
ANISOTROPÍA DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA AL CORTE DE ARENAS

STRESS ANISOTROPY AND SHEAR STRENGTH OF SANDS

Fecha de Recepción: 21 de junio de 2006

Fecha de Aprobación: 31 de julio de 2006

Javier Fernando Camacho Tauta¹

Oscar Javier Reyes Ortiz²

Andrés Nieto Leal³

RESUMEN

La historia de esfuerzos tiene influencia sobre el comportamiento y la resistencia de los suelos. De particular interés es la condición anisotrópica de esfuerzos en que se presentan la mayoría de los suelos en condiciones naturales. Esta condición produce una disposición de las partículas que hace que las propiedades mecánicas tales como la rigidez inicial o la resistencia al corte se vean afectadas.

Se desarrollaron ensayos de laboratorio para estudiar de qué forma se pueden relacionar las condiciones de anisotropía inducida por esfuerzos, sobre los parámetros de resistencia en arenas. Se utilizó arena limpia y se controló cuidadosamente la distribución granulométrica y la densidad relativa de cada espécimen, el cual se sometió a una combinación preestablecida de esfuerzos bajo condiciones drenadas. Finalmente cada probeta fue llevada a la falla para obtener los parámetros de resistencia al corte. Los resultados obtenidos muestran variaciones hasta del 10% en el ángulo de fricción interna, dependiendo de la densidad relativa del material y se observaron efectos negativos, especialmente en arenas mal gradadas de densidad relativa media.

Palabras claves: *Anisotropía, resistencia al corte, trayectorias de esfuerzo, ángulo de fricción interna*

ABSTRACT

Stress history influences the behavior and strength of soils. Stress anisotropy of actual soils in natural conditions produces an arrange of grains, which modifies mechanical properties such as stiffness and shear strength.

Laboratory tests were carried out to study the relationship between stress anisotropy and shear parameters of sands. Clean sand with controlled grain size distribution and relative density was used to conform each specimen, which was put under a predetermined effective stress combination. Finally, each specimen was conducted to failure, in order to obtain the shear strength parameters. Obtained results show variations until ten percent in the angle of internal friction, depending on relative density, as well negative effects, specially in uniform sands (SP) having medium relative density.

Keywords: *Anisotropy, shear strength, stress path, internal friction angle*

¹ Ing. Civil, MSc. Profesor Asistente Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. Estudiante de Doctorado Universidad Técnica de Lisboa. jcamacho@umng.edu.co

² Ing. Civil, MSc. Profesor Asistente Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. Estudiante de Doctorado Universidad Politécnica de Cataluña. oreyes@umng.edu.co

³ Ing. Civil, Joven Investigador Universidad Militar Nueva Granada-Colciencias. andres.nieto@umng.edu.co

I. INTRODUCCIÓN

El suelo está conformado por partículas sólidas, agua y aire contenidos en los espacios intersticiales, por lo tanto su naturaleza no es continua, por el contrario está conformado por partículas discretas que varían en tamaño, desde gravas hasta arcillas. Además debe tenerse en cuenta que esta composición puede variar de un sitio a otro y la distribución puede tener alguna dirección predominante.

En general, todos los materiales particulados son anisotrópicos, esto hace que la respuesta a un nivel de esfuerzo dado, dependa de la orientación de aplicación de estos esfuerzos. Por esta razón este es uno de los aspectos fundamentales que deben ser tenido en cuenta para comprender mejor a los materiales granulares (Oda, 1993).

Si la distribución y la forma de las partículas de una masa de material son independientes de la dirección en la que se analice, se puede esperar que este material tenga el mismo comportamiento mecánico, sin importar la dirección en la que se estudien sus propiedades. Esto simplifica mucho el análisis de este tipo de materiales dado que se requiere un menor número de variables para caracterizarlos y por lo tanto los ensayos son menos complejos. A estos materiales se les conoce como isotrópicos.

El ambiente en que se forman los suelos en la naturaleza, está principalmente afectado por las fuerzas gravitacionales que favorecen la precipitación y depositación de las partículas. Este proceso ocasiona una orientación predominante en las partículas y los vacíos asociados, por lo que el suelo como material compuesto por partículas es

eminentemente anisotrópico, con lo cual la forma como éste responde a un determinado campo de esfuerzos, depende de la orientación de los esfuerzos aplicados (Biarez y Hicher, 1993).

Además de la anisotropía causada por el modo de depositación, la historia de esfuerzos a que se ve sometida la masa de suelo, ocasionados por fuerzas tectónicas, geológicas, hidrometeorológicas o antrópicas, puede aumentar el grado de anisotropía inicial, aumentando por consiguiente las diferencias de comportamiento del suelo, de acuerdo con la dirección en la que se analicen.

En los rellenos artificiales conformados por suelos grueso granulares, compactados mediante cargas dinámicas verticales, a medida que aumenta la densidad relativa, el grado de anisotropía puede llegar a elevarse y por consiguiente el comportamiento mecánico en el sentido vertical diferirá del correspondiente al sentido horizontal. Es necesario conocer la forma en que la anisotropía del suelo incide en el comportamiento mecánico de los mismos, de manera que se pueda tener en cuenta esta condición dentro de los análisis de estabilidad y deformación sobre las estructuras geotécnicas.

II. BASES TEÓRICAS

A. Naturaleza Anisotrópica de los Suelos

Desde el punto de vista del arreglo de las partículas y sus vacíos asociados, la anisotropía se debe a (Oda, 1982):

- a. La distribución de las direcciones tangentes a los contactos entre partículas
- b. La orientación preferencial de los espacios vacíos

c. La orientación preferencial de las partículas

En la Figura 1 se presenta un indicador de anisotropía propuesto por Biarez y Wiendick (Biarez y Hicher, 1993), basado en un diagrama elíptico trazado a partir de vectores proporcionales al número de planos tangentes a los contactos entre partículas, la dirección de cada vector corresponde a la dirección de los planos tangentes que representa.

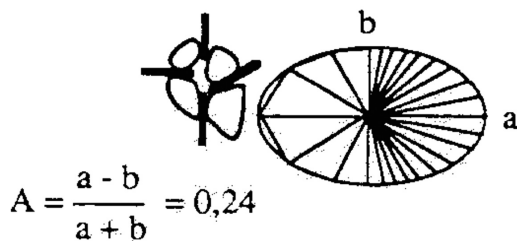


Figura 1. Relación de anisotropía (Biarez, 1993)

Según Casagrande y Carrillo (Oda, 1993), se pueden distinguir dos tipos de anisotropía: inherente e inducida. La anisotropía inherente es producida por la sedimentación natural de las partículas durante el proceso de formación del material. La anisotropía inducida obedece a la acomodación de las partículas como producto de la aplicación de todo tipo de esfuerzos que excedan el límite elástico del material.

Bathurst y Rothenburg (1990), encontraron que la resistencia al esfuerzo cortante de materiales granulares depende de la capacidad del conjunto de desarrollar anisotropía en las orientaciones de los contactos. Los resultados de experimentos numéricos muestran que existe una relación entre el ángulo de fricción a grandes deformaciones y un parámetro que describe el grado límite de anisotropía.

B. Incidencia de las Trayectorias de Esfuerzo en la Anisotropía

Anandarajah et al (1996), presentan una investigación experimental donde se mide la anisotropía mediante conductividad eléctrica, mientras someten muestras de caolinita a consolidación unidimensional (K_0), consolidación anisotrópica ($\sigma_1/\sigma_3 = \text{constante}$) y consolidación isotrópica ($\sigma_1/\sigma_3 = 1$). Las principales conclusiones son las siguientes:

- Una consolidación isotrópica a una presión de consolidación de más de dos veces la presión de consolidación unidimensional inicial, transforma al espécimen isotrópico en lo que tiene que ver con la respuesta en deformación. En tanto que una presión isotrópica de más de diez veces la presión de consolidación unidimensional inicial, es insuficiente para reorganizar las partículas y volver al suelo completamente isotrópico en ese sentido.
- La consolidación anisotrópica en compresión incrementa la anisotropía eléctrica, mientras que la consolidación en extensión disminuye la anisotropía eléctrica.

C. Estado de Esfuerzos in situ

Como producto de los procesos de deposición de los materiales y la resistencia al corte del material, es usual que el esfuerzo vertical, σ'_1 sea diferente al esfuerzo horizontal σ'_3 , de acuerdo con un valor del coeficiente de presión de tierra, K . En este caso el coeficiente de presión de tierras en reposo, K_0 . Este estado de esfuerzos puede también ser repre-

sentado en términos de esfuerzo isotrópico y esfuerzo cortante, mediante la Ecuación 1:

$$\begin{bmatrix} q \\ p' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

La relación de esfuerzos $\eta = q/p'$, tiene relación directa con el coeficiente de presión de tierra, mediante la Ecuación 2

$$\eta = \frac{3(1-K)}{1+2K} \quad (2)$$

Es evidente por tanto que el suelo se encuentra sometido a un estado inicial anisotrópico, inducido por los esfuerzos y que puede expresarse por medio de la relación de esfuerzos, η_i .

Posteriormente esta condición es alterada, cuando las cargas externas exigen a la masa de suelo (por ejemplo: la construcción de una obra a nivel de la superficie del terreno) y eventualmente pueden producir la falla del material. Dependiendo de la ubicación y dirección de la carga en superficie y las condiciones de drenaje, la trayectoria de esfuerzos hasta la falla puede tener variadas direcciones.

En el caso de un punto localizado directamente debajo de la acción de una carga vertical, la trayectoria de esfuerzos efectivos en condiciones drenadas, puede corresponder a la mostrada en la Figura 2, desde el punto I hasta el punto F:

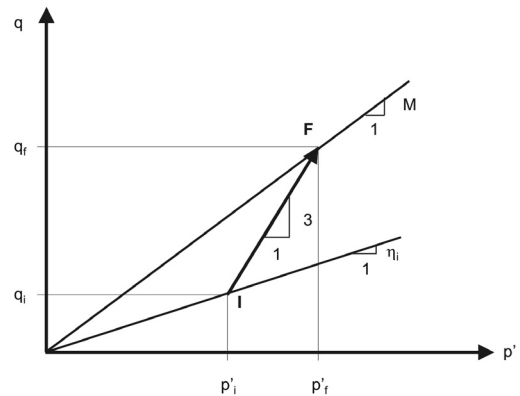


Figura 2. Trayectoria de esfuerzos efectivos en condiciones drenadas, seguida desde una condición inicial I, hasta la falla, para un punto localizado directamente debajo de la acción de una carga vertical

Cuando se obtienen especímenes para propósitos de ensayo en condiciones de esfuerzos triaxiales, se pueden simular las condiciones de esfuerzo inicial en el terreno; sin embargo en la gran mayoría de los casos, esta simulación se limita a aplicar un esfuerzo isotrópico, calculado basándose exclusivamente en el esfuerzo vertical correspondiente a la profundidad de donde fué obtenida la muestra. Para analizar las posibles variaciones en los resultados, como producto de esta diferencia, se propuso llevar a cabo una serie de ensayos triaxiales bajo diferentes condiciones iniciales de esfuerzo, tal como se describe a continuación.

III. METODOLOGÍA

Con el fin de analizar las posibles variaciones en los resultados de los ensayos como producto de la diferencia causada por la simulación al aplicar un esfuerzo isotrópico basado en el esfuerzo vertical a la profundidad de obtención de la muestra

de suelo respectiva, se diseñó un programa de ensayos en laboratorio, consistente en la elaboración de probetas de arena, que fueron sometidas a diferentes combinaciones de esfuerzo triaxial y posteriormente llevadas a la falla para la obtención de los parámetros de resistencia.

Se utilizó arena limpia con dos tipos de granulometría, la primera bien gradada (SW) y la segunda pobremente gradada (SP). En la Figura 3 se observa la curva granulométrica de cada material, la cual fue obtenida utilizando la norma INV E-123. Inicialmente se determinó la densidad seca máxima mediante el ensayo de compactación normal (Norma INV E-141) y la densidad seca mínima, mediante su deposición en condiciones de mínima energía de compactación. En la Figura 4 se presenta la curva de compactación de los dos materiales utilizados. Para la elaboración de cada espécimen se controlaron cuidadosamente la composición granulométrica y el grado de compactación del material, para producir una densidad relativa preestablecida.

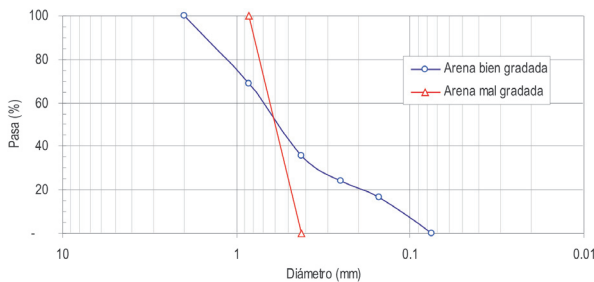


Figura 3. Distribución granulométrica de los materiales utilizados

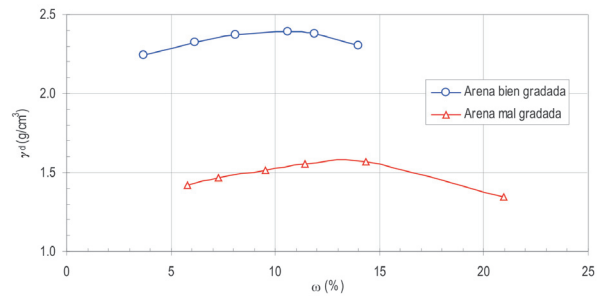


Figura 4. Relación humedad de compactación - Peso unitario seco

Una vez fabricada la probeta en la cámara triaxial, se aplicó una combinación anisotrópica de esfuerzos seleccionada. En la Figura 5 se presentan en forma esquemática las combinaciones de esfuerzo utilizadas. Se observan tres valores de esfuerzo isotrópico, p' y cuatro relaciones de esfuerzo, η . Para llegar a la combinación de esfuerzo deseada, se siguió una trayectoria η constante.

Para cada densidad relativa y tipo de material empleado, fueron elaboradas doce muestras de ensayo, para un total de setenta y dos probetas falladas y analizadas.

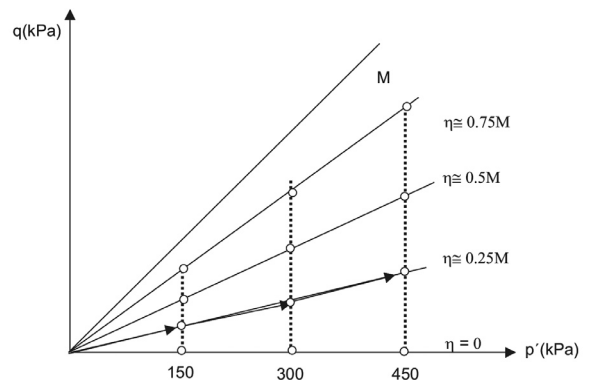


Figura 5. Combinaciones iniciales de esfuerzo para cada probeta

Una vez conseguida la combinación efectiva de esfuerzos seleccionada, se aumentó el esfuerzo desviador hasta alcanzar la falla del material. En la Figura 6 se puede observar el comportamiento de una arena bien gradada (SW) con densidad relativa de 62%, que fue sometida inicialmente a una relación de esfuerzos, η^i equivalente a 0.38 y posteriormente se llevó a la falla. Trayectorias similares a la mostrada, se efectuaron sobre los demás grupos de muestras.

Una vez identificado el estado de falla se calculó el ángulo de fricción interna correspondiente, tal como se muestra en la Figura 7, para el mismo grupo de ensayos triaxiales que se presentan en la Figura 6. Los ángulos de fricción interna para los demás casos se encontraron de manera similar.

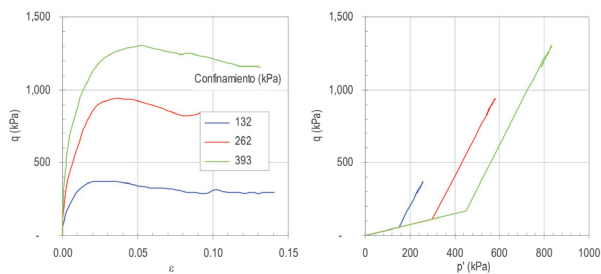


Figura 6. Fase de falla de para un conjunto de ensayos triaxiales realizado sobre muestras de arena bien gradada (SW) con densidad relativa de 62% y relación de esfuerzos inicial de 0.38

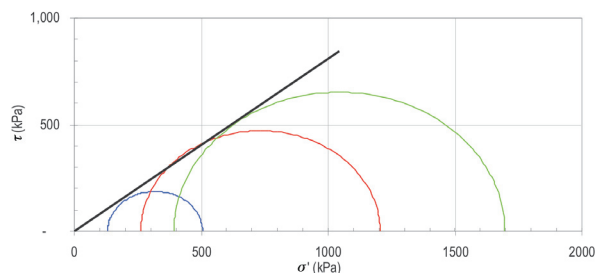


Figura 7. Evaluación del ángulo de fricción interna de muestras de arena bien gradada (SW) con densidad relativa de 62% y relación de esfuerzos inicial de 0.38

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los ensayos realizados a los dos materiales empleados (arena SW y SP) se obtuvieron los resultados para diferentes estados de esfuerzos, densidades relativas y tipo de gradación. Para analizar la influencia de cada factor en la resistencia del material, se presenta a continuación el análisis comparativo correspondiente.

La Figura 8 muestra que para una arena bien gradada (SW), la mayor densidad relativa produce ángulos de fricción interna mayores, independientemente del grado de anisotropía inicial. Se observa que para densidades relativas intermedias, el grado de anisotropía inicial tiende a producir un efecto negativo en la resistencia al corte del material.

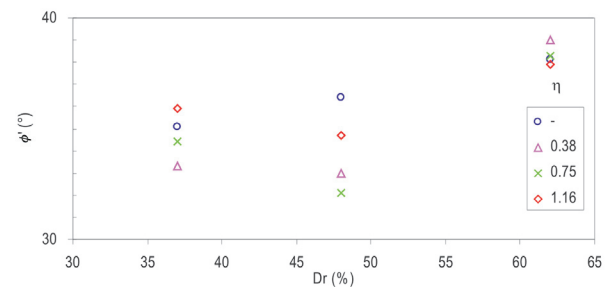


Figura 8. Ángulo de fricción en función de la densidad relativa para diferentes grados de anisotropía aplicada a una arena bien gradada (SW)

En la Figura 9, se muestra para el caso de la arena pobremente gradada (SP) el resultado de la comparación respectiva (Densidad relativa vs ángulo de fricción efectivo). Se destaca la poca variación de la resistencia al corte para bajas densidades relativas, independientemente del grado de anisotropía inicial. El aumento del ángulo de fricción

interna con la densidad relativa no es completamente claro, aunque se evidencia nuevamente tanto para este tipo de arenas (SP) como para el material bien gradado (SW) presentado en la Figura 8 la disminución de la resistencia a densidades relativas intermedias.

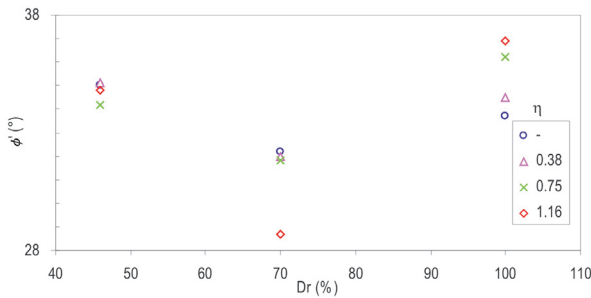


Figura 9. Ángulo de fricción en función de la densidad relativa para diferentes grados de anisotropía aplicada a una arena mal gradada (SP)

A continuación se analizan los resultados obtenidos en los ensayos realizados, comparando ahora la influencia del grado de anisotropía sobre la resistencia del material. Como se observa en la Figura 10 en las arenas bien gradadas (SW) con altos grados de compactación, la resistencia mecánica del material se mantiene prácticamente indiferente con respecto al grado de anisotropía utilizado. Por su parte, para el mismo tipo de material (SW) empleado pero menores grados de compactación, el efecto de la anisotropía es inicialmente perjudicial en la resistencia, al provocar una disminución en el ángulo de fricción interna efectivo del material, aunque en presencia de mayores grados de anisotropía del material, este factor tiende a incidir menos en su resistencia mecánica. Estas variaciones se deben a las variaciones volumétricas ocurridas durante el proceso de falla de las muestras, las cuales en unos casos pueden ser dilatantes y en otras contractantes.

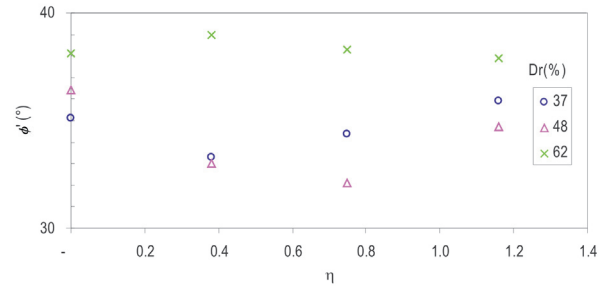


Figura 10. Ángulo de fricción interna efectivo en función del grado de anisotropía para diferentes densidades relativas de una arena bien gradada (SW)

Para observar con mayor claridad el efecto anteriormente indicado, la Figura 11, presenta la variación en el ángulo de fricción efectivo con el grado de anisotropía para el caso de una arena bien gradada (SW), pero normalizando el eje vertical con respecto al ángulo de fricción obtenido bajo condiciones isotrópicas, ϕ'_i

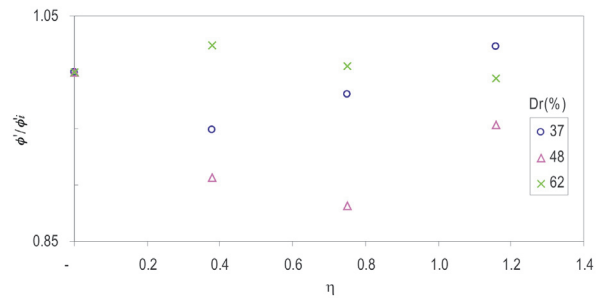


Figura 11. Incremento en el ángulo de fricción en función del grado de anisotropía para diferentes densidades relativas de una arena bien gradada (SW)

Por su parte, en el caso de las arenas mal gradadas (SP), se puede observar (Figuras 12 y 13) que para bajas relaciones de compactación, no se presenta un efecto claro de la anisotropía en la resistencia mecánica del material, ya que cuando el material tiene un grado de compactación medio, la resistencia tiende a bajar con el grado de anisotropía, debido posiblemente a

un comportamiento típicamente contractante, mientras que cuando el material tiene un alto grado de compactación, la resistencia tiende a aumentar con el grado de anisotropía debido a un comportamiento dilatante.

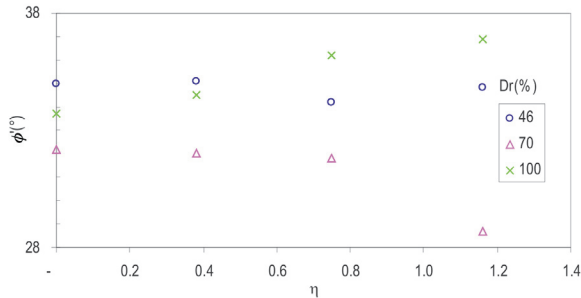


Figura 12. Ángulo de fricción en función del grado de anisotropía para diferentes densidades relativas de una arena mal gradada (SP)

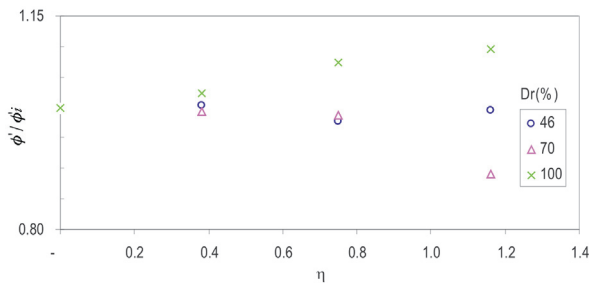


Figura 13. Incremento en el ángulo de fricción en función del grado de anisotropía para diferentes densidades relativas de una arena mal gradada (SP)

V. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de los ensayos realizados, se pudo observar que la resistencia al corte de las arenas empleadas es extremadamente sensible a las condiciones iniciales de esfuerzo, encontrándose variaciones de hasta un 10% en el ángulo de fricción interna efectivo de los materiales (SW y SP) ensayados. Por esta razón es de

gran importancia el establecimiento de las condiciones iniciales en que se encuentra el material en obra, especialmente su grado de anisotropía. La variación de este parámetro podría parecer despreciable, pero es necesario recordar que los factores de capacidad portante que dependen del ángulo de fricción interna, presentan variaciones exponenciales.

Para el caso de las arenas mal gradadas (SP) ensayadas, con una baja relación de compactación empleada, su variación en la resistencia, medida como el ángulo de fricción interna efectivo, es la que menor variaciones presenta, en tanto que las mismas arenas (SP) ensayadas con un grado de compactación medio, presentan una degradación acelerada de la resistencia mecánica, a medida que la anisotropía inicial del material aumenta.

Inconsistencias entre resultados obtenidos mediante ensayos de campo y ensayos de laboratorio sobre muestras reconstituidas, pueden deberse entre otras condiciones a diferencias entre el grado de anisotropía en el sitio y al obtenido en laboratorio. La historia de esfuerzos también juega un papel importante en el comportamiento mecánico del material.

VI. PERSPECTIVA

El análisis de las variaciones volumétricas durante las fases del ensayo, permitirían obtener una mayor comprensión acerca del comportamiento de los materiales, sin embargo, debido a las limitaciones de los equipos utilizados, este aspecto no fue tenido en cuenta para el presente trabajo.

La implementación de instrumentación apropiada para medir variaciones locales, permitirá una

mayor precisión en la medición de variables tan sensibles como el cambio volumétrico, las deformaciones axiales y radiales, lo que se traduce en una mayor certeza en la determinación de los parámetros de resistencia y rigidez del suelo.

VII. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo brindado por los Laboratorios de Ingeniería Civil, el apoyo financiero del proyecto de investigación por parte de la Universidad Militar Nueva Granada, mediante el proyecto ING-2004-002, a Colciencias en el programa Jóvenes Investigadores proyecto ING-JI-2005-001, así como la colaboración de los estudiantes Angélica González y Froilan Colorado quienes participaron en la realización de algunos ensayos reportados en este artículo.

VIII. REFERENCIAS

- [1] Ananadarajah, A., Kuganenthira N., y Zhao D.(1996). "Variation of fabric anisotropy of kaolinite in triaxial loading". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 122(8), 633-640.
- [2] Bathurst, R.J,y Rothenburg, L. (1990). "Observations on stress-force-fabric relationships in idealized granular materials". *Mechanics of Materials*. 9, 65-80.
- [3] Biarez J. y Hicher, P. "Elementary mechanics of soil behaviour". Balkema, Rotterdam, 1993.
- [4] Colorado, F. y Gonzalez, A (2005) "Influencia de la anisotropía inducida en las propiedades mecánicas de las arenas". (Proyecto de grado). Facultad de Ingeniería Universidad Militar Nueva Granada.
- [5] Oda, M. (1993) "Inherent and induced anisotropy in plasticity theory of granular soils". *Mechanics of Materials*. Elsevier, 16. 35-45.
- [6] Oda. M, Nemat-Nasser, S. y Mehrabadi M. (1982). "Statistical study of fabric in a random assembly of spherical granules". *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. Vol. 6., 77-94.
- [7] Zeng X. y Ni B. (1999) "Stress-induced anisotropic Gmax of sands and its measurement". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 125 No. 9. Paper No. 18299.