embargo, el efecto de conjunto de la totalidad de los elementos-suelo que conforman la estructura geotécnica, resulta difícil de precisar a partir de los resultados de un ensayo (o de una serie de ellos), debido a la amplia variedad de trayectorias de tensión posibles en la estructura real. Por tanto, la definición de nuevas respuestas o mecanismos de comportamiento quedará siempre asociada a la interpretación de un número limitado (cuantitativa y cualitativamente) de ensayos, donde se postula una determinada trayectoria de tensiones.

Cabe pensar, por tanto, en un método alternativo consistente en establecer la trayectoria de tensiones real en la estructura geotécnica, simultáneamente a «todos» sus elementos, que permita analizar el comportamiento resultante del conjunto.

La centrifuga geotécnica ha sido reconocida en multitud de países durante los últimos años como medio válido para reproducir el comportamiento global de una estructura geotécnica. Su difusión creciente está acorde con la aplicabilidad de los ensayos centrifugos tanto en el proyecto y control de estructuras geotécnicas convencionales (túneles, rellenos, muros de tierra armada...) como en el análisis de aspectos más específicos (densificación mediante explosivos, filtración de residuos industriales en medios porosos, sacudidas sísmicas en estructuras geotécnicas, etc.).

Estas ideas, bien conocidas por la comunidad centrifuga geotécnica, expresan la necesidad de ampliar la difusión de este tipo de ensayos que permita, además, alcanzar un mayor grado de estandarización en su uso, como una herramienta básica dentro de un laboratorio geotécnico.

El presente artículo pretende, inicialmente, dar un enfoque global de las características, usos y limitaciones de la centrifuga geotécnica, para concluir con una aplicación práctica en el análisis de densificación de arenas mediante explosivos, a modo de ejemplo.

2. REFERENCIAS HISTORICAS

Hoy existe una amplia experiencia tanto de los propios ensayos centrifugos como de los principios de similitud asignables, con multitud de aplicaciones en diferentes investigaciones dentro del campo geotécnico.

El nacimiento de este tipo de técnica puede establecerse en la Universidad de Columbia (EE.UU.), donde BUCKY (1931) modelizó el problema de estabilidad de túneles mineros con modelos a escala reducida, en una centrifuga de pequeñas dimensiones. Simultánea e independientemente, POKROVSKY (1933) y DAVIDENKOV (1933) analizaron fenómenos de inestabilidad de

(*) Ingeniero Civil, M. S. Maryland, Geotechnical Centrifuge Department, USA). Ingeniería del Suelo, S. A.

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniería del Suelo, S. A.

taludes en presas de tierra, en el Instituto de Hidrogeología e Hidráulica Hidro-Geotexeo de Moscú. A pesar de la intervención de POKROVSKY y FYODOROV en la Primera Conferencia de Mecánica de Suelo e Ingeniería de Cimentaciones (1936), el trabajo desarrollado por los investigadores soviéticos en centrifugas permaneció oculto para Occidente durante más de 30 años. Fue al final de la década de los 60, con la traducción de tres libros de POKROVSKY y FYODOROV (1953-1969) que constituyen verdaderos tratados para el investigador interesado en este tema, cuando alcanza difusión y reconocimiento internacional.

Paralelamente, investigaciones como las de PANIK (1952) en Estados Unidos, HOEK (1961) en Sudáfrica, RAMBERG (1963) en Suecia, MIKASA (1965) en Japón, mantienen en ese período un grado de desarrollo aceptable de los trabajos geotécnicos en centrifugas.

Pero es, realmente, al final de los años 60 cuando se inicia una nueva etapa en la modelización con centrifugas, mediante la construcción de un gran número de ellas, específicamente geotécnicas. Las labores realizadas en el Reino Unido por SCHOFIELD, instalando hacia 1966 una centrifuga en el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Manchester (AUGHERINOS y SCHOFIELD, 1969), unido a los desarrollos por BOLTON et al. (1973), contribuyeron decisivamente al desarrollo de esta técnica a nivel mundial.

El reconocimiento oficial del valor real de este método experimental, por parte de la comunidad geotécnica,

tiene lugar con la creación en 1981 del Comité Internacional de Estudios en Centrifuga. A partir de entonces, numerosos países introdujeron esta técnica en el ámbito geotécnico, no ya como herramienta experimental, sino como elemento integrante del diseño y control de estructuras geotécnicas. En la tabla 1 adjunta se incluye un resumen, necesariamente breve, de algunos trabajos recientes desarrollados en centrifugas geotécnicas, que puede resultar ilustrativo de su aplicabilidad.

3. MODELIZACION EXPERIMENTAL EN INGENIERIA. LA CENTRIFUGA GEOTECNICA

La realización de modelos físicos, como herramienta de análisis e investigación de fenómenos, constituye una técnica ampliamente difundida. Las investigaciones en el campo de la dinámica de fluidos pueden considerarse pioneras en la aplicación sistemática de este tipo de simulación. Posteriormente, las ventajas prácticas de la modelización experimental fueron bien acogidas e incorporadas en múltiples campos de la Ingeniería y de la Física (hidrología, meteorología, geotecnia...).

Un aspecto importante en cualquier modelización, consiste en preservar la analogía, entre modelo y prototipo, del fenómeno investigado en sus principales características, aunque difiera en sus dimensiones, velocidad del fenómeno, temperatura, acciones externas... (EMORY y SCHURING, 1977).

En el área geotécnica, sin embargo, mantiene su primacía la simulación numérica frente a la modelización

LUGAR	PAIS	TRABAJO MODELO CENTRIFUGO	REFERENCIA
CHENGDU HYDROELECTRIC INV. INSTITUTE	CHINA	PRESA DE ESCOLLERA CIMENTADA EN TERRENO ALLUVIAL PROFUNDO	LIU ET AL., 1988
CAMBRIDGE UNIVERSITY UNIVERSITY OF LIVERPOOL	REINO UNIDO	LA RESISTENCIA AL SISMO DE MUROS DE RETENCION LA RESISTENCIA Y DILATANCIA DE ARENAS ESFUERZOS EN PLACAS DE ANCLAJE	BOLTON ET AL., 1985 BOLTON, 1986 DICKIN ET AL., 1985
RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM	RFA	LA INTERACCION DE TUNELES POCO PROFUNDOS CON EL SUELO CIRCUNDANTE	JESSBERGER ET AL., 1987
UNIVERSITY OF COLORADO, BOULDER	EE.UU.	EXCAVACIONES EN ARENA	AZEVEDO, 1983
UNIVERSITY OF CALIFORNIA, DAVIS		REFUERZO DE TALUDES Y RELLENOS	MITCHELL ET AL., 1986
OSAKA CITY UNIVERSITY	JAPON	CONSOLIDACION DINAMICA REFUERZOS DE RELLENOS CON GEOTEXTEILES	TAKADA ET AL., 1987 TANIGUCHI ET AL., 1986
LABORATOIRE CENTRAL DE PONTS ET CHAUSSÉES, NANTES	FRANCIA	CONSOLIDACION POR PESO PROPIO DE SUELOS BLANDOS TIERRA ARMADA CON GEOTEXTEILES	BALAY ET AL., 1988 BUVET ET AL., 1986
QUEEN'S UNIVERSITY, KINGSTON	CANADA	SISTEMAS DE RELLENOS ESTRATIFICADOS	MITCHELL, R. J., 1988

TABLA 1. Resumen de trabajos con Centrifugas Geotécnicas más recientes (década de 1980).

experimental. Se advierte, no obstante, que la simulación matemática viene condicionada al intentar expresar los parámetros del material, definir adecuadamente sus leyes constitutivas y asumir las condiciones de contorno necesarias para la integración del sistema de ecuaciones diferenciales. Sería adecuado, por tanto, contrastar los resultados con otro tipo de simulación: la modelización física o experimental.

Dentro de este tipo de modelización, resulta impensable (en la mayoría de los casos) la modelización a escala natural. La modelización a escala reducida ha sido utilizada en múltiples ocasiones, aunque para grandes estructuras geotécnicas «no se puede reproducir correctamente el estado tensional» en condiciones de gravedad terrestre. Por ese motivo la centrifuga geotécnica se convierte en un elemento útil para la simulación a escala reducida manteniendo dicha analogía tensional.

Con la modelización en centrifuga puede conseguirse que las tensiones existentes en el modelo sean iguales a las del prototipo en los puntos correspondientes, modificando la aceleración existente en el ensayo. Si las condiciones de contorno y propiedades de materiales son idénticos en modelo y prototipo, se conserva la analogía del fenómeno (por ejemplo, disipación de presiones intersticiales) aunque en escalas de tiempo diferentes, transcurriendo en el modelo un período de tiempo claramente inferior.

Las leyes básicas de similitud mecánica entre modelo centrifugo y prototipo, que constituye la base de esta técnica de simulación, pueden resumirse en:

1. Si un suelo con idénticas características de densidad, fricción interna y cohesión, es utilizado en la realización de cuerpos geoméricamente similares: uno, el *prototipo* a escala natural y, otro, el *modelo* a escala $1/N$; será necesario acelerar centrifugamente N veces este último para conseguir estados tensionales similares.
2. Una vez que exista correspondencia entre la distribución de presiones intersticiales de modelo y prototipo, todos los procesos de flujo primario subsiguientes son correctamente modelizados, después de un tiempo t_m (en el modelo) menor que t_p (en el prototipo), cumpliéndose la relación:

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{1}{N^2} \quad [1]$$

4. USOS Y LIMITACIONES DE LA CENTRIFUGA GEOTECNICA

Aun cuando exista perfecta similitud entre modelo y prototipo, la modelización en centrifuga introduce una serie de componentes de aceleración que pueden afectar al comportamiento del modelo (figura 1).

— La primera componente que se introduce en una centrifuga es, evidentemente:

$$a = (g^2 + (\dot{\theta}^2 R)^2)^{1/2} \quad [2]$$

que para el caso $a = Ng$, entonces:

$$\dot{\theta} = (g/R)^{1/2} \cdot (N^2 - 1)^{1/4} \quad [3]$$

lo cual llevaría a que en puntos situados a la misma profundidad z , para velocidad $\dot{\theta} = cte$, las tensiones en el modelo sean ligeramente diferentes debido a la generación de un campo inercial curvilíneo. Este error, inherente a la centrifuga, puede acortarse en el 1 % siguiendo la sugerencia de SCHOFIELD (1976) de limitar la relación «Altura del modelo/Radio del Brazo» a valores inferiores a $1/12$.

En sentido estricto, para obviar el efecto vertical del campo gravitatorio terrestre, el modelo debería inclinarse un ángulo α , tal que:

$$\alpha = \tan^{-1} (g/R\dot{\theta}^2) \quad [4]$$

aunque, en general, esto no se hace en la práctica porque la componente centrifuga es del orden de 100 g, y además debería irse modificando el ángulo citado en función de cada valor de $\dot{\theta}$, hasta alcanzar las revoluciones nominales del ensayo.

Por todo ello, es habitual admitir, en modelos siempre orientados perpendicularmente al brazo de la centrifuga, la expresión simplificada:

$$\dot{\theta} = (Ng/R)^{1/2} \quad [5]$$

- Una segunda componente es la aceleración tangencial, $R\ddot{\theta}$, como resistencia inercial del modelo a la aceleración angular a que se ve sometido. Este efecto debe minimizarse alcanzando la $\dot{\theta}$ nominal en forma lenta:

$$\dot{\theta} = \text{constante} \Rightarrow \ddot{\theta} = 0 \quad [6]$$

- Al tratarse de un sistema rotacional, la aceleración de Coriolis, $2R\dot{\theta}$, puede afectar el comportamiento del modelo centrifugo. Dicho efecto puede soslayarse tanto en el caso de velocidades relativas pequeñas ($R = 0$) como en aquellos ensayos que involucren aceleraciones elevadas en el modelo en dirección radial (movimiento sísmico, por ej.) que minimizan también el efecto citado. PROKOVSKY y FYODOROV (1968) sugirieron evitar el rango de velocidades relativas comprendido entre $0,05 R\dot{\theta}$ y $2 R\dot{\theta}$, para disminuir su influencia.

El rango de aceleraciones de trabajo usado en centrifugas geotécnicas puede situarse entre 10 g y 1.000 g, según se observa en el resumen de la tabla 2. En el caso particular analizado en el apartado siguiente se empleó una centrifuga perteneciente al segundo tipo señalado, en el que pueden distinguirse los siguientes componentes:

- a. Brazo rotatorio.
- b. Sistema de anillos de contacto.

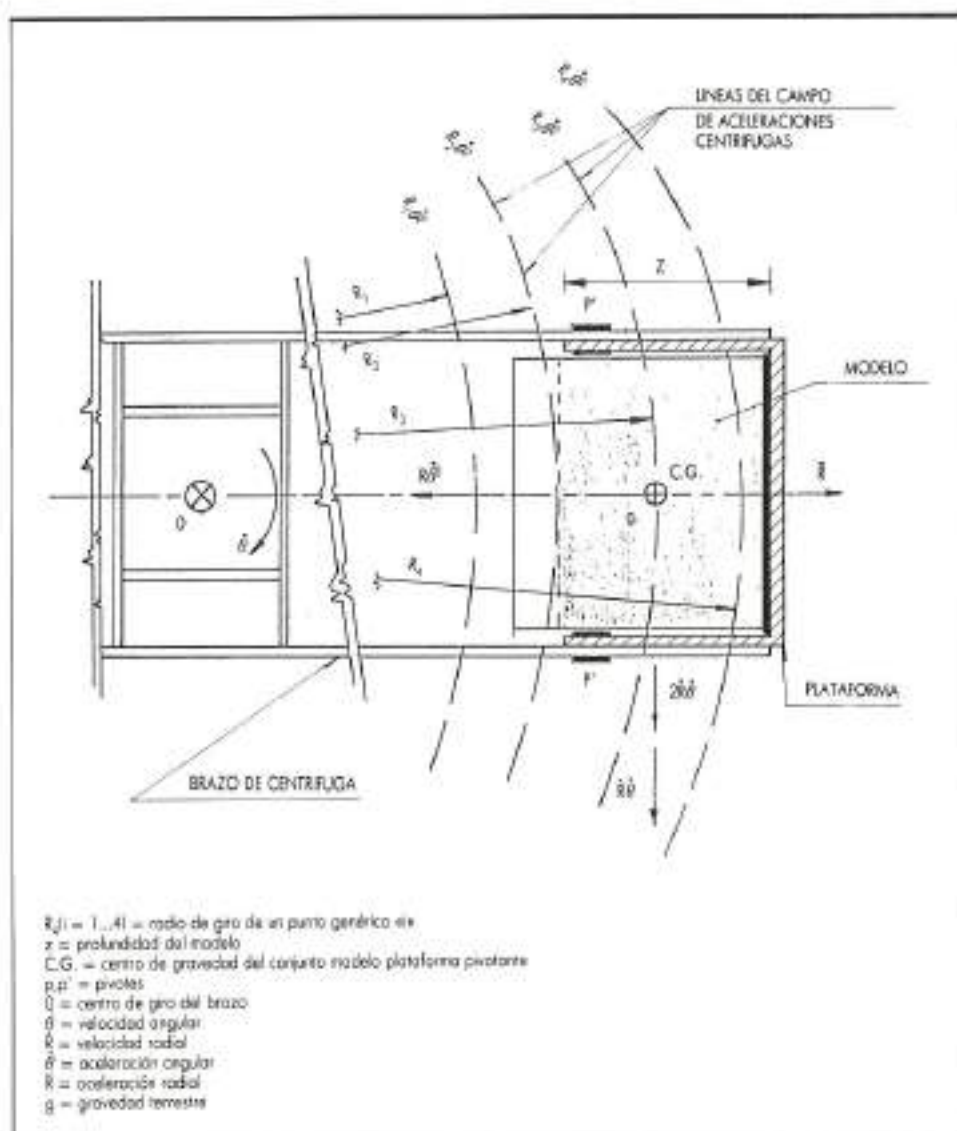


FIGURA 1. Planta de las componentes de aceleración sobre un modelo centrífugo en vuelo.

- c. Sistema hidráulico.
- d. Carcasa exterior.
- e. Consola de control.

Según queda representado en las figuras 2 y 3.

5. EJEMPLO DE APLICACION. DENSIFICACION DE ARENAS MEDIANTE EXPLOSIVOS

El programa de investigaciones, realizado en el Departamento de Centrifuga Geotécnica de la Universidad de Maryland (EE.UU.), sobre densificación de arenas mediante explosivos, tiene su punto de partida en las experiencias de SOLYMAR et al. (1984) en el tratamiento de la cimentación de la Presa de Jebba (Nigeria). El cimiento de esta presa de materiales sueltos estaba constituido por arenas aluviales de 70 m de profundidad, detectándose la presencia de áreas de baja densi-

dad que fueron tratadas por el método de densificación citado. Este tratamiento afectó a un volumen de 236.000 m³ de arena, aumentando su densidad relativa (medida con ensayos de penetración del cono) desde valores del 50-60 % hasta alcanzar el 85-90 %.

El programa de ensayos preparado en Maryland, tratando de reproducir dicho fenómeno mediante modelización centrífuga, puede resumirse en las siguientes etapas:

1. Análisis de la relación existente entre la energía de la explosión y su zona de influencia, mediante la detonación de pequeñas cargas semienterradas, para un rango de aceleraciones entre 1-100 unidades g.
2. Determinación de la profundidad crítica de la carga detonante (máxima subsidencia en superficie sin proyección de material) con la finalidad de aumentar al máximo la zona densificada.

TAMAÑO	DIAMETRO EFECTIVO (m)	DIMENSIONES MAXIMAS DEL MODELO (m x m x m)	PESO MAXIMO DEL MODELO (kg)	CAPACIDAD MAXIMA (g-ton) ¹
GRANDE	> 10,0	2,0 x 1,5 x 1,0	> 1.000	> 500
MEDIO	6,0	1,0 x 0,8 x 0,5	200	100
PEQUEÑO	1,0	0,5 x 0,4 x 0,3	500	10

¹ g-ton = Unidad resultante del producto de la aceleración centrífuga, expresada en unidades g, y el peso del modelo, expresado en toneladas.

TABLA 2. Centrífugas geotécnicas.

3. Análisis del efecto del tamaño de las partículas de arena y escala óptima del modelo centrífugo, con la intención de extrapolar dichos resultados a otros tipos de arena.

Dada la gran extensión del programa de ensayos realizados, aquí sólo se reseñará muy brevemente lo enunciado como punto 1.

Gran parte de los parámetros descriptivos de un sue-

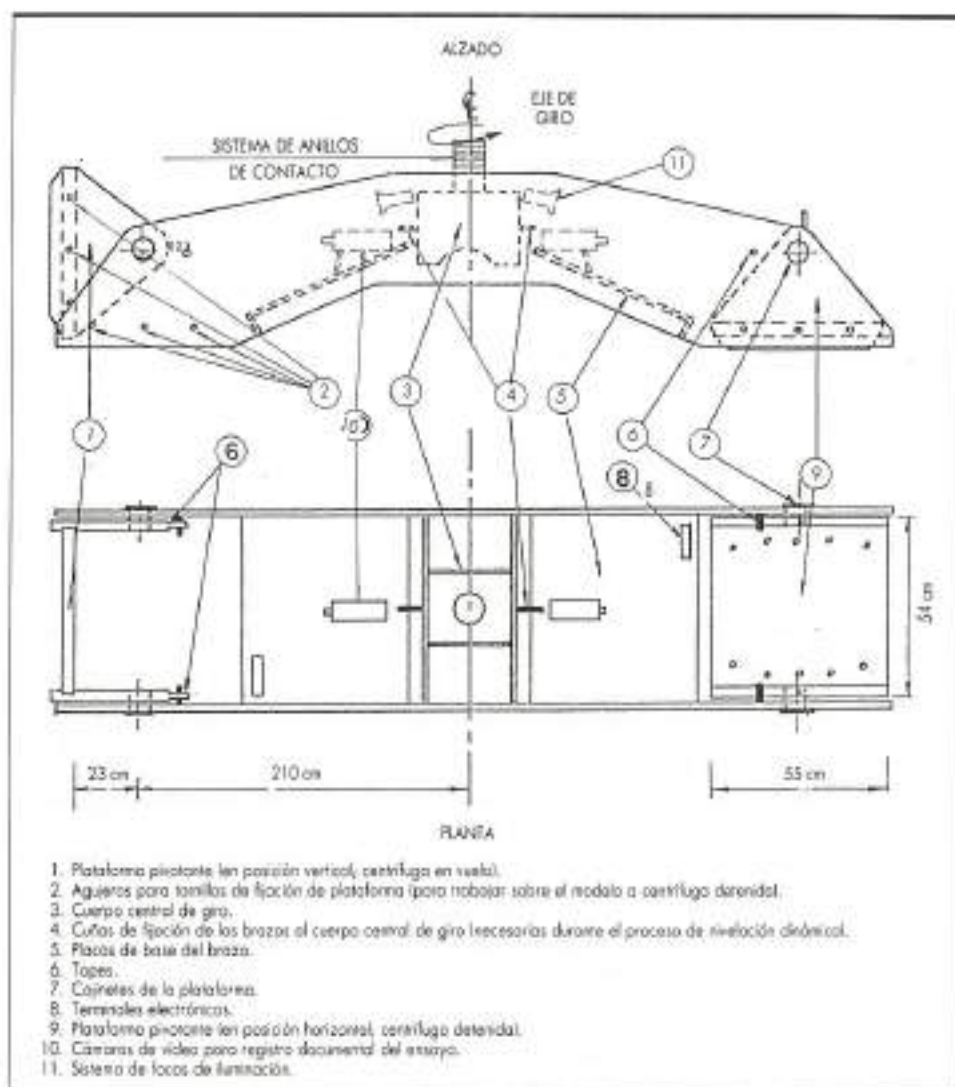


FIGURA 2. Planta y alzado del brazo de una centrífuga de tamaño medio.

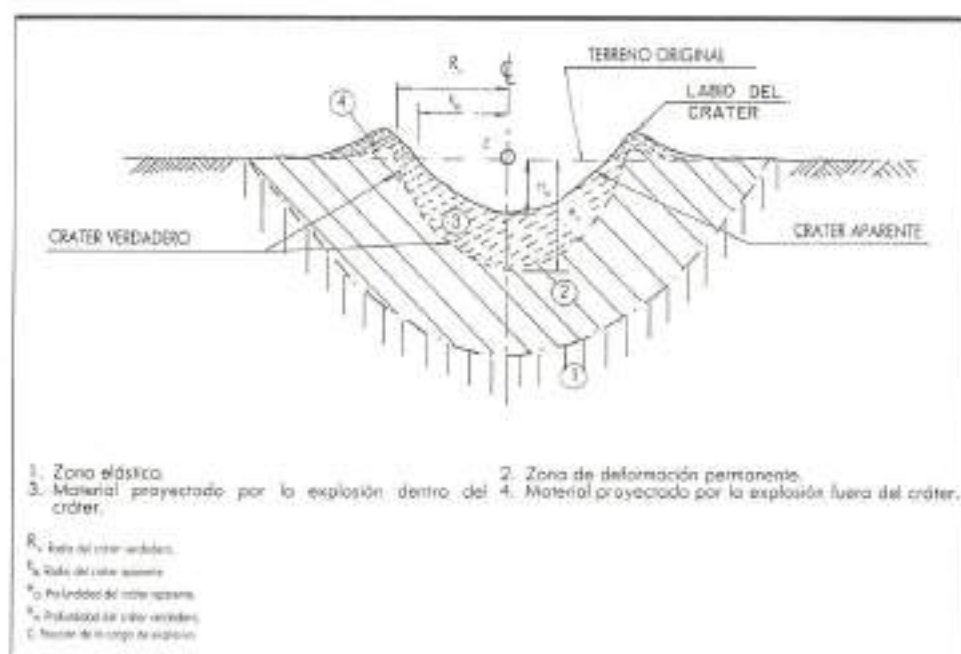


FIGURA 4. Esquema de un cráter genérico.

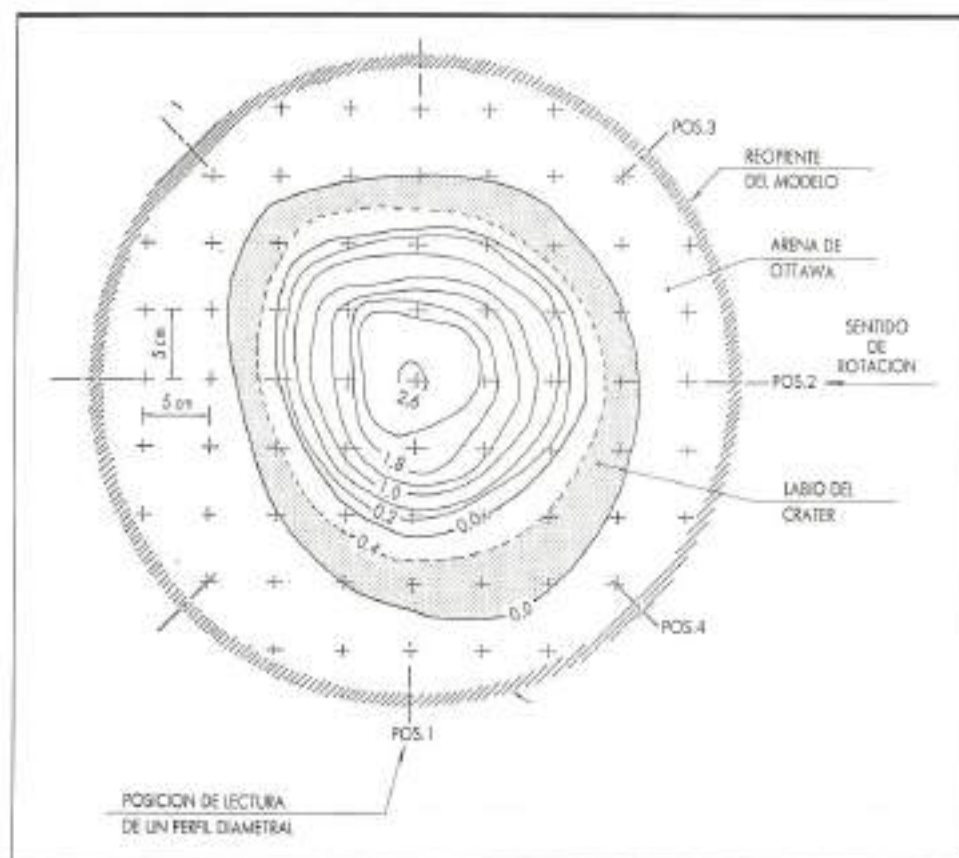


FIGURA 5. Plano topográfico de un cráter obtenido a 20 g's con una carga semienterrada de 1 gr de PETN. Iquidistancia = 0,4 cm.

- a = Aceleración en unidades g
 Q_e = Energía específica del explosivo
 δ = Densidad de la carga
 W = Peso del explosivo

La realización de los ensayos permitió establecer una serie de valores de cada número π y después investigar la existencia de correlaciones entre ellos. Así se ha comprobado la existencia de una correlación clara entre la profundidad del cráter y la carga del explosivo que en forma adimensional resultó ser:

$$\pi_H = (0,086 \pm 0,017) \cdot \pi_W^{(0,257 \pm 0,004)} \quad [11]$$

Esta relación adimensional indica que para un mismo material y una misma carga de explosivo la profundidad del cráter decrece exponencialmente con la aceleración del ensayo de acuerdo con la relación aproximada siguiente:

$$H = \alpha_1 \times a^{(-0,229 \pm 0,012)}$$

donde α_1 sería un parámetro dependiente del tipo del suelo y peso de explosivo.

Del mismo modo, dado un mismo suelo y una misma aceleración, la profundidad del cráter crece exponencialmente con la carga explosiva según la relación aproximada siguiente:

$$H = \alpha_2 \times W^{(0,257 \pm 0,004)}$$

donde α_2 , evidentemente, es un parámetro dependiente del tipo de suelo y de la aceleración del ensayo.

De forma similar podrían analizarse otros detalles

del problema tales como la amplitud del cráter, la velocidad máxima de las partículas a cierta distancia, etc.

Las máquinas centrífugas, por lo tanto, han servido para investigar en modelo reducido un problema tan complejo como es la densificación de arenas con explosivos que, de otra manera, sólo hubiese sido investigable mediante ensayos de campo. La máquina centrífuga permite simular los efectos que en campo hubieran producido grandes detonaciones del orden de millones de veces mayor, con sólo acelerar el modelo hasta 100 g 's.

6. CONSIDERACIONES FINALES

En los últimos 20 años ha habido un crecimiento en el número de centros que disponen de una centrífuga para usos geotécnicos. La estandarización de las operaciones y la mayor versatilidad de los equipos a emplear constituyen un requisito previo para aceptar esta técnica como habitual en geotecnia.

Este procedimiento de modelización presenta indudables ventajas respecto de otro tipo de modelos reducidos en situación de gravedad terrestre, al garantizar magnitudes y trayectorias tensionales similares a las del prototipo. Constituye, por tanto, una herramienta válida en su aplicabilidad geotécnica con costes asumibles frente a los que se derivarían de modelos a escala natural.

Contrastar resultados de ensayos sobre modelos centrífugos con los de sus prototipos es práctica corriente entre los investigadores relacionados con este tema. Así, para el caso del ejemplo práctico citado, se obtuvo una gran similitud entre los resultados del modelo descrito con los de otros realizados en un rango de aceleraciones mayor (300 a 400 g), y con 5 explosiones (com-

ACELERACION CENTRIFUGA A (g)	ENSAYO N.º	ESPESOR MUESTRA (cm)	CRATER APARENTE		
			VOLUMEN (cm³)	RADIO (cm)	PROFUNDIDAD (cm)
1	31	25,40	1.038,6	14,02	4,9
10	30	25,40	287,2	9,07	2,4
20	39	25,40	253,8	8,13	2,3
35	47	25,40	216,2	8,00	2,2
50	25	25,40	169,4	7,63	1,8
65	13	25,40	161,8	7,25	1,8
80	28	25,40	141,4	7,55	1,6
90	32	25,40	137,1	7,38	1,7
100	45	17,78	136,2	7,48	1,6

TABLA 3. Algunos resultados experimentales.

parables en unidades TNT) a escala real en un medio similar (arena).

El presente artículo constituye un intento de presentar brevemente algunas de las características más relevantes del uso de esta técnica en la modelización de estructuras geotécnicas.

7. AGRADECIMIENTOS

Se quiere agradecer al Departamento de Máquinas Centrifugas de la Universidad de Maryland la facilidad prestada para realizar la publicación. También se agradece a D. Antonio Soriano los comentarios y sugerencias al texto de este artículo.

BIBLIOGRAFIA

- AZEVEDO, R. F. (1983). Centrifugal and Analytical Modelling of Excavations in Sand. Ph. D. Thesis. Univ. of Colorado Boulder. EE.UU.
- BALAY, J.; BERDAT, R., y HARFOUCHE, L. (1988). Etude en Centrifugeuse de la Consolidation sous poids propre de sols très lâches. Proc. Int. Conf. on Geot. Cent. Mod. Paris. pp. 193-202.
- BLIVET, J. C.; MATICHAR, Y.; DELMAS, Ph., y GARNIER, J. (1986). Model Test in a Centrifuge of a Wall Reinforced with Geotextile. 3rd Int. Conf. on Geotextile. Vienne. Vol. 4, pp. 1219-1224.
- BOLTON, M. D., y STEEDMAN, R. S. (1985). Modelling the Seismic Resistance of Retaining Structures. Proc. 11th ICSMFE, Vol. 4, 1845-1848.
- BOLTON, M. D. (1986). The Strength and Dilatancy of Sands. Geotechnique, 36, No. 1, pp. 65-78.
- BUCKY, P. B. (1981). Use of Models for the Study of Mining Problems. A.I.M.M.E. Technical Publication 425.
- CHABAI, A. J. (1965). On Sealing Dimensions of Craters produced by Buried Explosives. Journal of Geophysical Research. Vol. 70, No. 20, pp. 5075-5098.
- DAVIDENKOK, N. N. (1983). The New Method of the Application of Models to the Study of the Equilibrium of Soil. Journal of Technical Physics. Moscú. Vol. 3, pp. 131-136.
- DICKIN, E. A., y LEUNG, C. F. (1985). Evaluation of Design Methods for Vertical Anchor Plates. Journ. of Geot. Eng., ASCE, Vol. 111, No. GT4, pp. 509-520.
- EMORI, R. L., y SCHURING (1977). Scale Models in Engineering. Pergamon Press Inc. New York. EE.UU.
- HOEK, E. (1961). Experimental Study of Rock Stress Problems in Deep Level Mining. Proc. 1st Int. Conf. on Experimental Mechanics, pp. 177-194.
- JESSBERGER, H. L.; GÜTTLER, U., y STOFFERS, U. (1987). Centrifuge model Investigations on the Interaction of Shallow Tunnels and surrounding soil. Int. Conf. on Soil Structure Interaction. Paris, Francia.
- LIU, L.-D., y J.-H. TANG (1988). Centrifugal Model of a Rockfill Dam and Concrete Cut-off wall of dam Foundation built in deep Alluvion. Proc. Int. Conf. Geot. Cent. Mod. Paris. pp. 135-140.
- MIKASA, M.; TAKADA N., y KISHIMOTO, Y. (1965). Self-Weight Consolidation Test of soft Clay by a Centrifugal Apparatus. Proc. 20th Conf. Japan Soc. Civil Eng.
- MITCHELL, J. K., y VILLET, W. C. B. (1987). Reinforcement of earth slopes and embankments. Nat. Coop. Highway Res. Prog. Report. 290. National Research Council. Washington D.C.
- MITCHELL, R. J. (1988). Centrifuge Model Studies on Layered Backfill Systems. Proc. Int. Conf. on Geot. Cent. Modelling. Paris, pp. 225-232.
- PANEK, L. A. (1952). Centrifugal testing Applied to the Design of Mine Structures with Special Reference to Roof Control. Proc. 7th Int. Conf. of Directors of Safety in Mines Research.
- POKROVSKY, G. I. (1933). On the Application of Centrifugal Force for Modelling Earthworks in Clay. Journal of Technical Physics. Moscú. Vol. 3, pp. 537-539.
- POKROVSKY, G. I., y FYODOROV, I. S. (1968). Centrifugal Modelling in the Construction Industry. Borrador de la traducción del libro en 3 tomos preparado por Building Research Establishment Library Translation Service. Reino Unido (1975).
- RAMBERG, H. (1963). Experimental Study of Gravity tectonics by Means of Centrifugal Models. Bull. Geot. Inst. Univ. de Uppsala. Vol. 42, pp. 1-97.
- SCHOFIELD, A. N. (1976). The Role of Centrifuge Modelling. Offshore Soil Mechanics; Lloyd's Register of Shipping and Cambridge University Eng. Dept. Reino Unido.
- SERRANO, C. H.; DICK, R. D.; GOODINGS, D. J., y FOURNEY, W. L. (1988). Centrifuge Modelling of Explosion Induced Craters. Proc. Int. Conf. on Geotech. Cent. Model. Paris, pp. 445-450.
- SOLYMAR, V. Z.; ILOABACHIE, B. C.; GUPTA, R. C., y WILLIAMS, L. R. (1984). Earth Foundation Treatment at Jebba Dam Site. Journal of Geot. Eng. Vol. 110, No. 10, pp. 1415-1430.
- TAKADA, N.; TAKEUCHI, I.; MIKASA, M., y IKEDA, H. (1987). Centrifugal model test on dynamic consolidation. Proc. of Annual Convention of ISCE, Vol. 3, pp. 16-17.
- TANIUCHI, E. et al. (1986). Centrifugal Models on Geotextile Reinforced Embankments. Proc. of 8th Asian Regional Conf., ISSHFE, Kyoto. Vol. 1, pp. 499-502.

TELCOGRAVA, HACIENDO CAMINO.

TELCOGRAVA es un sistema basado en la técnica de la Grava-emulsión, que ofrece soluciones técnicas y económicas adaptadas a la necesidad de cada tipo de carretera.

Fabricada con una emulsión de betún que, en función de la calidad de los áridos y el porcentaje de ligante, permite conseguir desde mezclas de altas prestaciones hasta estabilizaciones de coste reducido, con utilización de materiales locales, no válidos en muchos casos para otros tipos de mezclas.

Un nuevo sistema de gran versatilidad y técnicamente idóneo para usos en capas de bases en carreteras.

TELCOGRAVA, UN MATERIAL QUE HACE CAMINO.



Carrera de San Jerónimo, 14 • 28014 MADRID
Tels. 522 64 90 - 531 75 07 • Fax: 522 27 87



DETERMINACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS A TEMPERATURAS ALTAS DE SERVICIO MEDIANTE EL ENSAYO MARSHALL MODIFICADO (1)

FRANCISCO DO PINO (*)
JOSE MARIA MUÑOZ CEBRIAN (**)

RESUMEN. En este trabajo se estudia el comportamiento de los betunes asfálticos, formando parte de las mezclas bituminosas, a las altas temperaturas de servicio en pavimentos de carreteras. El procedimiento utilizado ha sido el método Marshall ASTM D-1559, modificando la temperatura del ensayo en el rango de 45 a 80 °C de 5 en 5 °C. Se ha adoptado, para el estudio de la susceptibilidad térmica de las mezclas ensayadas, el gráfico viscosidad-temperatura para betunes, normalizado en ASTM D-2493, que relaciona la viscosidad con la temperatura absoluta. El análisis de los resultados experimentales obtenidos muestra que betunes con penetración del mismo orden pero de origen, composición y naturaleza diverso, presentan un comportamiento reológico diferente en el campo de temperaturas estudiado. Por otra parte, se ha puesto de manifiesto un brusco cambio de la susceptibilidad térmica de todas las mezclas ensayadas en el entorno de los 55 °C. Este cambio se puede cuantificar por los valores de las pendientes calculadas a partir de las ecuaciones de regresión lineal.

ABSTRACT. *This work attempts to study the behaviour of the bitumens when forming bituminous mixtures at high temperatures of service in highway pavements. The used proceeding has been the Marshall method ASTM D 1559-82, modifying the breakage temperature of the sample test. These temperatures oscillate from 45 °C up to 80 °C, from 5 to 5 degrees. In order to facilitate the study of the obtained results in relation to the thermic susceptibility of the tested mixtures, the ASTM Standard Test Method for Viscosity-Temperature Chart for Asphalts, ASTM D 2493, that relates the temperature and the absolute viscosity, has been adopted. The analysis of the obtained experimental results shows that bitumens with very similar penetration but different source, composition and nature present different rheological behaviour in the range of service temperatures. A marked change of rheological behaviour in all tested mixtures, about 55 °C, has been detected. This change is quantified by the slopes values calculated from the lineal regression equations.*

(1) Trabajo presentado en el Fourth International Symposium «The role of Mechanical Test for the characterization, Design and Quality Control of Bituminous mixes» RILEM, Budapest, 24-26 de octubre de 1990.

NOTA. Este trabajo ha sido publicado en Proceedings de la RILEM Chapman and Hall printed in Great Britain at the University Press, Cambridge. Edited by H. W. Fritz and E. Eustacchio.

(*) licenciado en Ciencias Químicas. Jefe de la División de Normalización y Nuevos Técnicas del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (Ministerio de Obras Públicas y Transportes).

(**) Doctor en Ciencias Biológicas y licenciado en Ciencias Químicas del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (Ministerio de Obras Públicas y Transportes).

INTRODUCCION

En esta obra se estudia el comportamiento de los betunes asfálticos, cuando forman parte de mezclas bituminosas, a las altas temperaturas de servicio en pavimentos de carreteras.

Los resultados correspondientes a las experiencias previas que han sido la base del presente estudio forman parte del Spanish National Report enviado al Third International Symposium, RILEM Belgrade 1983.

Se ha utilizado una modificación del ensayo Marshall, que permite determinar de una manera sencilla las propiedades reológicas de las mezclas bituminosas, en el intervalo de temperaturas en que se manifiestan fundamentalmente las características más importantes

de estos materiales cuando se emplean en pavimentos de carreteras.

La temperatura alrededor de los 60 °C representa esta zona crítica en la que se producen los fenómenos de deformación plástica de estas mezclas, y constituye uno de los problemas actuales más importantes planteados con los materiales bituminosos.

El método Marshall, de utilización muy generalizada, en su normativa actual, no resuelve el problema planteado, por lo que en este trabajo se han introducido unas modificaciones al mencionado método, que pretenden resolver estas dificultades.

En el ensayo Marshall, tal como se propone a continuación, se establecen unas condiciones que permiten estudiar la susceptibilidad a la temperatura de estos materiales durante su periodo de servicio.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento empleado ha sido el método Marshall, ASTM D 1559-82, modificando la temperatura de rotura de las probetas. Las temperaturas utilizadas han sido desde 45 °C hasta 80 °C, ambas inclusive, de cinco en cinco grados.

Con el fin de poner de manifiesto las posibles diferencias de comportamiento de los betunes asfálticos empleados, se ha utilizado en todas las mezclas el mismo tipo de árido y una granulometría idéntica, tipo semidensa, de las siguientes características:

Abertura tamiz:

12,5 mm 10 mm 5 mm 2,5 mm 630 µm 320 µm 160 µm 80 µm

% que pasa:

87,5 78,5 54,5 37,5 20,0 14,0 9,5 5,0

Los betunes asfálticos empleados se relacionan, junto con las características más importantes de los mismos, en la tabla 1.

El contenido de ligante ha sido, en todos los casos, el 5,0 % sobre áridos, determinado como óptimo para el tipo de mezcla estudiada.

Todos los ensayos se realizaron por triplicado, ensayándose un total de 168 probetas Marshall.

RESULTADOS

La densidad relativa aparente, media de las 168 probetas fabricadas, fue de 2,376, presentando la serie una desviación típica de $\sigma_{n-1} = 0,017$.

Los resultados obtenidos se reseñan en la tabla 2, en la que se dan las estabilidades medias, de tres probetas intentadas idénticas, alcanzadas para cada betún asfáltico y cada temperatura de ensayo.

Las probetas se ensayaron en prensa automática con registro gráfico X-Y en el que 1 mm en el papel corresponden a 250 N (25 Kgf) de estabilidad.

Aunque no ha sido objeto principal de este trabajo el estudio de las deformaciones Marshall determinadas en los ensayos de estabilidad, hay que resaltar que el análisis estadístico de los resultados de las mismas, parece indicar una falta de correlación entre tales deformaciones y las temperaturas de ensayo. Los estadísticos calculados para este parámetro, han sido:

Población muestral (n)	168
Deformación media ($\bar{X}$), mm	2,9
Desviación típica (σ_{n-1}), mm	0,4
Ecuación de regresión lineal, $d(\text{mm}) = 2,38 + 9,02 \times 10^{-8} \times t(^{\circ}\text{C})$	
Coefficiente de correlación	0,564

REF.	ORIGEN	NATURALEZA	FABRICACION	ADITIVO	PENE- TRACION	P.R. A.B.	ASFAL- TENOS
A 68/50	ORIENTE MEDIO	PARAFINICO	DESTILACION DIRECTA	—	68	50,0	18,0
B 66/51	VENEZUELA	ASFALTICO NAFTENICO	DESTILACION DIRECTA	—	66	51,0	14,5
C 64/48,5	ORIENTE MEDIO	PARAFINICO	PARCIALMENTE OXIDADO	—	64	48,5	10,5
D 65/46,5	ORIENTE MEDIO	PARAFINICO	DESTILACION DIRECTA	—	65	46,5	6,5
E 62/51	ORIENTE MEDIO	PARAFINICO	DESTILACION DIRECTA	AZUFRE	62	51,0	9,5
F 70/53	ORIENTE MEDIO	PARAFINICO	DESTILACION DIRECTA	POLIMERO	70	53,0	10,0
G 79/48	ESPAÑA	MUY PARAFINICO	DESTILACION DIRECTA	—	79	48,0	21,0

TABLA 1. Características de los betunes asfálticos.

TEMPERATURA °C	ESTABILIDAD MARSHALL (kN)						
	A 6B/50	B 66/50	C 64/48.5	D 65/46.5	E 62/51	F 70/53	G 79/48
45	22,8	22,0	22,4	22,2	22,2	22,8	19,8
50	18,6	19,2	19,7	17,5	19,7	17,4	17,7
55	16,7	15,8	15,9	16,2	17,5	18,2	14,2
60	15,7	15,2	15,6	17,0	15,5	15,9	14,9
65	14,2	15,8	16,0	15,5	14,9	14,5	14,5
70	14,2	13,6	12,1	13,6	12,5	14,4	11,7
75	12,3	12,6	13,9	15,2	13,5	13,0	13,3
80	13,9	10,5	12,4	12,9	11,6	13,3	11,3

TABLA 2. Resultados de los ensayos.

Con el fin de facilitar el estudio de los resultados obtenidos en cuanto a la susceptibilidad térmica de las mezclas ensayadas, se ha adoptado como forma más adecuada de representación gráfica, y del posterior análisis matemático, la del ASTM Standard Test Method for Viscosity-Temperature Chart for Asphalts, ASTM D 2493, que relaciona la temperatura y la viscosidad absoluta con la ecuación:

$$\ln (\log \eta) = M \ln T + \ln B$$

donde:

η = viscosidad absoluta en centipoises

T = temperatura absoluta ($^{\circ}\text{C} + 273$)

M, B = constantes

En este estudio se ha sustituido la función viscosidad absoluta (η) por la función estabilidad Marshall (kN).

La característica más significativa observada al representar en este gráfico (fig. 1) los resultados experimentales obtenidos en el ensayo Marshall a diferentes temperaturas, ha sido la puesta en evidencia de un claro cambio de pendiente, diferente para cada mezcla, a una temperatura próxima a los 55 $^{\circ}\text{C}$, que indica un cambio importante en el comportamiento reológico de las mezclas en relación con su susceptibilidad a esas temperaturas.

Para estudiar con más detalle este fenómeno, se ha calculado a partir de los datos experimentales la regresión lineal de la función considerando dos tramos: uno de 45 a 55 $^{\circ}\text{C}$ y otro de 55 a 80 $^{\circ}\text{C}$. Una vez establecidas las ecuaciones lineales, $\ln (\log kN) = M \ln T + \ln B$, de cada rango de temperaturas seleccionado y de cada mezcla, se resuelven los puntos de intersección —las soluciones—, determinándose las abscisas ($\ln T$) y las ordenadas ($\ln (\log kN)$) correspondientes. En la tabla 3 se reseñan los resultados obtenidos en

el análisis de regresión y los coeficientes de correlación correspondientes.

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados experimentales obtenidos en este estudio se pueden hacer las siguientes consideraciones:

1. No parece existir correlación o dependencia entre la deformación Marshall y la temperatura para un mismo contenido de betún asfáltico. Este hecho pone de manifiesto que la susceptibilidad a las deformaciones plásticas por efecto de la temperatura en estas condiciones depende exclusivamente del rozamiento interno del esqueleto mineral de la mezcla; en la práctica, las deformaciones observadas en las mezclas bituminosas están provocadas por un contenido y tipo de material bituminoso inadecuado para el tipo de mezcla empleado, lo cual habrá de tenerse en cuenta en el proyecto y dosificación de la misma.
2. Betunes asfálticos con penetraciones muy similares, pero de diferente origen, composición y naturaleza, presentan, cuando se ensayan en mezclas de idéntica formulación, diferente comportamiento reológico en el rango de temperaturas de servicio.
3. Se ha detectado un acusado cambio de comportamiento reológico en todas las mezclas ensayadas, en el entorno de los 55 $^{\circ}\text{C}$, cambio cuantificado por el valor de las pendientes, M , calculados para los tramos de temperatura considerados, variando desde -3,297, valor medio del primer tramo, a -1,545, valor medio del segundo tramo.
4. El cambio de susceptibilidad (pendiente) calculado a partir de las ecuaciones de regresión lineal, se produce para seis de los betunes estudiados entre 51 y 56 $^{\circ}\text{C}$. Sólo en el betún aditivado con azufre, esta temperatura se desplaza hasta unos 60 $^{\circ}\text{C}$ aproximadamente.

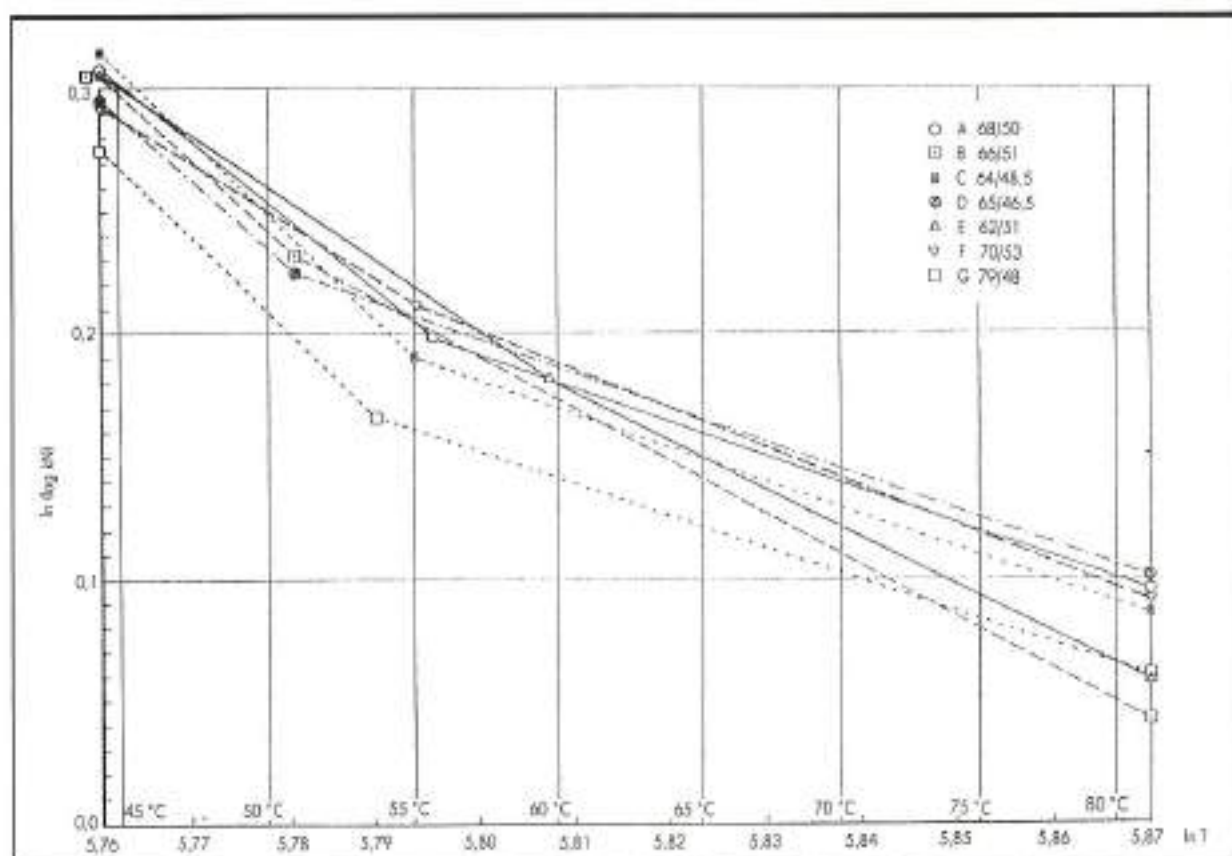


FIGURA 1. Estabilidad Marshall vs. temperatura.

REFER.	INTERVALO DE TEMPERATURA	PENTE. -M	COEFICIENTE DE CORRELACION	°C	INTERSECCION		
					ln (T)	kN	ln (lgkN)
A	45-55 55-80	3,390 1,217	-0,990 -0,835	55,7	5,7951	16,16	0,1894
B	45-55 55-80	3,646 2,100	-0,992 -0,910	50,9	5,7803	18,24	0,2319
C	45-55 55-80	3,755 1,349	-0,984 -0,763	54,9	5,7929	16,22	0,1906
D	45-55 55-80	3,475 1,364	-0,967 -0,810	51,0	5,7808	17,84	0,2243
E	45-55 55-80	2,573 1,937	-1,000 -0,929	59,7	5,8072	15,82	0,1815
F	45-55 55-80	2,445 1,580	-0,786 -0,944	54,9	5,7927	17,34	0,2144
G	45-55 55-80	3,794 1,268	-0,976 -0,760	53,6	5,7888	15,14	0,1657

TABLA 3. Solución de las funciones.

5. La temperatura en la que se producen estos fenómenos son del mismo orden y muy cercanas a las empleadas en la mayoría de los ensayos normalizados para determinar las características de deformación plástica de las mezclas bituminosas (Marshall, Pista de laboratorio y Máquina Giratoria), lo que supone una situación de incertidumbre en cuanto a qué lado de la zona de cambio brusco de pendiente se encuentra al ensayar una mezcla determinada.

6. Se ha encontrado un buen paralelismo entre las conclusiones de este trabajo y las de otro precedente titulado «Float test a simple method to determinate the rheological properties of bitumes in the 45/75 °C range», realizado con los mismos betunes asfálticos y cuyos resultados y conclusiones se presentaron en el RILEM Third International Symposium celebrado en Yugoslavia (1983), aunque las dispersiones obtenidas en los resultados de ensayo de las mezclas son significativamente mayores que en los ligantes correspondientes debido presumiblemente a la inevitable heterogeneidad de las probetas de mezcla aún intentadas idénticas.

7. Se estima necesaria una investigación posterior so-

bre el tema en la que se incluyan nuevos tipos de mezclas y betunes asfálticos que puedan dar una base más sólida a las anteriores conclusiones que permitan establecer una normativa de ensayo para el estudio de la susceptibilidad a la temperatura de las mezclas bituminosas.

BIBLIOGRAFIA

MUNOZ, J. M. and DO PINO, F. (1983). «Float test a simple method to determinate the rheological properties of bitumen in the 45-75 °C range». Third International Symposium, RILEM, Belgrade, Yugoslavia.

PAP, I. (1984). «Discussion to the General Report: Testing of hydrocarbon binders». Third International Symposium, RILEM, Belgrade, Yugoslavia.

SPANISH NATIONAL REPORT (1983). Third International Symposium. RILEM, Belgrade, Yugoslavia.

SUAREZ, L. (1989). «An approach to the thermal behaviour of the bitumens by use of the float test». 4th. Eurobitume Symposium. Vol. 1. Madrid.

«Viscosity-temperature chart for asphalt», ASTM D 2493-68 (Reapproved 1978).