

ASPECTOS FÍSICO-MECÁNICOS RELATIVOS A LOS SUELOS COLAPSIBLES DE LA FORMACIÓN MOQUEGUA Y SU RELACIÓN CON EL DISEÑO DE OBRAS GEOTÉCNICAS EN EL VALLE DEL RÍO SIGUAS - AREQUIPA

Luis M. Tejada C.⁽¹⁾, Pablo R. Meza A.⁽²⁾ & Lytman S. Jordan G.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Xstrata Tintaya S.A. - Campamento Minero, Espinar, Cusco-Perú

⁽²⁾ Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa – Av. Independencia S/N, Arequipa-Perú
LTejada@xstratacopper.com.pe, PMezaa@unsa.edu.pe, LJordan@xstratacopper.com.pe

INTRODUCCIÓN

El proceso de variación brusca de volumen que ocurre en ciertos tipos de suelos conocidos como colapsibles viene siendo ampliamente estudiado en los últimos años. Esto debido a los serios problemas estructurales que han ocurrido en los macizos de presas, vías rurales y pavimentadas, obras subterráneas, fundaciones y laderas naturales en el valle de Sigüas. En la mecánica de suelos se denominan suelos colapsibles aquellos materiales no saturados, macro porosos e inestables estructuralmente cuando se incrementan esfuerzos externos aplicados y/o cuando son saturados.

Tejada (2004), al hacer la evaluación de estabilidad de dos taludes construidos en la Formación Moquegua, los cuales se consideraban tramos críticos en la carretera Sondor-Pitay en el valle de Sigüas, notó que el factor de seguridad obtenidos indicaban valores mayores a la unidad, lo cual reportaba una incompatibilidad. Con los evidentes signos de inestabilidad, lo cual se verificaba en campo, ya que por lo contrario estos taludes sufrían de desprendimientos. Barreda de la Cruz (2003), reportó que varios tramos de los canales de irrigación de la misma localidad colapsaron por los derrumbes ocurridos en las mismas formaciones geológicas anteriormente descritas.

OBJETIVO

El objetivo es presentar criterios de evaluación, para la obtención de algunas propiedades físicas y mecánicas del conglomerado de gravas existentes en la Fm. Moquegua del Valle del Río Sigüas principalmente aguas arriba del puente de Tambillo hacia la localidad de Pitay, teniendo en cuenta que estos suelos han sufrido mecanismos de falla con características de colapso en sectores donde se han realizado obras viarias, canales de irrigación, etc. El conocimiento de sus propiedades permitirá dar énfasis a la identificación y caracterización de los suelos colapsibles con estructura gravosa (Tejada, 2004) y de esa manera proponer rangos de parámetros geotécnicos para el diseño de obras geotécnicas en la zona de influencia (Sondor - Pitay).

ESTUDIOS ANTERIORES

Gran parte de los valles de Sigüas y Majes están cubiertos por depósitos cuaternarios principalmente las formaciones Sotillo y Moquegua. Debido a la erosión y a las obras de ingeniería constituidas en tales zonas se originaron problemas asociados a estos. Diversos investigadores estudiaron el fenómeno con el fin de brindar soluciones geotécnicas. A pesar de los estudios disponibles en la literatura técnica, el conocimiento de sus principales propiedades (físico, químico, mineralógico, micro morfológica, pedogenética, entre otras) es todavía insuficiente.

Martínez Vargas (1980) indicó la existencia de suelos compuestos por un conglomerado de partículas gruesas (gravas, guijarros y bolones) embebidos dentro de una matriz de partículas menores (arenas, limos y arcillas), que posee un comportamiento colapsible, en ese año, dicho fenómeno no tenía precedentes en el Perú. El mencionado investigador atribuyó al suelo de la formación Sotillo localizada en la escarpa de Pie de Cuesta en el valle del río Vitor, un comportamiento de este tipo ya que originaba deslizamientos desde el año 1974.

Fernández (1997) concluyó las siguientes propiedades en el conglomerado de gravas de la formación Sotillo: suelo no macro poroso ($e=0.1$), estructura bien acomodada ($\gamma=2\text{kg/cm}^2$), baja

humedad ($w=1.5\%$), naturaleza cementada del suelo con concentraciones mayores al 60% de carbonato de sodio y 11% de arcilla montmorillonítica. De esa manera dicho investigador define a la grava colapsible como aquel suelo de naturaleza cementada por sales en estado coloidal y arcillas dispersivas, localizadas en ambientes áridos que poseen alta resistencia al corte en estado natural y que pierde súbitamente para pequeños incrementos de su humedad.

Barreda de la Cruz (2003) reporta que la ocurrencia de un deslizamiento repentino en un tramo del valle de Santa Isabel de Sigüas, afecto al canal de Santa Rita con presencia del suelo de comportamiento no estable ha originado, como antecedente, un deslizamiento repentino que afectó al canal de Santa Rita de Sigüas en su tramo del valle de Santa Isabel de Sigüas. Debiéndose la causa del deslizamiento a las filtraciones de las aguas de regadíos sobre un conglomerado de gravas altamente cementado, con lo cual el autor concluye que estos suelos presentan un comportamiento colapsible. El mencionado autor atribuyó propiedades geofísicas a las capas de suelos colapsibles con valores de resistividad de 1080 Ohmios/m con un espesor de 5.1 metros, constituido por una cubierta que corresponde a los materiales de origen aluvial seco (Formación Moquegua Superior), con presencia de cantos rodados, arenas, limos y arcillas poco consolidadas, con agrietamientos y sin humedad.

Tejada (2004) indica que en tramos críticos inestables de la carretera Sondor – Pitay se presenta suelos colapsibles. Las características que presenta el conglomerado de gravas de la Fm. Moquegua del Valle de Sigüas son las siguientes: estructura no macro porosa (relación de vacíos menor a 0.8), estructura del suelo no mal acomodada ($\rho > 2\text{g/cm}^3$), humedad apreciable con valores promedio de 4.25%, así mismo la naturaleza del suelo es cementada al haberse encontrado altas concentraciones de carbonatos de calcio, arcilla montmorillonítica y sales de sodio en matriz fina. Además granulométricamente está compuesto por gravas pobremente gradadas con bolonerías (GP-GM), pudiendo generalizar que estas gravas colapsibles tienen una fracción fina entre 6%-30% y una fracción gruesa entre el 40% y 60%.

PROCESO DE IDENTIFICACIÓN DEL FENÓMENO

LOCALIZACIÓN

El lugar de estudio se encuentra en ambas márgenes del valle del río Sigüas, distrito de Santa Isabel de Sigüas y distrito de Majes, provincia y departamento de Arequipa.

EL FENÓMENO DEL COLAPSO

Para la Mecánica de Suelos y la Ingeniería de Cimentaciones existen dos grupos de suelos según su comportamiento, los estructuralmente estables, que dependen sólo de sus propiedades intrínsecas y de factores mecánicos; y los estructuralmente inestables que además dependen de otros factores externos al suelo, por ejemplo factores químicos, variaciones ambientales, etc.

En la actualidad se conoce que este fenómeno se ha presentado en todo tipo de obras como carreteras, canales, edificaciones donde se han advertido asentamientos a pesar de que el incremento de carga fuese mínimo, es decir la causa principal no necesariamente es la sobrecarga. Así mismo este fenómeno ha sido inicialmente ligado a suelos de granulometría uniforme relativamente fina tales como arenas, limos, arcillas, loess, con composiciones de arenas limosas (SM), arenas arcillosas (SC), arcillas arenosas o de baja plasticidad (CL), limos arenosos o de baja plasticidad (ML). También se advierte este fenómeno en suelos gruesos como gravas y conglomerados (Rollins, 1994).

Los suelos colapsibles deberán reunir ciertas características como: (i) estructura macro porosa, relación de vacíos (e) relativamente alto considerando un valor crítico de 0.8 (mayor a este valor son susceptibles al colapso), además de poseer una densidad baja y una granulometría predominantemente fina. Esta condición no está satisfecha por el conglomerado de la Fm. Moquegua; (ii) estructura mal acomodada, con partículas de mayor tamaño (no mayor que la arena gruesa) separada por espacios abiertos y unidas entre sí por acumulaciones o puentes de material predominantemente fino, su estructura no es uniforme ya que en algunas zonas existen una mayor densidad de partículas gruesas que en la matriz, en algunos casos sucede lo contrario, siendo esta posiblemente la causa del comportamiento heterogéneo del suelo, en los conglomerados de gravas colapsibles esta estructura puede presentarse en la matriz; (iii) escasa humedad y grado de saturación, por la naturaleza de la zona donde se forman los suelos tienen un bajo contenido de agua, habiendo desarrollado en muchos casos

una presión de poros negativa (succión); (iv) naturaleza cementada, la matriz ligante esta constituida por minerales de carácter cementante tales como sales y sulfatos solubles, los que en el proceso de sedimentación quedaron en estado coloidal y les proporcionan una resistencia aparente muy alta.

LITOESTRATIGRAFÍA ASOCIADA A LOS SUELOS COLAPSIBLES

Relacionado con los suelos colapsibles, en el valle del río Siguas predomina la Formación Moquegua Superior (Ts-mos) que por sus tonalidades claras contrastadas con las rojizas de la Fm. Moquegua Inferior. Por lo general, sus capas tienen posición horizontal y en algunos casos muestran una ligera inclinación al Suroeste. La litología consiste principalmente de conglomerados en matriz arenosa intercalados con areniscas blanco grisáceas, de grano medio a fino, hasta conglomerádicas, con algunas capas de arcilla y conglomerado de pequeños cantos rodados. En los cortes de algunas quebradas cerca al tope de la secuencia, se observan tufos riolíticos blancos, compactos y de grano fino, con una coloración rosada. Esta formación grada en un colchón aluvial conglomerádico en la parte superior y es menos coherente en la superficie, siendo ya un material gravoso suelto.

Estos sedimentos se encuentran distribuidos en ambas márgenes del Valle de Siguas, se puede observar desde Pitay hasta Tambillo. El limite superior y potencia de este miembro de la Fm. Moquegua no es bien definido, pero se puede estimar que es de aproximadamente de 725m en el Valle de Siguas. Posee un potente banco de conglomerados de grano medio con un porcentaje bajo de arcilla, en la parte basal media exhibe un banco de tufo blanco de aproximadamente 20m de espesor.

SUELOS NO SATURADOS Y PRINCIPIOS DEL MECANISMO DE COLAPSO

La Mecánica de Suelos Tradicional está relacionada al tratamiento y solución de problemas geotécnicos ocurridos en suelos saturados. Con el avance y el crecimiento de la sociedad y de varias intervenciones antrópicas en el medio ambiente, nuevos estudios son necesarios para solucionar los problemas que van surgiendo cuanto la diversidad de comportamiento del suelo en diversas partes del mundo. Siendo así, es necesario que haya estudios y tecnologías que permitan evaluar los suelos no saturados, considerando sus características propias, como el origen y su formación de los mismos, bastante influenciadas por el clima local (Fredlund & Rahardjo, 1993). Los climas áridos producen un ambiente en el que la evaporación supera a la precipitación. Durante la precipitación, sólo la parte cercana a la superficie del depósito llega a ser humedecido para que luego empiece a ser secado por el calor, entonces la tensión capilar obliga al agua residual a retirarse a los espacios estrechos cerrados por los granos gruesos del suelo (Figura 1).



Figura 1 - Características de formación del Suelo Colapsible (modificado – Dudley, 1970) y fenomenología del colapso en el valle de Vitor

El agua en su movimiento arrastra partículas finas, elementos de naturaleza ligante generalmente de sales solubles de carbonatos, sulfatos y cloruros, formados por cationes (Ca, Na, Mg) y aniones (CO_3 , SO_4), resultando principalmente carbonatos de calcio (Ca CO_3), carbonatos de sodio (Ca SO_4), carbonatos de magnesio (Mg CO_3), sulfatos y cloruros, donde al saturarse se produce un intercambio de cationes de las sales con los minerales del suelo. Asimismo se encuentran elementos donde se manifiestan fuerzas predominantemente de superficie (floculación), los que al saturarse se dispersan, disminuyendo su concentración de iones.

Una vez seco, el suelo adquiere una gran resistencia a bajas condiciones de humedad, es macro poroso y está susceptible al colapso por su proceso de depositación y post depositación. Existiendo las posibles estructuras mostradas en la Figura 2, combinadas o no. Los granos gruesos o gravas mantienen con las arcillas, limos o arenas un diferentes tipos de contactos (Figura 2) que tienden a la

colapsabilidad. En estos granos, las fuerzas de unión son debidas a las cargas de gravedad, exteriores o capilares. La forma que toman los meniscos hace que el agua de los tubos capilares esté suspendida por las fuerzas de tensión y por lo tanto la presión de poros es negativa, esto origina un aumento de la presión efectiva que une un grano con el otro. Este aumento de la presión efectiva origina un incremento de la resistencia al corte o del deslizamiento. En la saturación esta presión disminuye y con ella la resistencia, produciéndose un reacomodo de los granos y disminución del volumen del suelo.

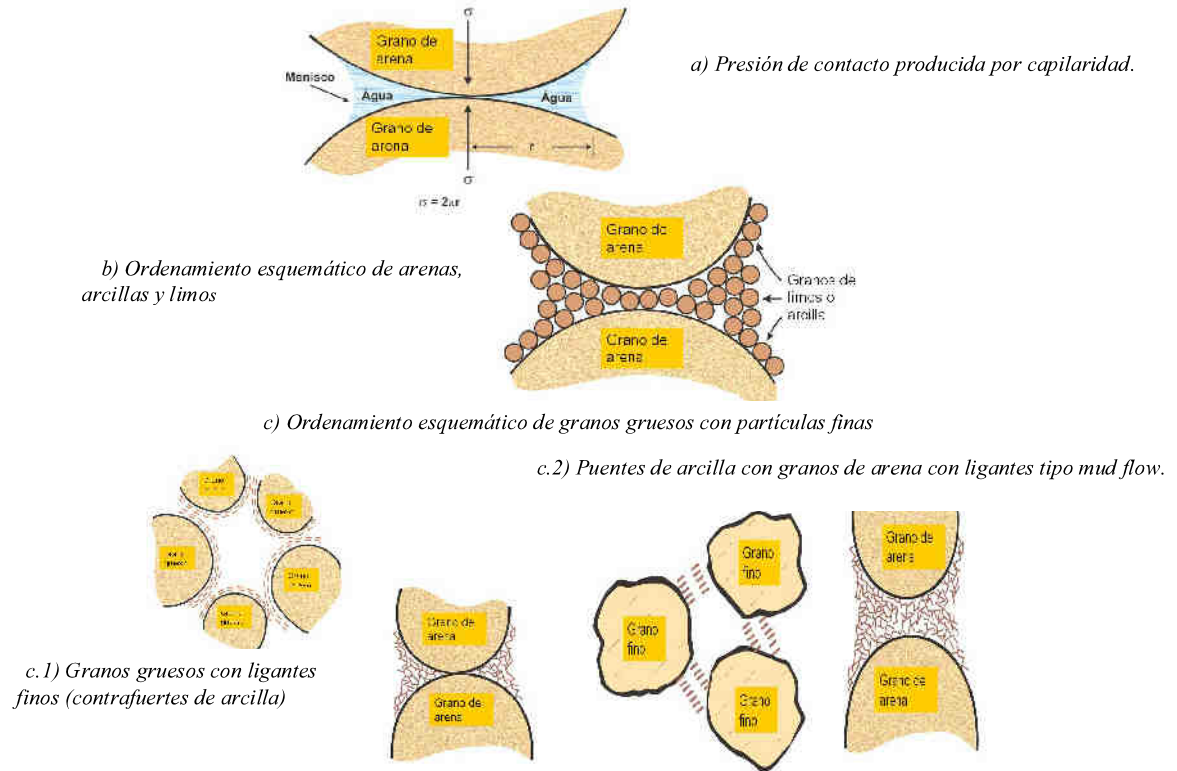


Figura 2 - Estructuras del Suelo Colapsible (modificado – Dudley, 1970)

Este mecanismo de colapso o desmoronamiento puede ampliarse también para aquellos en que el vínculo este dado por partículas de limos (Figura 2a-b). Cuando los granos gruesos están unidos por arcilla (con diversos ordenamientos de acuerdo a su génesis) (Figura 2c) y son humedecidos, cada partícula de arcilla dará origen a la denominada “doble capa” que es producto del equilibrio de su iones y que le proporciona una carga neta negativa; entonces cuando se trata de acercar dos partículas se produce la repulsión de las mismas por efecto de la fuerza eléctrica de Coulomb (Figura 2c.2); pero además existirá otra fuerza de atracción o fuerza de enlace secundario que actúa entre moléculas adyacentes y que es independiente del líquido actuante.

Si la resultante de esas fuerzas es de atracción, ambas partículas tenderán a acercarse produciendo la floculación; y por el contrario si la resultante es de repulsión ambas partículas tratarán de alejarse, produciéndose la dispersión. Como la componente de repulsión depende en gran parte de las características del sistema, mientras que las componente de atracción no está influenciada por las características del mismo, puede provocarse una tendencia a la floculación o dispersión al alterar las características del sistema modificando al espesor de la doble capa. Finalmente, el proceso de colapso o desmoronamiento de las partículas del suelo, puede ser originado modificando las condiciones de estabilidad por la intervención de un agente externo que en este caso es el agua de humedecimiento.

METODOLOGÍA Y ENSAYOS

Fueron realizadas una serie de calicatas en el sector de Tambillo hasta una profundidad máxima de 3m. En las muestras se ejecutaron una batería de ensayos para su caracterización y definición de

propiedades físico mecánicas para que estos resultados aporten a la interpretación de resultados de laboratorio aplicados a los diseños de obras geotécnicas. Se realizaron ensayos de densidad in situ (ASTM 1556) en la parte baja de la carretera, utilizando el cono de arena de 6" (Fig. 3).

Los ensayos se llevaron a cabo de acuerdo a las Normas ASTM: contenido de humedad (ASTM D2216-05), análisis granulométrico (ASTM D422-63), límites de Atterberg (ASTM D4318-05), gravedad específica (ASTM D854-06), peso específico (ASTM D4253-93), densidad máxima y mínima (ASTM D4253-93), corte directo (ASTM D3080-04) y CBR (ASTM D4550-93).



Figura 3 – Ensayo de densidad in situ y apertura de calicatas

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tomando como base las observaciones observadas durante las investigaciones de campo y los resultados de los ensayos de laboratorio de las muestras extraídas de las calicatas, el material colapsado de la Fm. Moquegua y los depósitos coluviales denotan, en conjunto, una granulometría que describe una arena pobremente gradada con limos y arcillas combinadas con fragmentos líticos.

Los suelos heterogéneos muestran colores variados predominando el beige, el gris y el marrón, de baja plasticidad en zonas puntuales con predominancia de suelos que no presentan índices plásticos con un espesor aproximado que alcanzaría la cota original del terreno. El suelo presenta una densidad poco densa a suelta. Las densidades secas in situ obtenidas variaron entre 1.499 gr/cm³ y 1.928 gr/cm³ con contenidos de humedad natural de suelo entre 0.39% y 12.24%.

Las muestras son descritas como gravas pobremente gradadas con bolonerías (GP-GM), pero como en el ensayo no puede juntarse ambas fracciones, por así decirlo se ensayo solamente la matriz fina (arena a arcillas). La caracterización de las muestras se encuentra en la Tabla 1. Los parámetros geotécnicos de cohesión y ángulo de fricción de la masa heterogénea representativa del deslizamiento resultan en los siguientes valores: cohesión de 0 kg/cm² y un ángulo de fricción de 31.2° (Figura 4). La densidad mínima obtenida fue de $e_{min}=1.347\text{g/cm}^3$ y la densidad máxima fue $e_{max}=1.585\text{g/cm}^3$. El CBR representativo, útil para el comportamiento expansivo del suelo, es el definido por la Figura 5.

Tabla 1 – Resultados de los ensayos de caracterización

Calicata	w (%)	Análisis Granulométrico			Límites Atterberg			Peso Unitario gr/cm³	G _s	Densidad		Clasif. S.U.C.S.
		Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)			Minima	Máxima	
										gr/cm³		
M-1	11.2	29.1	46.1	24.8	23	NP	NP	1.417	2.536	1.417	1.611	SM
M-2	2.1	16.1	76.6	7.3	0	NP	NP	1.426	2.456	1.426	1.598	SP-SM
M-3	10.9	0.0	86.1	13.9	0	NP	NP	1.196	2.497	1.196	1.370	SM
M-4	12.2	27.3	66.3	6.4						1.347	1.585	SP-SM

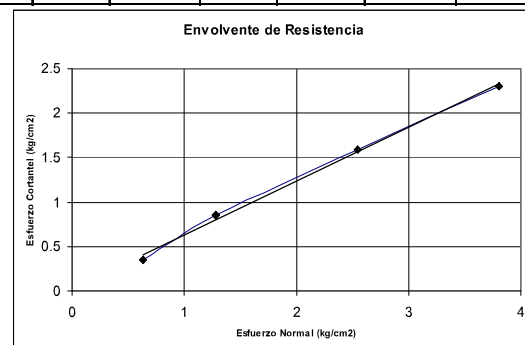
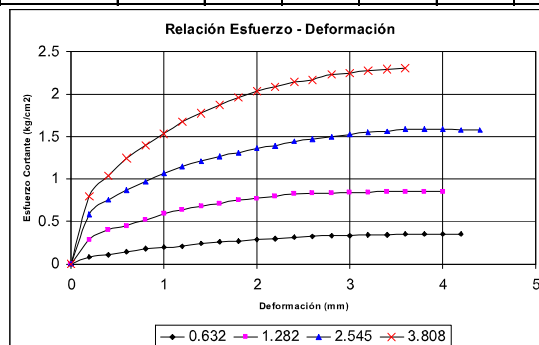


Figura 4 - Resultado del ensayo de corte directo con $c=0\text{kg/cm}^2$ y $\phi=31.2^\circ$ (a) curvas esfuerzo deformación (b) envolvente de resistencia

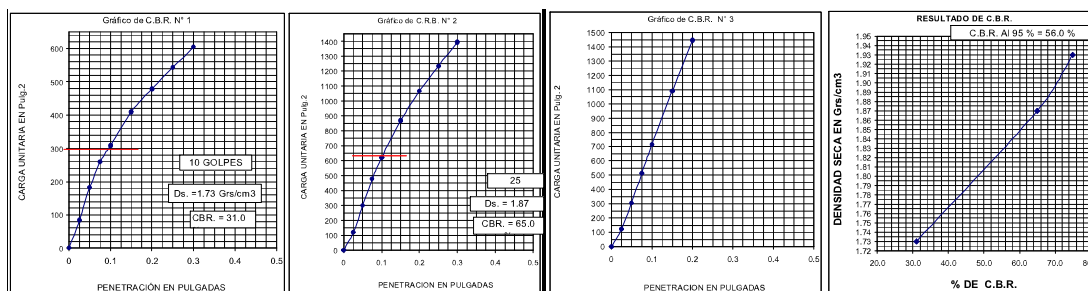


Figura 5 - Resultado representativo del ensayo de CBR

CONSIDERACIONES FINALES

El peso específico volumétrico relativamente alto, muestra que el suelo no es liviano, la presencia de agua en este suelo es apreciable y “e” no supera el 0.1. Durante el cualquier proceso de carga y humedecimiento es posible que no se presenten asentamientos, pero si fallas probables en estructuras diseñadas con cierta inclinación. Se encontró suelo mayor a 3” representan un promedio aproximado del 5.33% del peso total del suelo mientras la porción representada por las gravas y menores alcanzan el 94.67%. Esto no ayudando a una clasificación adecuada del suelo, ya el estándar D422-63 del ASTM sólo considera para tal efecto la porción de suelo con partículas menores a 3”.

La influencia de la forma de los granos en el comportamiento mecánico de suelos gruesos describe un modelo discreto, que determina en forma aproximada la distribución estadística de las fuerzas de contacto que operan entre los granos de la masa de suelo, para lo cual utiliza los siguientes principios básicos: (i) los esfuerzos que actúan en una masa discreta, implica la existencia de fuerzas de contacto entre los granos; (ii) la resistencia al corte es el resultado de la acción de fuerzas friccionantes desarrollados en los contactos granulares, combinada con el efecto de rodamiento de los granos; (iii) las fuerzas de fricción tienen la dirección del movimiento relativo de las partículas; (iv) la deformación es proporcional al incremento de esfuerzo aplicado a la masa dividido por su resistencia friccionante disponible ya que la falla ocurre cuando esta se anula.

Los estándares conocidos para el desarrollo de ensayos de esfuerzo-deformación en laboratorio no contemplan suelos gruesos. Los resultados de los ensayos de compresión no confinada con muestras relativamente grandes son útiles, tomando en cuenta las partículas y mostrando que el suelo gravoso colapsible muestra una alta resistencia en estado seco, demostrando que posee una baja relación de vacíos, cuando son cargados normalmente. Siendo útiles en caso de proyectos o diseños de carreteras, fundaciones o presas. Por el contrario, como se propuso en este artículo, para el caso de diseño de taludes el ensayo de corte directo es el más indicado ya que simularía lo que ocurriría en campo, además que en los parámetros de resistencia serían lo suficientemente conservadores si se carece de una extensa campaña de ensayos, siendo esto útil en la ingeniería práctica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barreda De La Cruz, M. 2003. Estudio Geológico-Geodinámico del Canal de Santa Rita de Siguan en su Tramo de Deslizamiento y la Contaminación del Valle de Santa Isabel de Siguan-Arequipa, Tesis de Título Profesional de Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú, p. 150.
- Dudley, J.H. 1970. Review of collapsing soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, Vol. 96, n° SM1, p.925-947.
- Fernández, E.S. 1997. Investigación del Conglomerado Colapsable de La Cano, Vitor - Arequipa, Tesis de Magister en Ingeniería Geotécnica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, p. 154.
- Fredlund, d.& Rahardjo, F. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, Inc, New York, USA, p. 517.
- Martínez Vargas, A. 1980. Deslizamiento Compuesto del Pie de Cuesta, La Cano, Vitor - Arequipa, Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Chiclayo, Perú, p. 10.

Rollins, M. 1994. Identification and Characterization of Collapsible Gravels, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120(3), p.528-542.

Tejada, L.M.C. 2004. Estudio Geológico-Geotécnico para la Rehabilitación de la Carretera Sondor – Pitay Progresiva km 00 + 000 a km 08+060 Santa Isabel de Sigüas - Arequipa, Tesis de Título Profesional de Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú, p. 222.