



EVALUACION DE PARAMETROS GEOMECANICOS DE SUELOS GRUESOS

Ramón Verdugo Alvarado
Universidad de Chile
rverdugo@ing.uchile.cl

Gustavo Peters Morales
CMG Ingenieros
gpeters@cmgi.cl

Iván Bejarano Bejarano
IDIEM, Universidad de Chile
ivan.bejarano@idiem.cl

RESUMEN

Se describe en detalle el equipo triaxial de gran escala diseñado y construido en IDIEM que permite ensayar probetas de hasta 1 m de diámetro y se presentan resultados de ensayos efectuados muestras “inalteradas” extraídas desde la grava de Tobalaba, la grava del Maipo y de material aluvional de Puente Alto. Adicionalmente, se propone una metodología para evaluar parámetros geomecánicos de suelos gruesos.

1. **INTRODUCCION** Dada la geografía de Chile es posible encontrar una gran cantidad de ciudades emplazadas sobre depósitos de materiales gruesos de gran espesor constituidos por partículas que van desde grandes bloques a gravas arenosas. Adicionalmente, el uso de estos materiales es muy común en la construcción de grandes presas y rellenos masivos en general. Para materiales gruesos compactados existen métodos alternativos que permiten ensayar el material menos gruesos del original (Fragaszy et al., 1992; Verdugo et al., 2003; De la Hoz, 2007), pero para depósitos naturales es necesario mantener la estructura del suelo. Teniendo en consideración la real necesidad de estudiar y caracterizar suelos de grandes partículas, en el Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales (IDIEM) de la Universidad de Chile, se construyó en el año 2001 un triaxial de gran escala que permite el ensayo de probetas de hasta 1 m de diámetro y 2 m de altura. En este artículo se presentan los detalles del equipo construido y su utilización con probetas “inalteradas” extraídas desde la grava de Tobalaba y de un depósito aluvional de Puente Alto. El procedimiento de extracción de muestra “inalterada” en estos materiales y los resultados obtenidos, en términos de resistencia, se presentan en detalle en este trabajo.

2. **DESCRIPCION DEL EQUIPO TRIAXIAL DE GRAN ESCALA** El equipo triaxial de gran escala desarrollado en IDIEM tiene la capacidad para ensayar probetas cilíndricas de 60 y 100 cm de diámetro y alturas de 120 y 200 cm, respectivamente. De acuerdo a estas dimensiones resulta posible ensayar materiales gruesos con tamaños máximos de partícula de hasta 7”. La presión máxima de confinamiento es de hasta 30 kg/cm², con una carga axial de trabajo máxima de 2000 ton. Los principales componentes de este equipo son los siguientes: Marco de reacción, cámara de presión, sistema de aplicación de carga axial y confinamiento y sistema de medición de parámetros del ensayo. En la Fig. 1 se presenta un esquema del triaxial con la ubicación de las probetas.

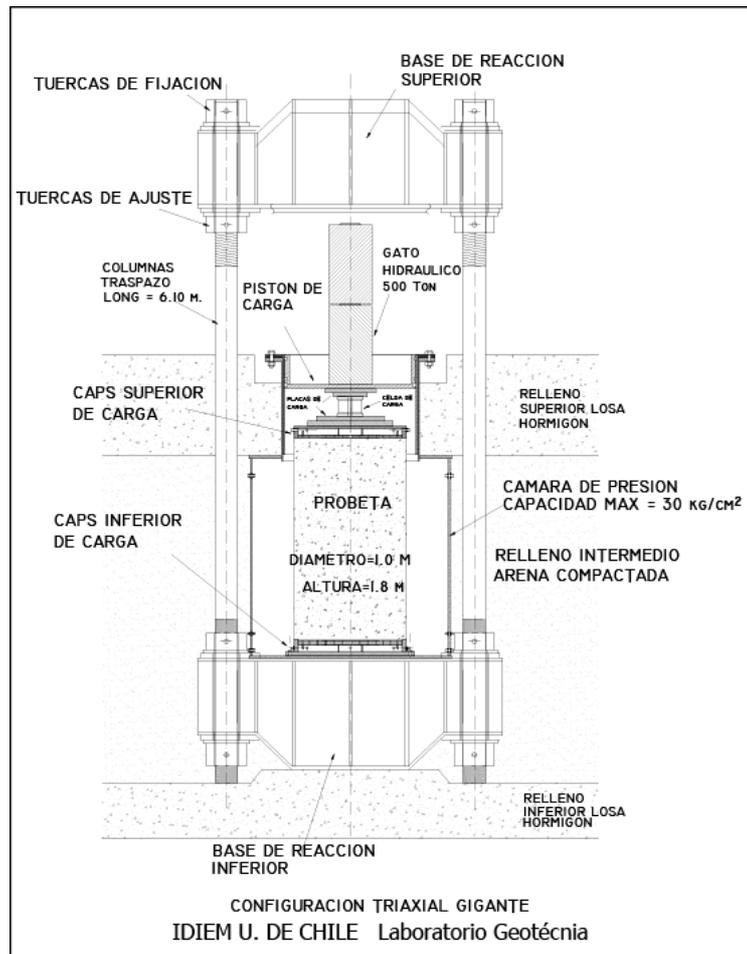
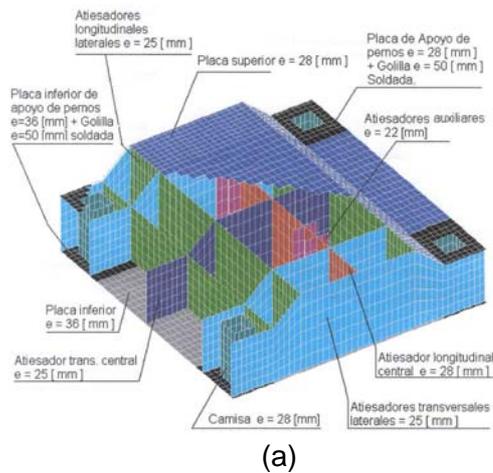


Fig 1.- Equipo triaxial de gran tamaño IDIEM-2001

El diseño del marco de reacción corresponde a un sistema auto bloqueante, vale decir, tiene la capacidad de soportar esfuerzos internos sin transmitirlos a los apoyos de la estructura, lo que permite independizarse de la fundación del equipo. Las condiciones de ensayo exigen una importante rigidez del marco de forma de reducir cualquier interacción no deseada entre el marco de carga y la probeta ensayada. Por esto, para la carga máxima de trabajo, en el diseño se restringió a 5 mm la deformabilidad entre las bases de dicho marco de carga.

El marco lo componen dos bases cuadradas de acero, que constituyen los elementos principales de reacción, estas se unen entre sí por 4 columnas de traspaso de esfuerzos, materializadas en acero cilíndrico macizo de 200 mm de diámetro y 6000 mm de altura. Las bases de reacción están construidas como un reticulado de láminas de acero; con un sistema estructural principal constituido por dos placas horizontales de acero; la superior de 25 mm y la inferior de 36 mm de espesor. Estas placas horizontales se unen mediante dos atiesadores centrales en las direcciones longitudinal y transversal, con espesores de 25 y 28 mm, respectivamente. Adicionalmente, existe una serie de atiesadores secundarios, los que a su vez son reforzados por una tercera serie de elemento de menor espesor. La zona de unión a los pernos de traspaso de carga tiene un sistema de refuerzo adicional constituido por una camisa de protección del perno y dos placas de asiento de las golillas y tuercas que forman el sistema de conexión entre las bases y las columnas de traspaso. Una vista del modelo utilizado en el diseño estructural y de la base inferior se presenta en la Fig. 2.



(a) Modelo numérico (b) Base de reacción inferior.

Fig. 2.- Vistas del Marco de Reacción

Por otra parte, la cámara de presión triaxial la compone un cilindro metálico y una tapa superior que tiene una doble tarea; materializar el sello superior de la cámara y actúa como pistón de carga axial. Esta cámara está construida con láminas de acero cilindradas de 25 mm de espesor. En la Fig. 3 se presentan la cámara de presión antes de su instalación y la tapa superior, o pistón de carga.



Fig. 3 Vista de cámara de ensayo y pistón de carga

La forma de este elemento está condicionada por dos criterios de diseño; el primero es el de permitir la libre deformación radial de la probeta en ensayo (definición del diámetro inferior) y el segundo está controlado por la minimización de la carga vertical ascendente sobre el pistón de carga (diámetro superior). Consecuentemente, la cámara tiene en su zona inferior un diámetro interior de 1740 mm y una altura de 1760 mm. En la zona superior el diámetro interior es de 1200 mm en una altura de 900 mm.

En la zona superior se agregó una camisa de recubrimiento en acero inoxidable, con un acabado superficial de precisión conseguido mediante torneado mecánico que constituye la zona de recorrido del sello y pistón de carga.

El pistón de carga, también construido en acero, tiene una forma cilíndrica con un diámetro exterior de 1162 mm, una altura de 300 mm, cuya base y pared tienen un espesor de 40 mm. Exteriormente, en forma perimetral, este pistón cuenta con dos anillos de polietileno de ultra alta densidad (UHMW), los cuales tienen como objetivo servir de guía al pistón y evitar su inclinación. El sello del pistón se ubica en el borde inferior y corresponde a un packing de



Acrilo Nitrilo con sección en forma de “v” invertida de modo de aprovechar la misma presión de cámara para generar el sello perimetral.

La carga axial se aplica mediante gatos hidráulicos de doble acción que poseen una capacidad de 500 toneladas y una carrera de 40 cm. En la Fig. 4 se aprecian los cuatro gatos hidráulicos, que permiten la aplicación de hasta 2000 toneladas de carga axial. Estos gatos son comandados manualmente por medio de una central hidráulica de alta presión que cuenta con cuatro canales independientes.

El sistema de presión de confinamiento se ejerce mediante presión de agua controlada por una bomba de impulsión hidráulica de pistones triple de alta presión, equipada con manómetro y válvula reguladora de presión. Este sistema cuenta con un estanque de estabilización que tiene un colchón de aire amortiguador, lo cual reduce las pulsaciones en el flujo y permite aplicar una presión de confinamiento constante (Fig. 5).



Fig.- 4 Gatos hidráulicos para carga axial



Fig. 5.- Sistemas de presión de cámara

En la Fig. 6 se presenta un esquema del sistema de control de las presiones de cámara y contrapresión (back pressure) constituido por válvulas de acero inoxidable, reguladores de presión de aire y agua y un sistema doble de manómetros de precisión y transductores de presión.

En este sistema se identifican tres líneas principales; la primera permite aplicar la presión de cámara (parte desde el estanque de recirculación de aguas y pasa por la bomba de impulsión hacia la cámara de ensayo), el segundo circuito permite la aplicación de la contrapresión mediante un compresor de aire y una interfaz aire-agua, la tercera línea auxiliar tiene por objeto la continuidad de ensayo ante eventuales obstrucciones y permite el manejo de flujos en la probeta para la ejecución de pruebas de permeabilidad.

El seguimiento de las variables de cada ensayo se realiza mediante sensores electrónicos conectados a un computador donde se almacena toda la información. La carga axial se mide con celdas de cargas de 500 toneladas de capacidad, ubicadas directamente sobre la probeta, evitándose correcciones por roce de pistón (Fig. 7). La deformación axial se mide a través de un sistema compuesto por tres LVDT, los cuales se fijan de modo equidistante en el pistón de carga por medio de los barros de guía (Fig. 8).

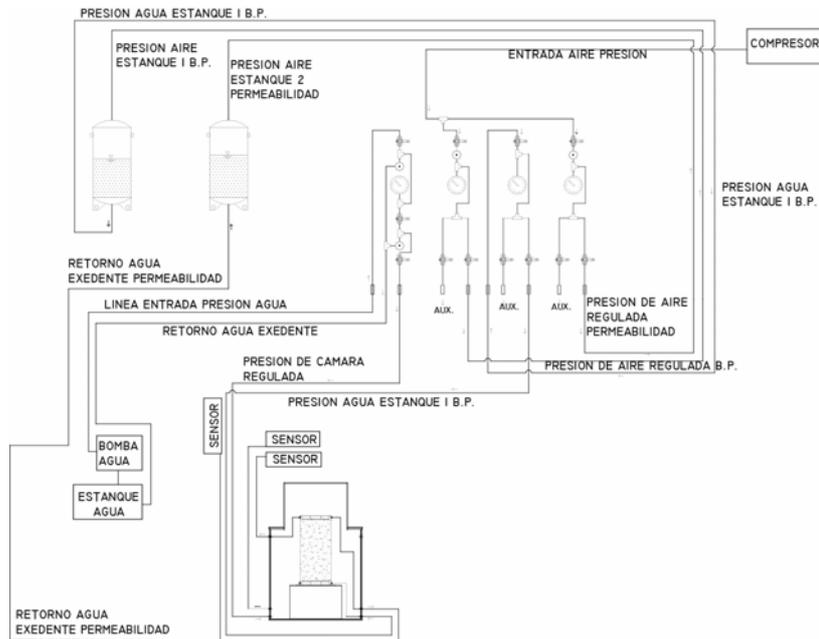


Fig.7.- Celda de carga



Fig. 8.- Sensores de desplazamiento

Las presiones de cámara y de poros (ensayos no-drenados) se miden a través de tres sensores de presión; uno para el control de la presión de cámara y otros dos para la presión de poros. Estos sensores tienen una capacidad máxima de 50 y 10 kg/cm², respectivamente. Por último, la variación volumétrica de la probeta, tanto para las etapas de consolidación como para la ejecución de ensayos en condiciones drenadas, se realiza a través de la medición de las variaciones del peso de un estanque conectado al interior de la probeta. Este estanque está suspendido y colgado sobre una celda de carga (Fig. 9), la cual permite registrar el peso del agua que sale o entra a la probeta.

3. EXTRACCION DE MUESTRAS INALTERADAS DE SUELOS GRUESOS. En este acápite se describe el procedimiento de toma de muestra "inalterada" llevados a cabo en dos material gruesos: grava de Santiago y depósito aluvional de Puente Alto. Ambos materiales se extrajeron de excavaciones del Metro de Santiago, el primero de la expansión de la estación Tobalaba, a una profundidad aproximada de 18 m y el segundo de un costado del frente de avance del túnel nor-poniente de la estación Las Mercedes, Puente Alto, a una profundidad de 16 m. En ambos materiales se tallaron en terreno, se extrajeron y se ensayaron en el triaxial a gran escala series de tres probetas "inalteradas" de 60 cm de diámetro y 120 cm de altura.

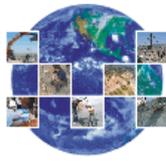


Fig. 9.- Sistema de medición cambio volumétrico

Los principales pasos que permitieron la extracción de las probetas “inalteradas” se ilustra en la Fig. 10 y se describen a continuación. La operación se inició con la ejecución en terreno de una pared vertical que correspondía a un costado de la probeta. A continuación, en esta pared se penetró horizontalmente, en forma manual, con una pequeña excavación rectangular ubicada exactamente debajo de la zona que constituiría la probeta. Luego, al techo de esta excavación (que corresponde a la base de la probeta a extraer) se adosó fuertemente, mediante la acción vertical de una gata mecánica, el pedestal metálico sobre el cual descansa la probeta en la celda triaxial. Fijado el pedestal inferior, se dio inicio al tallado de la probeta. Este proceso se desarrolló en dos etapas; una primera orientada a generar gruesamente la probeta y por tanto de dimensiones ligeramente mayores y una segunda, de tallado fino, que generó la forma cilíndrica y uniforme final de la probeta. Terminado el tallado de la probeta se colocó el cap superior y enseguida una membrana de caucho. A continuación se aplicó al interior de la probeta un vacío de 0.5 – 0.7 kg/cm².

Para extraer la probeta del sitio se diseñó un sistema de canastillo que se ilustra en la Fig. 10d, el cual permitió levantar la probeta descansando totalmente en el pedestal inferior. Para el traslado al laboratorio se colocó la probeta dentro de un tubo corrugado de HDPE, rellenándose el espacio entre probeta y tubo con arena. Posteriormente, en el laboratorio se introdujo la probeta dentro de la celda triaxial utilizando una grúa pequeña.

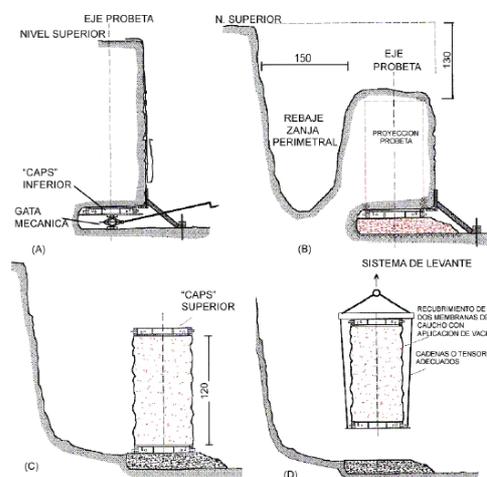


Fig. 10.- Secuencia de obtención de probeta “inalterada”



4 MATERIALES ENSAYADOS. La información granulométrica de la grava extraída en el sector de la estación Tobalaba y del material aluvional extraído del túnel en Puente Alto se presenta en la Tabla No. 1.

Tabla No. 1.- Información granulométrica de los materiales ensayados

Material	D ₁₀₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	% Grava (>2mm)	% Arena	% Finos (<0.074mm)
Fluvial Tobalaba	178	22	72	22	6
Aluvio Puente Alto	178	0.42	34	32	34

Los finos en ambos casos clasifican como CL. En la Tabla No. 2 se presentan los resultados promedios de densidad, humedad y grado de saturación, obtenidos de las probetas ensayadas para ambos materiales.

Tabla No. 2.- Variables de estado de los materiales ensayados

Material	Densidad seca, (t/m ³)	Humedad (%)	Grado de Saturación (%)
Fluvial Tobalaba	1.95	8	53
Aluvio Puente Alto	1.69	16.7	81

5. ENSAYOS TRIAXIALES A GRAN ESCALA. En cada uno de los materiales gruesos ya indicados se ensayaron tres probetas "inalteradas". Dos probetas de cada suelo fueron sometidas a ensayos CID, a presiones de confinamiento isótropo de $\sigma'_o = 1$ y 4 kg/cm^2 , mientras que la tercera probeta de cada suelo se llevó primero a un proceso de carga para evaluar el coeficiente en reposo, K_o , y de ahí a la rotura de forma convencional.

Todos los procesos de consolidación isótropa se realizaron mediante incrementos de cargas de 0.5 kg/cm^2 , verificándose en cada paso la estabilización de las deformaciones experimentada por las probetas. A continuación se aplicó la sollicitación axial en incrementos de carga constante. Cada incremento de carga se mantuvo por un periodo de tiempo de 20 minutos antes de aplicar el siguiente incremento de carga. Se intentó realizar un número de incrementos de carga del orden de 15, lo cual fue prácticamente logrado en todos los ensayos.

El procedimiento para evaluar K_o consistió primero en aplicar una carga isótropa hasta una presión de cámara de $\sigma'_o = 1 \text{ kg/cm}^2$. Luego, en forma incremental se procedió a aumentar simultáneamente la carga vertical neta y la carga horizontal, con la restricción de mantener nula la deformación horizontal de la probeta. Esto último fue verificado durante el ensayo a través de un cinturón de medición del cambio de perímetro de la probeta. El aumento de presión horizontal se llevó a efecto hasta alcanzar $\sigma'_o = 8 \text{ kg/cm}^2$, y de ahí se procedió con un ensayo triaxial drenado convencional, manteniendo constante la presión de cámara y aumentando la sollicitación vertical hasta alcanzar la rotura de cada probeta.

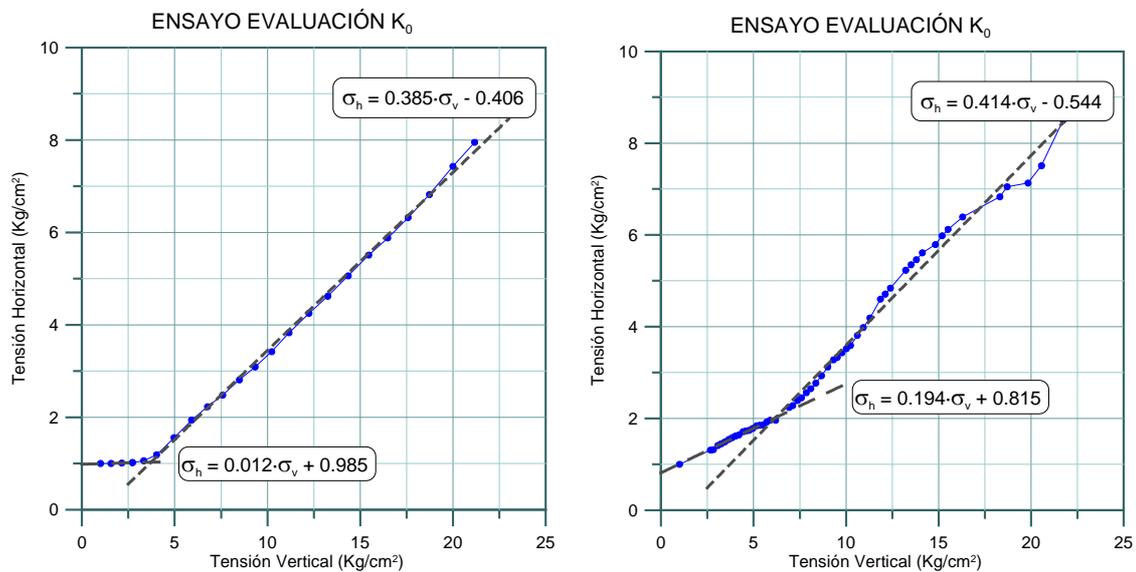
Los resultados obtenidos de los ensayos para estimar K_o se presentan en la Fig. 11, en términos de las tensiones verticales y horizontales aplicadas bajo la condición de nula deformación horizontal. En ambos casos se observa un significativo cambio de pendiente en torno a una presión vertical de 37 y 62 t/m^2 , para la grava de Tobalaba y el aluvial de Pte. Alto, respectivamente. Este nivel de presión se estima está asociado a la carga de pre-consolidación del terreno en su estado actual. En el caso de la grava de Tobalaba, la profundidad a la cual fue tomada la muestra ensayada es de 17.7 m (calculada desde la superficie del terreno hasta la altura media de la probeta). Si se considera un terreno con una densidad húmeda promedio de $\gamma_m = 2.1 \text{ t/m}^2$, es posible estimar una presión vertical in-situ



sobre la probeta de 37 t/m^2 , la cual coincide con la presión vertical de quiebre del ensayo K_0 , indicando que se trata de un suelo normalmente consolidado. Por otra parte, en el suelo aluvional de Pte. Alto la presión vertical in-situ sobre la probeta se estima en 36 t/m^2 , valor inferior al deducido del ensayo K_0 , con lo cual es posible señalar que dicho depósito se encuentra con una razón de pre-consolidado de $62/36 = 1.7$.

Directamente de las mediciones del ensayo K_0 (Fig. 11) se pueden establecer para la Grava de Tobaba un valor de $K_0 = 0.39$ y un valor de $K_0 = 0.57$ para el aluvial de Pte. Alto al estado presente de tensiones. Este último valor disminuiría a $K_0 = 0.41$, para una situación de aumento de carga hasta una condición de normalmente consolidado.

Por otra parte, los ensayos triaxiales CID sumados al ensayo K_0 llevado posteriormente a rotura con una presión de confinamiento de 8 kg/cm^2 , permitieron establecer la envolvente de falla de ambos materiales. En la Fig. 12 se presentan las trayectorias de tensiones de los ensayos realizados en la grava de Tobalaba y la correspondiente envolvente de falla definida por los tres ensayos realizados.



Los parámetros de resistencia al corte obtenidos de estos resultados son:

Cohesión: $c = \text{nula}$
Angulo de Fricción Interna: $\phi = 45^\circ$

Resulta importante señalar que una serie de ensayos triaxiales in-situ llevada a cabo en 1978 (Kort et al. 1978; 1979) con presiones de confinamiento en el rango de $0.22 - 0.84 \text{ kg/cm}^2$, resultó con una envolvente superior a la obtenida en este estudio. Esta diferencia es posible de explicar primero por el mayor rango de presiones utilizada en el presente estudio (1 a 8 kg/cm^2), además, la densidad seca de la grava de Tobalaba es 1.95 t/m^3 , mientras que la grava ensayada anteriormente fue 2.1 t/m^3 . También se suma el hecho que el contenido de finos de la grava de Tobalaba es 6% , mientras que la grava ensayada anteriormente era 3% . Un último factor relevante para esta diferencia tiene relación con la humedad natural de la grava de Tobalaba, 8% , versus un 3% de la grava ensayada anteriormente.

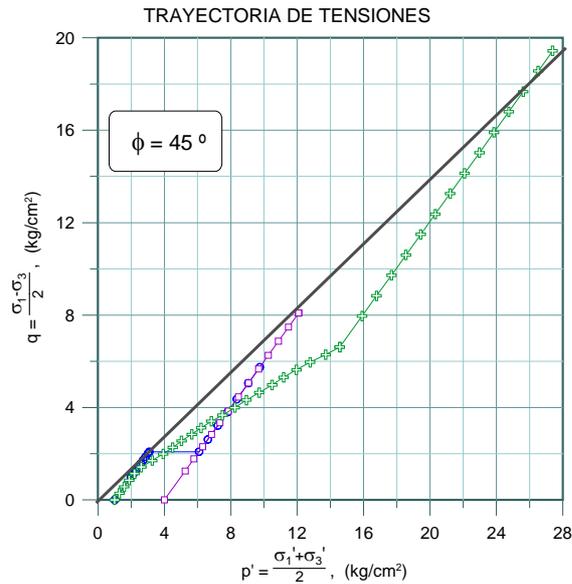


Fig. 12.- Trayectorias de tensiones y envolvente de falla. Grava de Tobalaba

Los resultados obtenidos en el aluvional de Puente Alto se presentan en la Fig. 13, en términos de trayectorias de tensiones y la correspondiente envolvente de falla definida por los tres ensayos realizados.

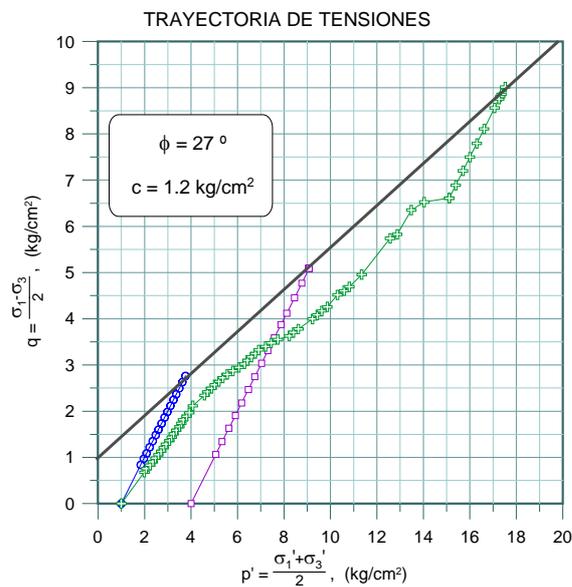


Fig. 13.- Trayectorias de tensiones y envolvente de falla. Aluvional Puente Alto.

Estos resultados permiten establecer los siguientes parámetros de resistencia al corte del aluvional de Puente Alto:

Cohesión: $c = 12 \text{ t/m}^2$
 Angulo de Fricción Interna: $\phi = 27^\circ$

6. CONCLUSIONES. Entre las principales conclusiones de este artículo es posible señalar las siguientes:



- El equipo triaxial a gran escala diseñado y construido en IDIEM permite ensayar materiales gruesos con tamaño máximo de partícula de hasta 7". Es posible la ejecución de ensayos tipo UU, CID, CIU, consolidación Ko, y en general, con cualquier trayectoria de tensiones que se requiera.
- En materiales granulares gruesos con un contenido de finos tan bajo como un 6% resulta posible la extracción de probetas "inalteradas" y su traslado al laboratorio para su ensayo en el equipo triaxial de gran escala.
- El equipo triaxial de gran escala permitió evaluar el coeficiente de empuje en reposo de la grava extraída de la estación Tobalaba ($K_o = 0.39$) y del grueso aluvional de Puente Alto ($K_o = 0.57$). En el caso de la grava de Tobalaba resultó evidente que se trata de un material sin pre carga geológica anterior. Sin embargo, en el caso del aluvional de Puente Alto fue posible establecer una condición de preconsolidación.
- Parámetros de resistencia al corte, $c = 0$; $\phi = 45^\circ$ y $c = 12 \text{ t/m}^2$; $\phi = 27^\circ$ se establecieron para la grava de Tobalaba y el aluvional de Puente Alto.

AGRADECIMIENTOS. Los autores desean agradecer al IDIEM de la Universidad de Chile por todo el apoyo brindado en el desarrollo del triaxial de gran escala. También se agradece al personal técnico de IDIEM que colaboró eficientemente en el diseño y construcción de este equipo, especialmente al señor Mario Vásquez G.

REFERENCIAS

- De la Hoz, K. (2007): "Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos," Tesis de Magíster en Ingeniería Geotécnica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Fragaszy, R., Su, W., Siddiqi, F. and Ho, C. (1992): "Modeling strength sandy gravel," Journal of Geotechnical Engineering, 118(6), pp. 920-935.
- Kort, I. (1978): "Ensayos triaxiales in-situ en la grava de Santiago", Informe Geotécnico del Ingeniero Issa Kort preparado para la Dirección General de Metro, DGOP-MOP.
- Kort, I., Musante H. and Fahrenkrog (1979): "Mediciones en sitio de propiedades mecánicas de la grava para modelos de interacción y cimentación del Metro de Santiago", 6ta Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Vol. II, Lima.
- Verdugo, R., Gesche, R. y De la Hoz, K. (2003): "Metodología de Evaluación de Parámetros de Resistencia al Corte de Suelos Granulares Gruesos," 12th Pan American Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Cambridge, MA, USA, pp. 691-696.