Ensayos triaxiales de materiales granulares con granulometrías sin sobre-tamaños y especímenes de tamaño reducido

A. A. van Niekerk y
J. Van Scheers
Road and Railroad Research Laboratory, Delft University of Technology, Holanda

1. INTRODUCCION

La investigación moderna en ingeniería vial se dirige a determinar el comportamiento de los fundamentos mecánicos de los materiales para que sirvan como datos de entrada a los procedimientos de diseño mecanístico de pavimentos. Con respecto a los materiales granulares de las bases, la dependencia del esfuerzo en el comportamiento mecánico (comportamiento de falla y comportamiento resilente y de deformación permanente) es uno de los aspectos más importantes. Los ensayos de carga cíclica triaxial son una forma razonable de simular los esfuerzos resultantes de las cargas muertas y las cargas del tránsito y pueden ser ejecutados en especímenes que representen las propiedades de densidad, granulometría y contenido de humedad en el pavimento original.

Dos factores que hasta ahora han impedido el uso extensivo de los ensayos cíclicos triaxiales como una herramienta del diseño de pavimentos, y en especial de las bases granulares, son los siguientes:

- El gran tamaño requerido para el espécimen de ensayo. Para el ensayo de capas granulares de base con un tamaño máximo (Dmax) de 40 mm y su graduación total, su diámetro debe ser (Dspec) alrededor de 300 mm para que cumple el requerimiento de tamaño (Dspec/Dmax = 6 ó 7) (Sweere, 1990). Adicionalmente, para cumplir con una probeta cuya altura (h) sea el doble del diámetro, se debe utilizar un espécimen de 300 mm x 600 mm, lo cual produce una probeta de 0.045 metros cúbicos y una masa que va de 80 kg a 100 kg.

- La aplicación cíclica de esfuerzos, y la respuesta producida por el material, lo que requiere de un sistema complejo de carga, control de frecuencia y sistema de adquisición de datos.

Debido a estas limitaciones, el Centro para el Estudio de los Requisitos Funcionales de las Bases Granulares de Holanda (R.O.W.) encargó a la Universidad Tecnológica de Delft para investigar dos posibilidades obvias de superar estos dos obstáculos.

1. Se midió y comparó la deformación resilente en varios tipos de base granular de granulometría completa (0 a 40 mm) y de granulometría sin sobre-tamaño (0 a 22.4 mm).

Este tipo de granulometría puede ser ensayada con especímenes más pequeños de 150 mm x 300 mm, siempre cumpliendo con el requisito de que Dspec/Dmax = 6 ó 7.

2. Una comparación entre el comportamiento de la deformación resilente medido ante cargas cíclicas y cargas estáticas.

Esta investigación también busca simplificar algunos aspectos de la preparación de los especímenes, la instrumentación y el ensayo para lograr una implementación más extendida. En este proyecto se siguen dos enfoques que son los siguientes:

1. Para empezar, se realizan dos series de ensayos cíclicos triaxiales en cinco tipos de bases granulares con granulometrías completas y sin sobre-tamaños y con especímenes de 300 x 600 mm. Al investigar estas bases en forma comparativa, se puede observar el efecto de cambiar la granulometría en la deformación resilente del material.

2. Luego una tercera serie de cargas cíclicas triaxiales con especímenes de 150 x 300 mm ha sido realizada con cinco mezclas de granulometrías variables. La comparación del segundo y tercer grupo mostraría posibles diferencias en las lecturas de los dos tipos de triaxiales. Estas diferencias podrían resultar de los distintos procedimientos de preparación de ensayos (compactación) y de simplificaciones a la instrumentación dirigida a simplificar el ensayo para hacerlo más práctico.

En la sección 2, los materiales ensayados se describen brevemente, seguido de una descripción somera de la preparación de los especímenes, la ejecución del ensayo y la interpretación de los datos obtenidos en la sección 3. En la sección 4 los resultados de los ensayos se presentan seguidos de una comparación entre los diferentes grupos de ensayos y entre las determinaciones cíclicas y estáticas. En la sección 5 se presentan las conclusiones, seguidas de los agradecimientos y referencias en las secciones 6 y 7. Este artículo se basa en dos reportes [Niekerk et al., 1998 y 1999].

2. MATERIALES ENSAYADOS

Las mezclas granuladas, que se componen de desechos de hormigón y mampostería procesados de las demoliciones, son los materiales más comúnmente utilizados en Holanda como bases granulares no adheridas o ligeramente adheridas.

Las especificaciones de Alemania (R.A.W. 1995) para mezclas granuladas son principalmente hechas para determinar las propiedades de los materiales y no como especificaciones relacionadas con el desempeño, por ejemplo:

1. Una curva granulométrica se prescribe, delimitada por un límite superior (UL) y un límite inferior (LL) a un tamaño nominal máximo de 40 mm (ver la Figura 1).

2. Se establecen las cantidades mínimas y máximas de concreto triturado en la mezcla. Una mezcla granulada con concreto debe contener entre 50% y 80% por masa de este material reciclado.

3. Se establecen límites a las cantidades de

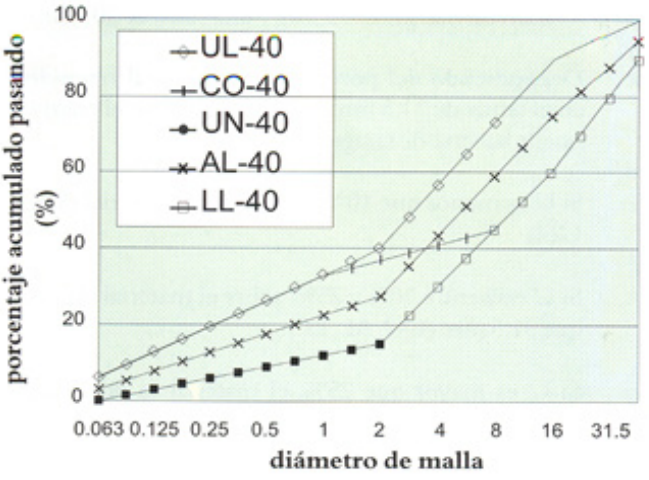

Figura 1: Curva PDSC para las cinco mezclas granuladas completas y sin sobre-tamaños

Tabla 1: Densidades Próctor para las granulometrías completas y sin sobre tamaños

Material	Densidad Próctor			
			Diferencia	
			Absoluta	Relativa
	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(%)
UL	1755	1785	+30	+1.7
CO	1743	1795	+52	+3.0
UN	1597	1633	+36	+2.3
AL	1735	1756	+21	+1.2
LL	1665	1749	+84	+5.0

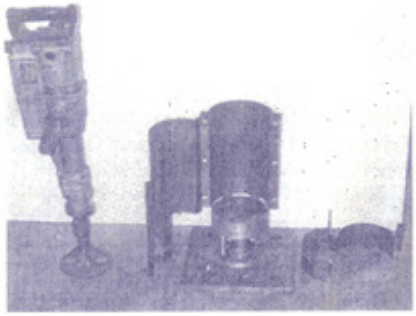

Figura 2: Molde dividido y martillo vibratorio usado para los especímenes de 150 x 300 m.

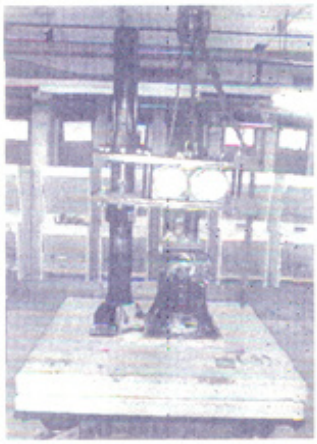

Figura 3: Aparato de compactación vibratoria y molde dividido para los especímenes de 300 x 600 mm.

Figura 4: Especímenes terminados e instrumentados de 300 x 600 mm a la izquierda y de 150 x 300 mm a la derecha.

impurezas en la mezcla (vidrio, madera, yeso, etc.)

4. Se definen los valores del CBR con períodos de curado entre 0 y 28 días.

En la Universidad Tecnológica de Delft (D.U.T.) Se está realizando una investigación sobre cuáles son las cantidades de concreto y mampostería granulada y triturada por una mandíbula y un triturador de tipo impactor han sido tamizadas en las fracciones siguientes: <0.250 mm, de 0.250 a 0.50 mm, de 0.5 a 1.0 mm, de 1 a 2 mm, de 2 a 4 mm, de 4 a 8 mm, de 8 a 16 mm, de 16 a 31.5 mm y de 31.5 a 45 mm. A partir de estas fracciones es entonces posible confeccionar mezclas granuladas con cualquier granulometría y composiciones (definida como la canidad de concreto o mampostería granulada).

En lo que respecta a la investigación del efecto del cambio de la granulometría en la deformación resilente de la mezcla granulada, se encontró que es el factor de influencia más relevante. En consecuencia se investigaron cinco tipos de mezclas cuyas granulometrías se encuentran en la envolvente de las especificaciones alemanas. La Figura 1 define estas granulometrías y su relación con la envolvente en la siguiente forma:

1. Límite superior (UL): la granulometría más fina permitida.

2. (CO): una granulometría con gran cantidad de finos (0-2 mm) y material grueso (8 a 40 mm) y un poco de apertura en la fracción de 2 a 8 mm

3. Uniforme (UN): la opuesta al tipo CO, con un porcentaje extendido de la fracción de 2 a 8 mm.

4. Promedio o intermedia entre límites (AL): el promedio de los límites superiores e inferiores.

5. Límite inferior: con la granulometría más gruesa posible.

La denominación (-40) representa la granulometría llena.

Como parte de la investigación de los ensayos triaxiales se realizaron pruebas en cinco materiales de granulometrías completas.

Como la finalidad de este estudio es establecer de forma práctica maneras de analizar el comportamiento mecanístico de los materiales, se decidió modificar o escalar las granulometrías de una manera simple y práctica. Los materiales simplemente se tamizan en la malla de 22.4 mm y el material que pasa es simplemente la fracción menor (0-22.4 mm) por las siguientes razones:

1. Este procedimiento se percibe más factible de realizar en la práctica que los métodos de reemplazar y reproducir partículas con la misma curva de distribución de forma y tamaño (curvas PSDC).

2. Para ser consistente con las normas alemanas para el ensayo de CBR en materiales granulares de base que deben ser realizados sobre materiales que pasan por el tamiz de 22.4 mm.

Para investigar solamente el efecto de la graduación, estas cinco mezclas granuladas se confeccionaron de idénticos componentes, a saber, de 65% (por masa) de concreto granulado (siendo el promedio entre 50% y 80%) y 35% (por masa) de mampostería triturada.

Para obtener una densidad de referencia para las cinco mezclas granuladas, se establecieron las relaciones entre densidad y humedad para cada una. Se realizó un ensayo Proctor normal con cuatro incrementos de humedad (6, 8, 10 y 12%) por masa en cada caso. De acuerdo a la norma alemana, el Proctor se realiza de la siguiente forma:

- Con un molde de CBR (diámetro: 152.4 mm)
- En tres capas con 56 golpes cada una
- Con un martillo de 2.5 kg y una caída de 305 mm

Dependiendo del porcentaje de material retenido en el tamiz de 31.5 mm (denominado U), el ensayo puede hacerse de la siguiente forma:

Si U es menor que 10% sobre todo el material (UL, UN)

Si U está entre 10% y 25%, sobre el material menor que 31.5 mm (CO, AL, LL)

Si U es mayor que 25%, el material es demasido grueso para realizar el Proctor

Las relaciones densidad y humedad fueron relativamente planas, es decir, que no muestran un contenido óptimo de humedad bien definido. La densidad Proctor se calculó para cada mezcla granulada como el promedio de las cuatro densidades secas para los cuatro contenidos de

humedad utilizados.

La densidad "Proctor" de las mezclas sin sobre-tamaño en su granulometría también se obtuvo de la misma forma. La Tabla No. 1 muestra las densidades obtenidas. En las columnas tercera y cuarta se puede apreciar que las mayores densidades son las de las granulometrías sin sobre-tamaño comparativamente con las granulometrías completas y que esa diferencia es mayor para los materiales más gruesos (CO y LL). Esto es bastante entendible si se considera que el tamaño del molde (d= 152.4 mm) es relativamente pequeño en relación con el tamaño máximo del material (40 mm). Puede ocurrir que un apilamiento vertical de partículas gruesas reciba todo el esfuerzo de compactación y no permita la compactación efectiva total. Esta es una razón por la cual en Holanda es común que no se obtengan compactaciones en sitio que excedan del 100% del Proctor.

3. ENSAYOS TRIAXIALES

En esta sección se comentan brevemente aspectos relativos a la preparación de especímenes, ejecución del ensayo y de la interpretación de los datos, ya que esta parte puede ser sumamente extensa para este artículo técnico.

3.1 Preparación de especímenes

Las probetas para el ensayo triaxial se preparan con densidades y contenidos de humedad que simulen los valores de sitio. Para la aplicación del esfuerzo confinante lateral se requiere de una membrana que contenga la probeta. La membrana de L.D.P.E. debe sellarse en su parte superior y en la placa de apoyo por medio de grasa y retenedores adecuados.

Para aplicar el confinamiento lateral durante la compactación, el espécimen se compacta en un molde de dos secciones. Después de la compactación y sellado de la membrana en su parte superior, la probeta se coloca ante vacío parcial y se libera del molde. Como la primera membrana casi siempre se perfora, es necesario envolver el conjunto en una segunda membrana para sellar la probeta al aire.

Los especímenes de 150 x 300 mm se compactan en 6 capas. Cada capa se compacta manualmente y cada dos capas se utiliza un compactador vibratorio especial desarrollado para este propósito. Este aparato y el molde se pueden ver en la Figura No. 3.

Las probetas grandes y pequeñas para las granulometrías completas y sin sobre-tamaños se compactan hasta su respectiva densidad Proctor (0-40 mm) (1era columna de la Tabla 1) con un contenido de humedad de 8% por masa. Es decir

σ_3 (Kpa)	σ_{dev}/σ_3 (-)
12	2, 3, 4, ..., ± 18
24	2, 3, 4, ..., ± 16
36	2, 3, 4, ..., ± 14
48	2, 3, 4, ..., ± 12
60	2, 3, 4, ..., ± 10
72	2, 3, 4, ..., ± 8

Tabla 2: Relación de esfuerzos aplicada para el ensayo Mr-θ

Material	Relación $Mr = \theta$		
	K_1	k_2	r^2
	(Mpa)	(-)	(-)
UL-40-300	4.0	0.69	0.886
UL-22.4-300	12.7	0.48	0.858
UL-22.4-150	11.3	0.47	0.918
CO-40-300	41.0	0.34	0.770
CO-22.4-300	36.9	0.31	0.866
CO-22.4-150	14.2	0.45	0.875
UN-40-300	12.1	0.47	0.862
UN-22.4-300	29.3	0.32	0.880
UN-22.4-150	17.7	0.38	0.925
AL-40-300	13.5	0.52	.0904
AL-22.4-300	19.0	0.41	0.867
AL-22.4-150	12.1	0.47	0.921
LL-40-300	5.7	0.61	0.925
LL-22.4-300	37.5	0.29	0.836
LL-22.4-150	5.4	0.59	0.924
Promedio			0.881

Tabla 3: Valores para k_1, k_2 y r^2 para los modelos ajustados de Mr-θ

	% acumulado retenido de tamiz de 22.4 mm	Cambio relativo en Mr en 3 niveles de θ (%) 100 kPa	350 kPa	700 kPa	porcentaje
UL	7	18	-10	-22	-5
CO	30	-21	-24	-25	-23
UN	7	19	-1	-11	2
AL	18	-15	-26	-31	-24
LL	30	57	6	-14	16

Tabla 4: Cambio relativo en Mr en tres niveles diferentes de θ como resultado del escalamiento de las granulometrías

	% acumulado retenido de tamiz de 22.4 mm	Cambio relativo en Mr en 3 niveles de θ (%) 100 kPa	350 kPa	700 kPa	porcentaje
UL	7	-14	-15	-15	-14
CO	30	-28	-14	-5	-16
UN	7	-21	-15	-11	-15
AL	18	-16	-9	-5	-10
LL	30	-43	-18	1	-20

Tabla 5: Cambio relativo en Mr en tres niveles diferentes de θ como en la máquina.

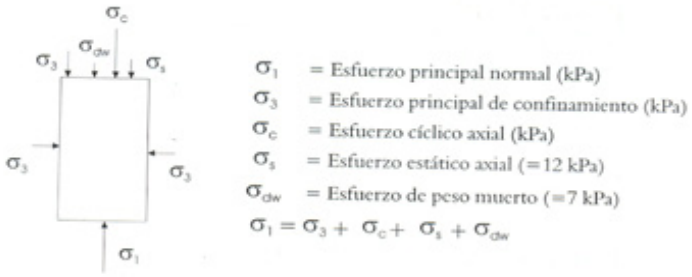

Figura 5: Esfuerzo aplicado en el ensayo triaxial

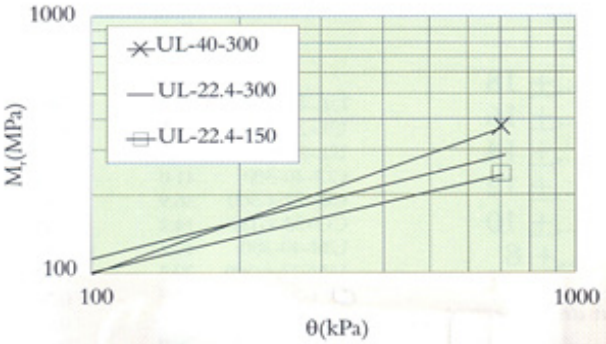

Figura 6: Relaciones Mr-θ para UL-40-300, UL-22.4-300 y UL-22.4-150

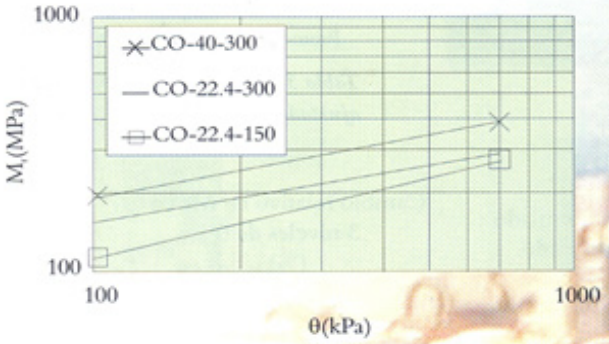

Figura 7: Relaciones Mr-θ para CO-40-300, CO-22.4-300 y CO-22.4-150

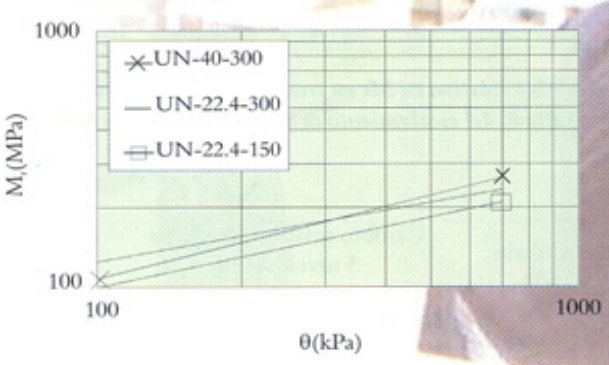

Figura 8: Relaciones Mr-θ para UN-40-300, UN-22.4-300 y UN-22.4-150

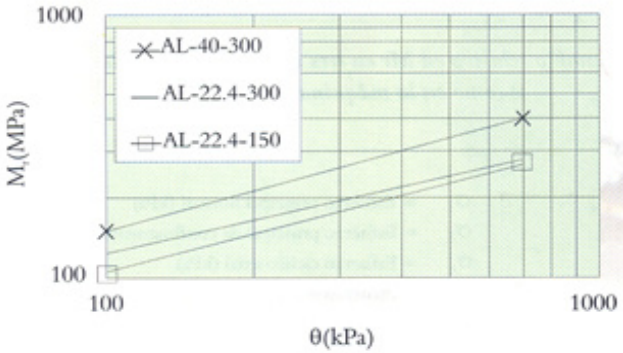

Figura 9: Relaciones Mr-θ para AL-40-300, AL-22.4-300 y AL-22.4-150

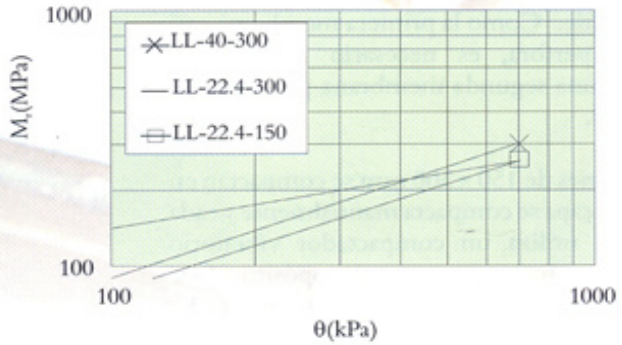

Figura 10: Relaciones Mr-θ para LL-40-300, LL-22.4-300 y LL-22.4-150

que los especímenes UL-40-300, UL-22.4-300 y UL-22.4-150 han sido compactados hasta la densidad seca de 1.755 kg/m^3.

3.2 Ejecución del ensayo

Las cargas cíclicas triaxiales se aplicaron en la forma que se describe a continuación:

- Ensayos de presión confinante constante (CCP)
- Ensayos de presión confinante variable (VCP)

Los ensayos triaxiales ejecutados en este proyecto fueron de tipo CCP. Aunque este tipo de ensayo con presión confinante constante no representa correctamente los esfuerzos presentes en un pavimento ante las cargas del tránsito, es el tipo de ensayo más factible de realizar en laboratorio.

La presión confinante se aplica mediante un sistema de vacíos interno. La presión de confinamiento que se puede aplicar está entre 0 y 90 kPa por la diferencia entre la presión atmosférica y la presión del sistema de vacío.

La aplicación de la presión confinante constante por vacío interno en vez de usar sobre-presión en una celda es también más práctico y hace que los transductores de desplazamiento (LDVT) que se colocan sobre la probeta sean más accesibles.

Las cargas cíclicas y estáticas se aplican mediante un actuador hidráulico y en un sistema de control de la retroalimentación en circuito cerrado, lo que brinda un control preciso de la forma de las cargas (planas o sinusoidales) y de la magnitud posible (hasta 150 Kn).

Las deformaciones axiales y radiales que resultan de la carga de la probeta ante una gran cantidad de niveles de esfuerzo se miden mediante los LDVTs, en la siguiente forma:

- Para los especímenes de 300 mm x 600 mm, se usan dos juegos de tres bloques pequeños pegados a la membrana a 1/3 y 2/3 de la altura del espécimen respectivamente. Sobre estos bloques se colocan dos anillos auto-centrables que sirven como una referencia local para tres LDVTs axiales y dos juegos de tres LDVTs radiales (ver la Figura 4).

- Para los especímenes de 150 mm x 300 mm, se usan tres bloques de agarre y tres pequeños soportes de hierro se pegan a la membrana a 1/3 y 2/3 de la altura del espécimen respectivamente para sostener tres LDVTs axiales. A media altura se colocan tres soportes de hierro pegados sobre el soporte del anillo auto-centrable que sirve de referencia local para tres LDVTs radiales (ver Figura 4).

En el conocido ensayo llamado Mr-(módulo resilente) para determinar el comportamiento del esfuerzo y la deformación resilente, la probeta se somete a una gran cantidad de esfuerzos cíclicos a la relación con el esfuerzo confinante (σ/σ_3) para diferentes niveles de σ_3 como se muestra en la Tabla No. 2.

Para cada relación (σ/σ_3), el espécimen se somete a 100 repeticiones de carga. En la repetición número 100, el sistema de adquisición de datos captura y registra la fuerza total, el esfuerzo y la deformación.

En la Figura No. 5 se resumen los esfuerzos aplicados en los ensayos triaxiales de esta investigación.

3.3 Interpretación de datos

A partir de los datos registrados, se pueden calcular las deformaciones tal como se presenta a continuación:

Eax-res = $\Delta L/L_o$ (1) Erad-res = $\Delta r/r_o$ (2)
Donde:
Eax-res y Erad-res: deformación resilente axial y radial
ΔL y Δr: deformación axial y radial en mm
Lo: longitud medida (100 o 200 mm)
R_o: radio del espécimen (150 o 75 mm)

A partir de los esfuerzos aplicados y de las deformaciones resultantes se pueden obtener las propiedades resilentes (como el módulo resilente Mr y la relación de Poisson) de la siguiente manera:
Mr = σ_c/Eax-res (3) y
ν = - Erad-res/Eax-res (4)

Esta dependencia del módulo respecto a los able.

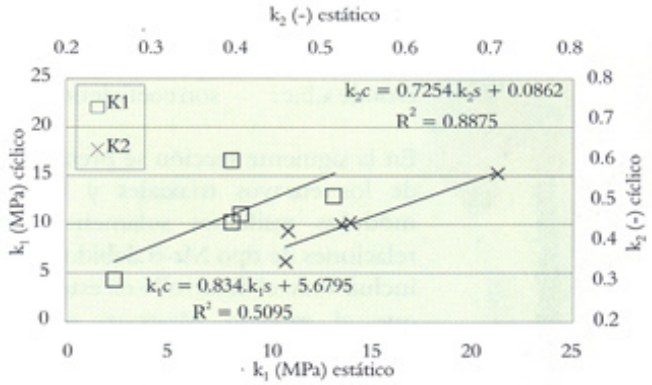

Figura 11: Valores de k1, k2 determinados "cíclicamente y estáticamente", serie I.

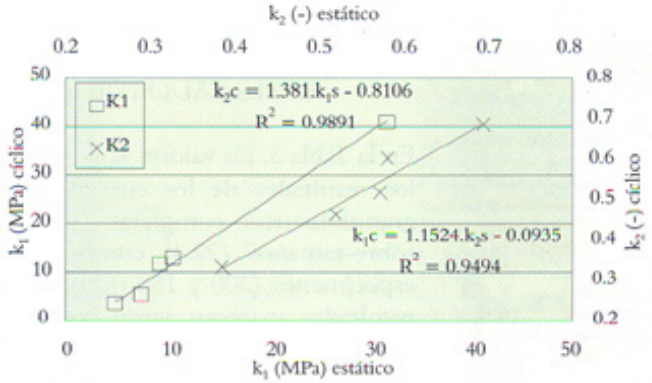

Figura 12: Valores de k1, k2 determinados "cíclicamente y estáticamente", serie II.

esfuerzos, según se observa del Mr y ν en estos ensayos han sido ejecutados por medio de dos modelos para Mr y también dos modelos para ν, por medio de regresión lineal múltiple variable.

Para Mr se usa el modelo Mr-θ y el modelo más universal denominado Mr-σ_3-σ_d ajustado de la siguiente forma:

$Mr = k1\,(\theta/\theta o)^{k2}$ (5)
$Mr = k1(\sigma_3/\sigma_{3,0})^{k2}.(\sigma_d/\sigma_{d,0})^{k1}$ (6)

Donde:
θ: suma de esfuerzos principales [kPa]
$\theta = \sigma_1+2\sigma_3 = \sigma_c+\sigma_s+3\sigma_3+\sigma_{d.w.}$
σ_d esfuerzo desviador ($\sigma_1-\sigma_3$) [kPa]
θo, $\sigma 3.0$, $\sigma d.0$ valores de referencia (- 1 kPa)
k1: coeficientes de regresión [Mpa]
k2, k3: coeficientes de regresión [-]

La dependencia del Mr según el nivel de esfuerzo se modela muy bien mediante la relación $\sigma 1/\sigma 3$ y por el esfuerzo $\sigma 3$ en los siguientes dos modelos:

$v = a(\sigma_1/\sigma_3)^b$ (7)

$v = a(\sigma_1/\sigma_3)^b \quad (\sigma_3/\sigma_{3.0})^c$ (8)

Donde a,b,c : son coeficientes de regresión [-]

En la siguiente sección se presentan los resultados de los ensayos triaxiales y la comparación de módulos resilentes solamente en términos de relaciones de tipo Mr-θ debido a que no es posible incluir todo el desarrollo en este artículo. Se conoce que el modelo Mr-σ_3-σ_d es físicamente más correcto que el utilizado, pero la concordancia entre el modelo simplificado a los datos medidos es muy buena (Tabla 3, r^2 promedio = 0.881). El modelo Mr-θ también permite hacer una comparación de los valores Mr para granulometrías completas y sin sobre-tamaños para diferentes tamaños de especímenes (Figuras 6 a 10).

4. RESULTADOS DE ENSAYOS

En la Tabla 3, los valores k_1, k_2 y r^2 concuerdan con los resultados de los ensayos triaxiales para las granulometrías completas (-40) y aquellas sin sobre-tamaños (22.4) con los dos tamaños de especímenes (300 y 150 mm). En la tabla 3 estos resultados aparecen agrupados por material. Para facilitar la comparación, las Figuras de la 6 a la 10 muestran las relaciones Mr-θ en forma gráfica. En cada una de estas figuras, las líneas se identifican en forma diferente de acuerdo a los símbolos siguientes:

1. xx-40-300: granulometría completa ensayada con una probeta de 300 mm x 600 mm
2. xx-22.-300: granulometría sin sobre-tamaños ensayada con una probeta de 300 mm x 600 mm
3. xx-22.4-150: granulometría sin sobre-tamaños ensayada con probeta de 150 mm x 300 mm. Adicionalmente se adjuntan dos tablas para facilitar la comparación de las relaciones Mr-θ, en la forma siguiente:

- La Tabla No. 4 presenta el cambio relativo que resulta del escalamiento de las granulometrías, en un Mr calculado en el punto bajo (θ = 100kPa), intermedio (θ = 350 kPa) y alto (θ= 700 kPa) de valores de θ.

- La Tabla No. 5 brinda el cambio relativo en Mr, calculado en esos tres niveles de θ, entre los diferentes tamaños de los especímenes ensayados triaxialmente.

En la segunda columna de la Tabla No. 4 y No. 5 se presenta el porcentaje retenido acumulado en el tamiz de 22.4 mm para estas 5 granulometrías, por lo tanto este es el porcentaje de material removido cuando se escalan las granulometrías.

Tal como se presentó en la introducción, la comparación de la primera y la segunda relación (Tabla No.4) demuestra exclusivamente el efecto de escalar las granulometrías sobre los módulos resilentes. Mientras que la comparación de la segunda y la tercera relación (Tabla No. 5) demuestra las posibles diferencias entre mediciones en los dos equipos de triaxial que resultan de las diferencias en la preparación del espécimen o de las simplificaciones de la instrumentación.

La comparación de todas las primeras relaciones a partir de las cinco figuras demuestra que el efecto de la curva P.S.D.C. sobre el módulo resilente de estas mezclas granuladas así como otros factores tales como composición, contenido de humedad y grado de compactación, entre otros, es idéntico.

La revisión de la Figura No. 6 a la No. 10 y la Tabla No. 4 muestra que el escalamiento de la granulometría produce para diferentes graduaciones en:

- UL (límite superior, granulometría fina, Figura No.6): una leve inclinación de la relación Mr-θ, lo que resulta en valores un 18% más altos y 22% más bajos respectivamente en los niveles altos y bajos de θ, y, en promedio en valores un 5% más bajos en todo el rango de θ. La inclinación no es un cambio completo y concuerda con lo que se esperaba ya que solamente un 7% del material (> 22.4 mm) se elimina por el escalamiento.

- CO (graduación completa, finos abundantes (0-2 mm) y abundante material grueso (8 - 40 mm), (Figura No. 7): una traslación general hacia abajo en la relación Mr-θ en todo el rango de θ, con lo cual se presenta una subestimación de 23% en el comportamiento del material. El cambio considerable es en la línea esperada donde se había removido el 30% del material por escalamiento, en combinación con la brecha existente en la granulometría entre 2 y 8 mm, lo que produjo una granulometría con matriz fina.

- UN (granulometría uniforme, Figura No. 8): una inclinación ligera de la relación Mr-θ, que resulta en 19% más alta y 11% más baja que los valores de Mr en el lado alto y bajo de los valores de θ respectivamente; y un promedio 2% mayor para Mr en todo el rango de θ. Esto es bastante similar a lo observado para UL, lo que es consistente con el hecho de que en ambos casos se removió el 7% del material por escalamiento de la granulometría.

- AL (graduación intermedia, Figura No. 9): una traslación general hacia abajo de la relación Mr-θ. Esto produce un 15% de aumento y 31% de valores Mr más bajos en los niveles alto y bajo de los valores de θ, respectivamente; y en promedio un 24% de valores más bajos en todo el rango de θ (se subestima el comportamiento del material). Este cambio es bastante similar al sucedido para CO, pero debe tenerse en cuenta que a la muestra AL le fue removido un 18% por escalamiento.

- LL (límite inferior, granulometría más gruesa), (Figura No. 10): una inclinación considerable de la relación Mr-θ, que produce un 57% de valores más altos y 14% más bajos en los rangos altos y bajos respectivamente de θ; y en general un incremento de 16% en los valores Mr para todo el rango de θ. Dado que para esta muestra se removió un 30% de material se podía esperar un movimiento similar hacia abajo como el de los casos CO y AL. La razón por la cual se ve un menor cambio para AL es por su granulometría bastante gruesa (85% del material que tiene un tamaño mayor que 2 mm). LL realmente tiene una estructura tipo esqueleto en la fracción 2-45 mm. Contrario a lo que pasa con CO, donde la remoción de material > 22.4 mm transforma el esqueleto en una estructura de matriz (las partículas gruesas flotan en las finas), para el caso de LL, la remoción del material > 22.4 mm no produce una estructura de matriz porque no hay suficientes finos.

La revisión de la Tabla No. 5 y de la segunda y tercera relación Mr-θ en la Figura No.6 a la No. 10 muestra que todas las relaciones para las granulometrías sin sobre-tamaños ensayadas con probetas de 150 x 300 mm se trasladaron hacia abajo entre 10% y 20% si se comparan con las relaciones halladas para las granulometrías sin sobre-tamaños con probetas de 300 x 600 mm.

En la introducción se explicó que el ensayo de una granulometría cuyo tamaño Dmax = 22.4 mm con probetas de 150 mm de diámetro cumple con la relación Dspec/Dmax = 6 ó 7 que se requiere para el ensayo. En consecuencia, la traslación de las curvas no puede deberse a problemas de tamaño de las probetas, y, si ocurriera, debería presentarse más acentuadamente para las granulometrías más gruesas y muy poco para las finas. Sin embargo, los resultados de los ensayos muestran una traslación hacia abajo semejante para las relaciones Mr-θ, por lo cual es posible que esto se deba a diferencias entre los dos equipos triaxiales.

Para cada nivel de esfuerzo σ_3 para una relación σ_c/σ_3 igual a cinco, se aplica un esfuerzo vertical de igual magnitud (t = 30 segundos). Luego se determinan los valores estáticos para Mr y ν a partir de las deformaciones resilentes axial y radial.

En la Figura No. 11 y No. 12, estos valores estáticos para k_1 y k_2 se grafican contra los valores cíclicos de k_1 y k_2 (Tabla No. 3) y se muestran sus tendencias. Esto se hizo dos veces, lo cual se denomina serie I y serie II:

- Para los cinco ensayos de la serie I (Figura No. 11), las condiciones con respecto a la duración de la carga, el tiempo transcurrido entre la descarga y la medición de la deformación recuperada resilente y la relación σ_c/σ_3 para la cual la carga estática se toma, no estaban muy bien definidos. Las líneas de tendencia muestran pobre correlación (sobre todo para k_1 con un $r^2 = 0.51$), aunque esto se puede atribuir a un dato desviado (outlier en la Figura No. 11). Para k_2 la correlación es mucho mejor ($r^2 = 0.89$).

- En el caso de los cinco ensayos de la serie II (Figura No. 12), las condiciones anotadas arriba fueron definidas uniformemente y guardadas. Las líneas de tendencia muestran correlaciones casi perfectas entre los valores "cíclicos" y "estáticos" de los coeficientes k1 ($r^2 = 0.99$) y k2 ($r^2 = 0.95$).

Esto también aplica a los coeficientes (a y b) de las relaciones entre ν- σ_1/σ_3 (ecuación 7). Este comportamiento indica que es muy posible, cuando las condiciones de ensayo se definen muy bien entre los procedimientos "éstaticos" y "cíclicos", el determinar las propiedades de resilencia de materiales granulares (no viscosos) a partir de un ensayo estático mucho más simple. Esto concuerda con los resultados de investigaciones previas (Sweere, 1990).

5. CONCLUSIONES

En este artículo se describen los resultados de ensayos triaxiales para determinar las propiedades resilentes de materiales de base granular (con material reciclado), de granulometría completa y sin sobre-tamaño con especímenes de 300 x 600 mm y de 150 x 300 mm. También en esta investigación se comparan las propiedades de resilencia obtenidas mediante condiciones de carga estática y carga cíclica.

Los principales resultados de este estudio son los siguientes:

El procedimiento de escalar o reducir la granulometría de las mezclas 0-40 mm a 0-22.4 mm

produjo los siguientes efectos:

- Relaciones iguales de Mr-θ para las mezclas granuladas fina (UL) y de graduación uniforme (UN).

- Una reducción de 25% en la relación Mr-θ para mezcla con granulometría continua (CO) y para la graduación intermedia (AL), lo que implica una sub-estimación de valores de Mr.

- Relaciones iguales de Mr-θ para la mezcla más gruesa (LL) que parece indicar que tiene un comportamiento de resistencia basado en el esqueleto de partículas apiladas, tanto para granulometría completa como sin sobre-tamaño.

Cuando se realizan ensayos triaxiales en granulometrías 0-22.4 mm con probetas de 150 x 300 mm, no se encontró ningún efecto por el tamaño de la probeta. La reducción sistemática de los valores Mr que se observó para las granulometrías sin sobre-tamaños según el tamaño de la probeta de ensayo se relaciona más con las diferencias en la preparación, compactación y la instrumentación de los dos tipos de equipos triaxiales utilizados.

Si las condiciones de ensayo de definen muy bien es factible encontrar buenas correlaciones entre las propiedades resilentes para cargas cíclicas y estáticas en estos materiales granulares.

La comprensión de los fundamentos del comportamiento mecánico de los materiales granulares gruesos utilizados en bases de los pavimentos puede ser incrementada mediante las siguientes acciones:

- Ensayar las granulometrías sin sobre-tamaños con especímenes más pequeños.

- Ensayar las probetas con cargas estáticas en condiciones de ensayo bien definidas.

- Establecer correlaciones confiables entre el comportamiento de las muestras de granulometría completa y sin sobre-tamaño y para condiciones de carga cíclica y estática.

6. AGRADECIMIENTOS

El centro R.O.W. agradece la oportunidad de haber realizado esta investigación, así como la publicación de los resultados. El estudio fue financiado por la Fundacion Tecnológica STW.

7. REFERENCIAS

Centro R.O.W., 1995, Standard Specifications, R.A.W., Holanda

Niekerk AA van Sheers Jvan & Galjaard PJ, 1998. A comparion of the resilient deformation behaviour of mix granulates at full and scaled down gradings. Laboratory report (en alemán) Delft University of Technology, Holanda.

Niekerk AA van Sheers Jvan & Galjaard PJ, 1999. A comparison of the resilient deformation behaviour of mix granulates at scaled down gradings tested at different specimen sizes. Laboratory report (en alemán), Delft University of Technolgy, Holanda.

Sweere, GTH, 1990. Unbound granular bases for roads. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, Holanda.