

# Caracterización Geotécnica de Materiales de Lastre en Botaderos de Gran Altura Mediante Ensayos Triaxiales y Odométricos de Gran Tamaño

## Geotechnical Characterization of Waste Material in Very High Dumps with Large Scale Triaxial and Odometer Testing

Carolina Palma S. (1), Sandra Linero M. (2), Reinaldo Apablaza V. (3)

(1) *SRK Consulting Chile S.A.*

(2) *SRK Consulting Chile S.A.*

(3) *Codelco Chile División Andina*

### RESUMEN

La gran minería de cobre en Chile involucra la movilización de grandes cantidades de material de lastre desde los frentes de explotación de los rajos hacia las áreas específicas de botadero. El desafío que enfrentan algunas minas cordilleranas, es el limitado espacio que se dispone para los depósitos de lastre debido a la escarpada topografía de montaña. Por lo anterior, surge la necesidad de diseñar botaderos de gran altura sin precedente en Chile y el mundo.

Usualmente la verificación de estabilidad de los botaderos de lastre no presenta dificultad importante. Sin embargo en el caso de depósitos que pueden llegar a los cientos de metros de altura en la cara, como los que planea la División Andina de Codelco, se hace necesario tener un conocimiento detallado del comportamiento geomecánico del material. Existe poca información acerca de la caracterización de lastres mineros. En general, los estudios de materiales granulares gruesos han sido realizados en relación a la construcción de presas. Los botaderos de lastre, al opuesto que el caso de presas, generalmente son construidos por simple volteo de camiones, donde el material adquiere bajas densidades iniciales. Adicionalmente, las partículas que conforman el material pueden alcanzar tamaños del orden métrico, lo cual no ocurre en el caso de las presas.

A continuación se presenta la investigación y resultados de la caracterización de propiedades geomecánicas del material de lastre de la División Andina de Codelco. En particular, realizaron ensayos de caracterización de partículas, ensayos de resistencia al corte de gran tamaño (triaxial gigante) y ensayos de compresión odométrica de gran tamaño. Lo anterior con el objetivo de simular las condiciones reales de campo, en términos de distribución granulométrica y niveles de presiones esperados.

### ABSTRACT

Large scale, open pit copper mining in Chile, involves the mobilization of large amounts of waste material from the pit to specific areas of dumps. The challenge faced by some mines in the Andean mountain range is the lack of available space for waste dumps given the steepness of the typical mountainous topography. Because of this there is an ever more urgent need to design very high dumps that are unprecedented in Chile and the world.

Usually the verification of the stability of waste dumps does not pose a significant difficulty. However in the case of deposits that can be hundreds of meters high at the face, such as those planned by Codelco's Andina Division, it becomes necessary to have detailed knowledge of the geomechanical behavior of the material. There is little information about the characterization of mining's wastes. In general, the studies in characterization of coarse granulated material have been done in relation to the construction of dams. Waste dumps, as opposed to dams, are generally built simply by overturning truckloads, which produce a low initial density. Additionally, the particles of the material can reach sizes in the order of meters, which do not occur in dam construction.

The investigation and results of the characterization of the geomechanical properties of the waste material of Codelco's Andina Division is presented. In particular, characterization of the particles tests, large scale shear resistance and odometer tests were carried out in an attempt to simulate the field conditions in terms of grain size distribution of the material and level of the expected loads.

### 1 INTRODUCCIÓN

La gran minería del cobre a rajo abierto en Chile, involucra la movilización de enormes cantidades de materiales estériles, "Lastres". Estos materiales son acarreados desde el rajo y depositados en áreas específicamente preparadas para este fin, configurando botaderos (depósitos de lastre) de grandes dimensiones.

El material estéril está constituido por los fragmentos de rocas producto de la voladura en el frente de extracción (tronadura); partículas de hasta orden métrico no son escasas dentro del material. Típicamente, los depósitos de estéril son conformados mediante el volteo desde camiones. Por lo tanto, los taludes quedan configurados al ángulo de reposo del material, sin que se imparta ninguna compactación al cuerpo del depósito.

Entre los factores que afectan la estabilidad de estos depósitos se cuentan la pendiente de la fundación, el grado de confinamiento, las condiciones del material de fundación, las propiedades de resistencia de los materiales constitutivos, las condiciones freáticas y las cargas dinámicas en caso de sismo.

La verificación de la estabilidad de los depósitos de estéril no representa usualmente mayor dificultad, dada la naturaleza del material, fundamentalmente granular y con escasos finos no plásticos. Sin embargo, en algunas circunstancias resulta necesario un estudio detallado para la ejecución de los diseños. Esto ocurre, por ejemplo, para depósitos fundados sobre suelos de menor resistencia que el material constitutivo, depósitos sometidos a filtración de aguas, y depósitos de gran altura. Este último es el caso de los Depósitos de Estéril que planea construir División Andina de Codelco.

División Andina de Codelco (DAC) tiene sus minas sobre la cordillera de Los Andes a ochenta kilómetros al noreste de Santiago de Chile, entre 3.700 y 4.200 metros sobre el nivel del mar. Su producto final es concentrado de cobre.

La operación de División Andina (DAC) involucra actualmente el procesamiento de 72.000 toneladas por día, tpd. De sus minas de rajo abierto se movilizan anualmente cerca de 13 millones de toneladas de material de lastre. División Andina estudia en la actualidad el proyecto Nueva Andina, que busca llevar a la división, en la próxima década, a tratar 230.000 tpd de materiales, lo que constituye un salto substancial en su operación.

Uno de los mayores desafíos que enfrenta DAC es el relacionado con lo escarpado del terreno y la escasa disponibilidad de espacio para la conformación de los depósitos de lastre necesarios para sus proyectos de expansión.

Es por lo anterior que los depósitos previstos para los Proyectos de Expansión, serán enormes estructuras, algunas de las cuales que llegarán a almacenar más de 1000 millones de toneladas de material y a superar los 900 m de altura frontal, careciendo así de precedentes en Chile y en el mundo.

A continuación se presentan los trabajos efectuados para la caracterización del material de lastre de Andina, con miras a la ejecución de diseños geotécnicos de los depósitos; se discuten los resultados obtenidos y las limitaciones encontradas.

El estudio ameritó el ensayo de probetas de grandes dimensiones buscando simular, en la medida de lo posible, las condiciones esperadas en el terreno, que se caracterizan por involucrar un material con partículas de tamaños considerables que estarán sometidas a cargas de varios cientos de toneladas por metro cuadrado.

Los resultados aquí presentados constituyen una referencia útil para otros proyectos, dadas las escasas experiencias en la literatura en torno a caracterización de materiales estériles de mina y más aun, con base en ensayos con probetas de grandes dimensiones.

## 2 ENSAYOS REALIZADOS

El plan de ensayos incluyó el estudio de 2 materiales del tipo granodiorita (muestra 1) y pórfidos (muestra 2) respectivamente, donde se estudió la granulometría de las muestra integrales originales, la ejecución de pruebas índice para caracterización de los granos que constituyen los materiales, la evaluación de la resistencia característica de sus partículas, la evaluación de la resistencia al corte y deformabilidad de la muestra en ensayo triaxial gigante con probetas de 2,0 m de altura y 1,0 m de diámetro y la evaluación del comportamiento en compresión unidimensional (odómetros) y permeabilidad. Adicionalmente, se evaluó el fenómeno de rotura de partículas generado por el corte triaxial y por la compresión odométrica.

### 2.1 Macrogranulometrías

La determinación de la distribución granulométrica de cada material de lastre se efectuó sobre una muestra integral (macrogranulometría). El tamaño de cada muestra de material fue de 50 toneladas, la que fue recobrada directamente del frente de explotación con el fin de evitar en lo posible el re-manejo de muestra que pudiera conducir a la pérdida, en especial, de partículas de la fracción más fina

### 2.2 Pruebas índice

Para el proyecto, se caracterizó la resistencia de las partículas mediante ensayos de Compresión Simple sobre núcleos de roca, ensayos de Carga Puntual sobre partículas de la muestra, ensayos de Desgaste Los Ángeles, de Solidez al Sulfato de sodio y de Gravedad Específica de los Sólidos

### 2.3 Resistencia al Corte

Para evaluar la resistencia al corte se utilizó el equipo triaxial gigante disponible en el laboratorio de la Universidad de Chile.

Para la muestra 1, se efectuaron 4 ensayos triaxiales CID gigantes en probetas de 2 m de altura y 1 m de diámetro. Las probetas fueron construidas a una densidad seca de  $19 \text{ kN/m}^3$  y saturadas completamente antes de iniciar los ensayos. La densidad indicada corresponde a una compacidad “suelta” del material y puede representar la que éste adquiere al ser vertido mediante volteo desde camiones. La conformación de la probeta se efectuó con una muestra escalada, con granulometría homotética a la granulometría de la muestra integral y tamaño máximo de partículas de 6 pulgadas. Las probetas fueron consolidadas isotrópicamente y ensayadas con carga controlada a presiones de confinamiento de 0,8 MPa, 1,5 MPa, 2,0 MPa y 2,5 MPa.

Para la muestra 2, las probetas fueron construidas a una densidad seca de  $18,5 \text{ kN/m}^3$ , y fueron consolidadas isotrópicamente y ensayadas con carga controlada a presiones de confinamiento de 1,0 MPa, 1,5 MPa, 2,0 MPa y 2,5 MPa



Figura 1: Montaje de la Probeta en la Cámara Triaxial

### 2.4 Compresión Unidimensional en Odómetro

Se realizó un ensayo de compresión unidimensional de gran tamaño, en molde de 1 m de diámetro y 0,5 m de altura, para las 2 muestras en estudio. La conformación de las probetas se efectuó con una muestra escalada, con granulometría homotética a la granulometría de la muestra integral y tamaño máximo de partículas de 6 pulgadas. La densidad de confección de la probeta Muestra 1 fue de  $19 \text{ kN/m}^3$ , mientras que para la Muestra 2 la probeta fue confeccionada a una densidad seca de  $18,5 \text{ kN/m}^3$ . Los ensayos fueron realizados para una carga vertical máxima teórica de 12 MPa, y posterior a cada ensayo se realizó un ensayo de permeabilidad aplicando la carga máxima indicada.

### 2.5 Evaluación Rotura de Granos

Para evaluar la rotura de granos se determinaron las distribuciones granulométricas del material de cada una de las probetas falladas en compresión triaxial. La comparación entre estas curvas y la correspondiente al material de configuración de las probetas permitió evidenciar los cambios de granulometría como consecuencia del corte triaxial.

Adicionalmente, para cada muestra, se determinó la granulometría post-ensayo odométrico, de manera de estudiar el fenómeno de rotura de granos en una condición de carga más real para el botadero.

### 3 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

El material de Lastre Muestra 1, está constituido principalmente por material granodioritas de resistencia características UCS del orden de 120 MPa, mientras que la Muestra 2 está constituida principalmente por Porfidos de resistencia característica UCS de 130 MPa. En ambos casos los granos que constituyen el material resultan ser duros y resistentes, presentando pérdidas del orden menores a 18 % en la máquina de Los Ángeles y menores a 0,5% por efecto del sulfato de sodio.

Para la realización de ensayos gigantes, las muestras fueron escaladas homotéticamente a un tamaño máximo de 6". La granulometría homotética (paralela en escala logarítmica de tamaño) permite mantener la secuencia de tamaños de partículas de la muestra original, generando una muestra con un cambio de escala geométrica. (Lee 1986, Verdugo 2003).

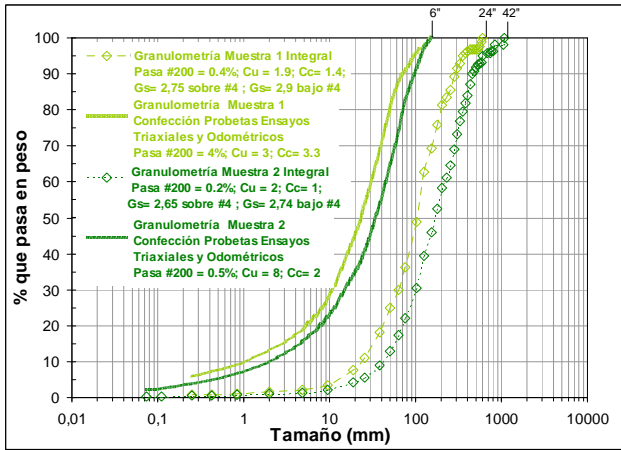


Figura 2: Granulometría Muestras 1 y 2, Integral y Homotética.

### 4 RESULTADOS

#### 4.1 Ensayos Triaxiales Gigantes

Los resultados de los ensayos triaxiales se resumen en las Tablas 1 y 2, para los materiales Muestra 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1: Resultados Triaxiales Muestra 1

Muestra	En la Falla						
	$\epsilon_i$	$\sigma_3$ MPa	$\sigma_1/\sigma_3$ máx.	$\phi_0$ °	$\epsilon_a$ %	$\epsilon_v$ %	Bg
1	0,39	0,8	4,14	37	14,7	-9,178	13
	0,36	1,5	4,79	40	14,8	-8,581	14
	0,33	2,0	4,49	40	15,3	-9,274	18
	0,33	2,5	4,75	40	14,9	-8,914	19

Tabla 2: Resultados Triaxiales Muestra 2

Muestra	En la Falla						
	$\epsilon_i$	$\sigma_3$ MPa	$\sigma_1/\sigma_3$ máx.	$\phi_0$ °	$\epsilon_a$ %	$\epsilon_v$ %	Bg
2	0,37	1,0	6,37	46	15,6	-7,952	19
	0,35	1,5	5,55	43	14,9	-7,896	21
	0,33	2,0	5,68	44	15,2	-8,429	25
	0,32	2,5	5,38	42	14,5	-8,993	27

Nota:  $\epsilon_i$ =Relación de Vacíos Inicial Después de Consolidación Isotrópica;  $\sigma_3$ =Presión Confinante;  $\sigma_1/\sigma_3$  = Relación de Esfuerzos Principales;  $\phi_0$  = Ángulo de Fricción al Origen (considerando cohesión nula);  $\epsilon_a$  = Deformación Axial;  $\epsilon_v$  = Deformación Volumétrica. Signos convencionales para deformaciones: (-) compresión, (+) expansión; Bg Parámetro de Rotura de Granos de Marsal.

Las envolventes de falla mostraron una curvatura, denotando que la resistencia al esfuerzo cortante no es una función lineal de la presión normal aplicada.

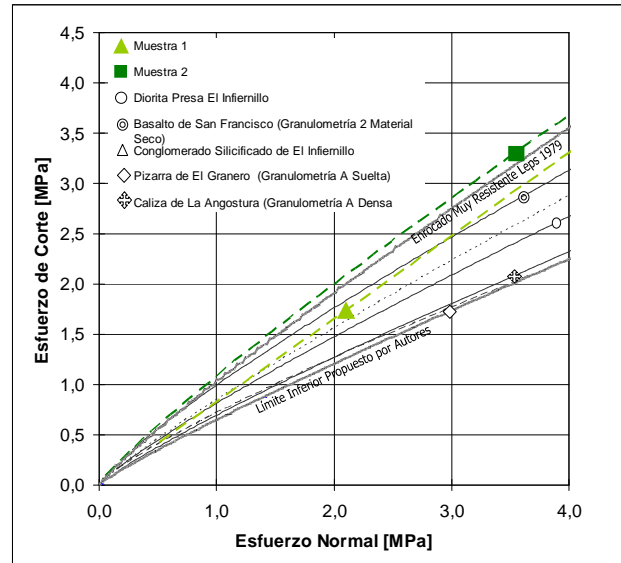


Figura 4: Envolvente de Resistencia al Corte Material Lastre Andina y Comparación con Envolventes Otros Materiales de Cantera y Angulares

De lo anterior se establece la típica reducción del ángulo de fricción interna con el aumento de la presión confinante. En la siguiente figura se presenta esta relación y se comparan los resultados con otros resultados publicados en la literatura técnica, que corresponden a materiales de cantera, angulares, ensayados en probetas de 1 m<sup>2</sup> de sección transversal (Marsal 1980).

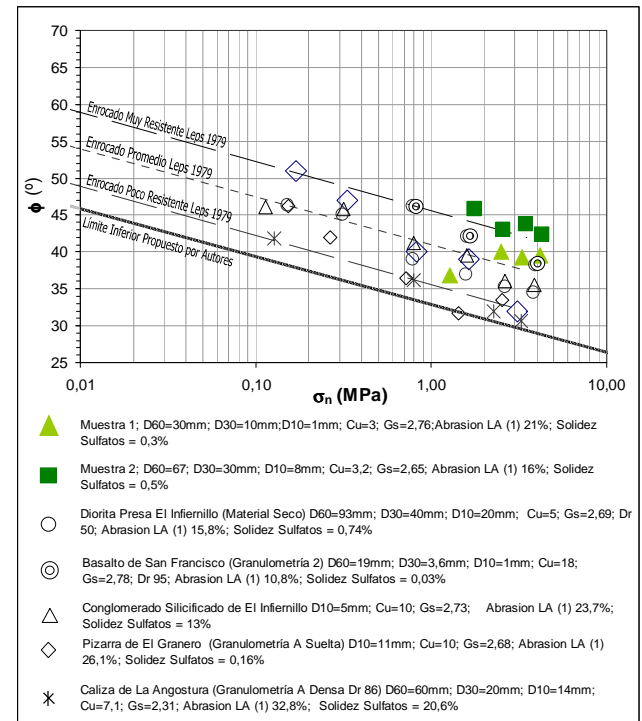


Figura 4: Variación del Ángulo de Fricción Interna con el Esfuerzo Normal y Comparación con Resultados de Otros Materiales de Cantera y Angulares.

#### 4.2 Ensayos Odométricos Gigantes

Los resultados de los ensayos odométricos se resumen en la siguiente tabla, donde se incluyen los 2 materiales estudiados.

Muestra	$e_i$	$\sigma_v$	$\varepsilon_a$	Cc1	$\sigma_{vp}$	Cc2	$\lambda$	$\Delta\varepsilon_{a\ sat}$	k
	[MPa]	%	[MPa]	[MPa]	%	[cm/s]			
1	0,46	12,5	15,3	0,04	1,0	0,14	0,002	0,7	5E-02
2	0,43	12,1	15	0,03	1,0	0,15	0,0014	1,0	1E-02

Notas:

1)  $e_i$  = Índice de huecos previo a ensayo (confección); 2)  $\sigma_v$  = presión vertical aplicada; 3)  $\varepsilon_a$  = Deformación Axial asociada a la carga máxima; 4) Cc1 = Pendiente inicial de la recta  $e - \log \sigma_v$ , antes del punto  $\sigma_{vp}$ ; 5)  $\sigma_{vp}$  = Presión a la cual se produce el quiebre de pendientes en la etapa de carga en la recta  $e - \log \sigma_v$ ; 6) Cc2 = Pendiente de la recta  $e - \log \sigma_v$ , después del punto  $\sigma_{vp}$ ; 7)  $\lambda$  = coeficiente de creep = Pendiente de la recta  $e - \log T$ , durante la etapa de creep (Tiempo en minutos); 8)  $\Delta\varepsilon_{a\ sat}$  = Variación de la deformación unitaria producto de la saturación de la muestra, bajo carga máxima; 9) k = Coeficiente de permeabilidad medido en equipo odométrico.

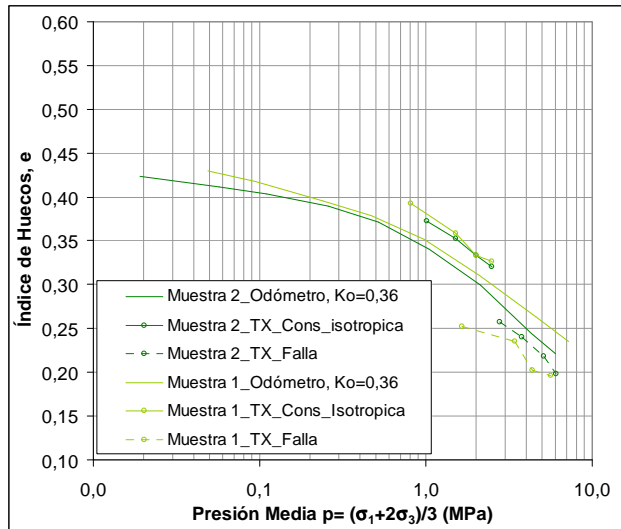


Figura 5: Índice de Huecos vs. Presión Media. Ensayos Triaxiales CID y de Compresión Unidimensional Adoptando  $K_0 = 0,36$ .

#### 4.3 Rotura de Partículas

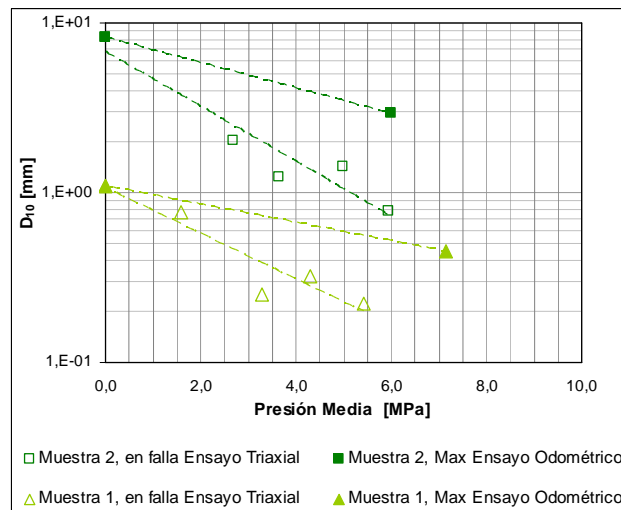


Figura 6: Variación del  $D_{10}$  con la Presión Media

Las características de esta tendencia podrían ser adoptadas para predecir a partir de la granulometría del material in situ, la disminución del  $D_{10}$  ante las presiones esperadas, como una manera de predecir la severidad de los cambios de permeabilidad en forma cualitativa.

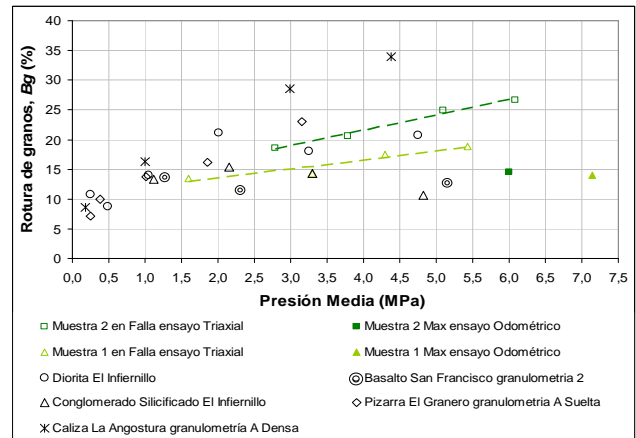


Figura 7: Evolución de la Rotura de Granos en los Materiales estudiados y en los Materiales de Referencia Ensayados por Marsal.

#### CONCLUSIONES

Los materiales investigados presentan una moderada a alta resistencia al corte, si se les compara con otros investigados de manera similar, y reportados en la literatura técnica. En general, se enmarcan entre el material de Diorita de El Infiernillo y el Basalto de San Francisco (ambos materiales de granos duros provenientes de rocas ígneas) reportados por Marsal (Referencia 5). En los ensayos de compresión unidimensional se observaron deformaciones unitarias máximas cercanas a 15%.

#### REFERENCIAS

Charles, J. A. and Watts, K. S. "The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill", (1980): *Geotechnique* 30, No 4, 353-367.

Lee, Y. (1986): "Strength and Deformation Characteristic of Rockfill" Ph.D. Thesis, Asian Institute of Technology

Leps, T. (1970): "Review of Shearing Strength of Rockfill", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE. Vol. 96, SM4, pp. 1159-1170.

Linero, S., Palma, C. y Apablaza, R. (2007) "Geotechnical Characterization of Waste Material in Very High Dumps with Large Scale Triaxial Testing", *International Symposium on Rock Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Australia.

Marsal, R (1973): "Mechanical Properties of Rockfill", *Embankment Dam Engineering*, (Casagrande Volume), pp. 109-200. John Wiley & Sons.

Marsal, Raul J. y Daniel Resendiz Nuñez. "Presas de Tierra y Enrocamiento", (1975): Editorial Limusa, México.

Marsal, Raul J. (1980). "Contribuciones a la Mecánica de Medios Granulares - Selección de Trabajos", *Comisión Federal de Electricidad, Primera Edición, México*.

Verdugo R., Gesche S. y De La Hoz, K. (2003): "Metodología de Evaluación de Parámetros de Resistencia al Corte de Suelos Gruesos," *XII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, USA.