

COMPORTAMIENTO GEOMECANICO DE SUELOS ALOFANICOS.

Ramón Verdugo Alvarado
Profesor de Ingeniería Geotécnica
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
rverdugo@ing.uchile.cl

Marcelo Paredes Peñafiel
Estudiante de Magister en Ingeniería Geotécnica
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
maparede@ing.uchile.cl

RESUMEN

Se presentan y discuten los resultados obtenidos de una campaña de ensayos de laboratorio en dos suelos derivados de cenizas volcánicas del Sur de Chile. El marco de análisis sugiere que estos suelos desarrollan una estructura in-situ muy singular que difiere de los suelos convencionales. Se observa la existencia de una presión de pre-consolidación, posiblemente de origen químico, que separa entre comportamiento dilatante de baja compresibilidad y contractivo de alta compresibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Asociado al tectonismo de subducción que se da a lo largo de gran parte Chile, se desarrolla en paralelo una cadena de volcanes, que ha estado y aún está, expulsando cenizas volcánicas, llegándose así a que prácticamente en todo Chile es posible encontrar suelos derivados de cenizas volcánicas. Estos depósitos han sido creados por la caída directa de las cenizas en el lugar o por el posterior transporte de estas por medio de diferentes agentes geológicos.

Con se explica en el artículo de Paredes et al (2004) de este mismo Congreso, estas cenizas corresponden a materiales granulares con una gran cantidad de vidrio volcánico, el cual posee una estructura cristalina muy pobre y por tanto inestable frente a procesos de meteorización. En definitiva esta condición hace que la acción del agua altere rápidamente el vidrio volcánico, dando así origen a otros minerales tales como el alofán y la imogolita.

Las partículas de alofán son de una estructura química prácticamente amorfa y generan formas esferoidales huecas, con diámetros externos del orden de 5 nm ($1\text{nm} = 10^{-6}\text{ mm} = 10^{-3}$ micrones) y poseen huecos que permiten el ingreso de agua hacia su interior. Por otra parte, las partículas de imogolita, que corresponde a un paracrystal, generan formas tubulares huecas que asemejan largos cabellos, de 2 a 3 nm de diámetro externo y de varios miles de nm de largo.

Debido al tamaño nanométrico de estas partículas y a la inestabilidad química asociada a la pobre cristalización de sus minerales, tanto el alofán como la imogolita poseen una gran

V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica

capacidad de retener agua de adsorción en sus superficies interna y externa. Entre otras importantes características de estos materiales, está el hecho de que al ser remoldeados, parte del agua del interior de las partículas se libera cambiando significativamente de aspecto y resistencia.

El hecho de que las partículas sean huecas y retengan agua y que además, en el caso de la imogolita, posean una forma que definitivamente difiere en su esencia del concepto de partícula dado por la mecánica de suelos clásica, hace que también su comportamiento mecánico sea singular, y se aleje significativamente del establecido para el común de los suelos. Consecuentemente, se ha llevado a cabo una investigación sobre el comportamiento de suelos alofánicos, parte de cuyos resultados se presentan en este artículo.

2. MATERIALES ENSAYADOS.

Los materiales ensayados en este trabajo corresponden a dos suelos derivados de cenizas volcánicas, que se han identificado como suelo Santa Bárbara, ubicado a 10 km de la ciudad de Santa Bárbara, hacia la cordillera y suelo Chillán, ubicado a 55 km de la ciudad de Chillán camino a las Termas de Chillán.

El suelo Santa Bárbara corresponde a un suelo derivado de una ceniza volcánica andesítico-basáltica, muy alterada, con gran porcentaje de partículas de alofán e imogolitas en la fracción arcillosa, con una edad probable entre 8.000 y 10.000 años. En cambio el suelo Chillán corresponde a un suelo derivado de cenizas volcánica de composiciones mas bien ácidas

3. SECADO Y PROPIEDADES INDICES.

3.1.- Efecto del secado en los Límites de Atterberg

En las dos muestras ya identificadas se determinaron los Límites de Atterberg, para lo cual se modificó la humedad natural del suelo sólo aireando el material mientras se realizaba el ensayo, de forma de alcanzar la humedad requerida. A este procedimiento se denominó a humedad natural. Adicionalmente, se realizaron estos ensayos utilizando el suelo previamente secado por diferentes medios, como por ejemplo, al horno, al sol y a la sombra. Adicionalmente, se investigó la potencial capacidad de recuperación del suelo a su condición inicial, para lo cual después de secado a horno se colocó el material en agua y al vacío durante una semana. Posteriormente, mediante aireado se llevó el material a las humedades requeridas por los ensayos.

En la Carta de Plasticidad de las Figs. 1 y 2 se presentan los resultados obtenidos para los suelos Sta. Bárbara y Chillan, respectivamente. Se considera que los resultados de los ensayos realizados a humedad natural son los que representan realmente al suelo en su condición natural. El suelo Sta. Bárbara presenta un límite líquido $LL = 108\%$ y un índice de plasticidad de $IP = 38$, respectivamente. Por su parte, el suelo Chillán presenta un límite líquido de $LL=160 \%$ y un índice de plasticidad de $IP=59$. Consecuentemente, se trata de suelos finos que clasifican de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) como limos de alta plasticidad (MH). Sin embargo, es necesario recordar que las partículas de estos materiales finos son de tamaños muy inferiores a un micrón, siendo definitivamente del tamaño coloidal y por ende correspondientes a arcillas.

Por otra parte, se observa claramente un significativo efecto del secado en el índice de plasticidad y especialmente en el Límite Líquido. Además, en el suelo Chillán donde pos

secado al horno, la muestra se volvió a saturar, los resultados indican que el secado cambia la estructura del suelo de una forma prácticamente irreversible.

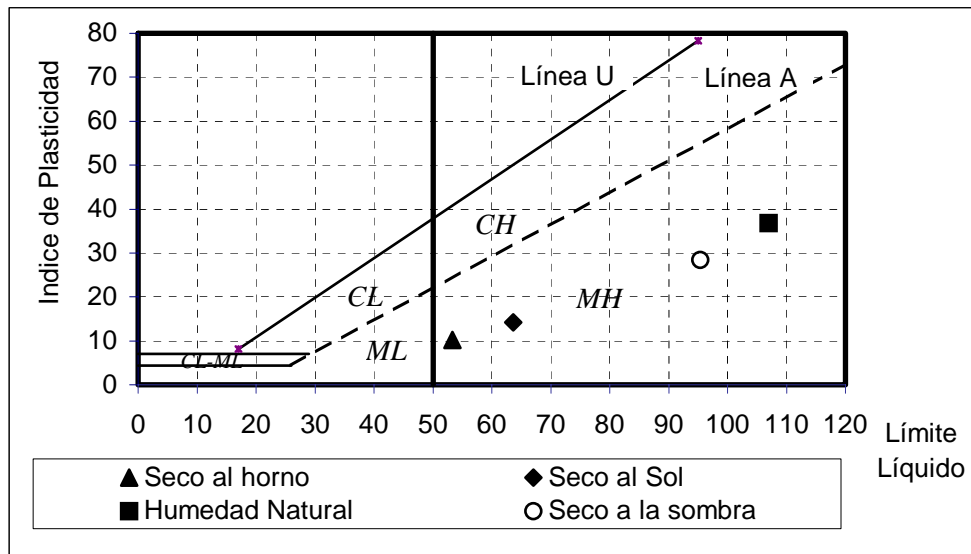


Fig. 1.- Efecto del secado en la plasticidad. Suelo Santa Bárbara.

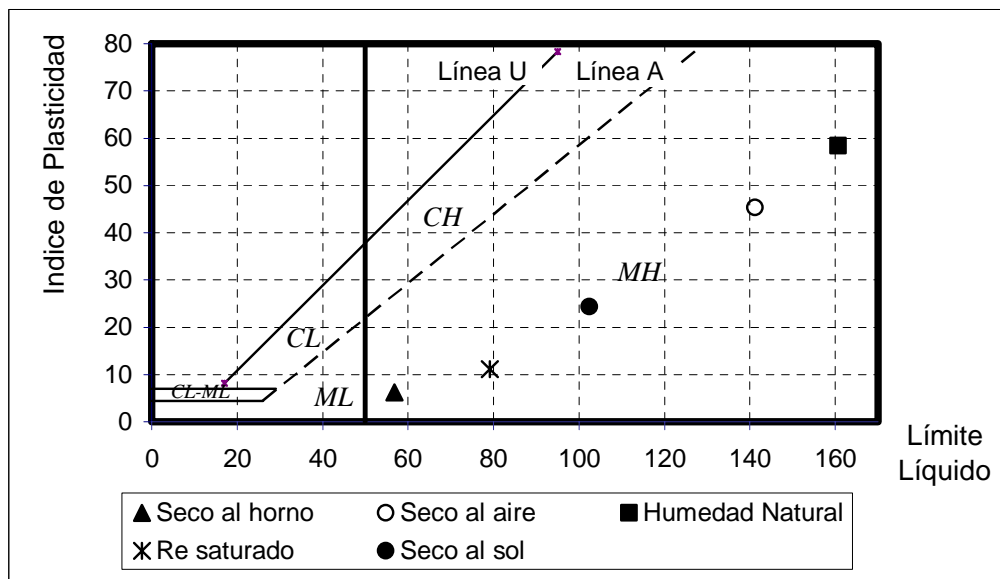


Fig. 2.- Efecto del secado en la plasticidad. Suelo Chillán.

3.2.- Efecto del secado en la Compactación

En ambos suelos se realizaron series de ensayos de compactación Proctor Modificado, utilizando material con diferentes condiciones de secado inicial previo al ensayo. Los resultados se presentan en las Figs. 3 y 4, en términos de curvas densidad seca versus contenido de humedad. Estos resultados experimentales sin lugar a duda indican que el secado produce un drástico cambio de estructura del suelo, transformándolo en uno de propiedades más cercanas a las de una arena limosa, lo que va en el mismo sentido del cambio experimentado en los límites de Atterberg.

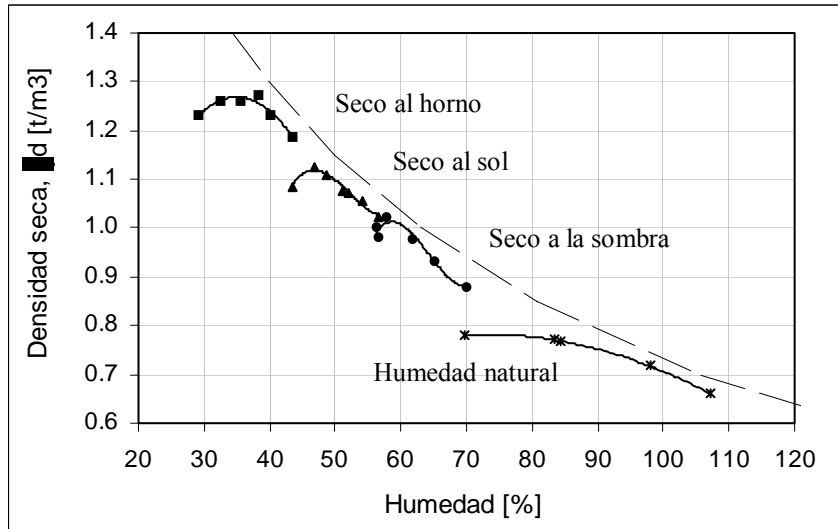


Fig. 3.- Efecto del secado en el Proctor Modificado. Suelo Santa Bárbara.

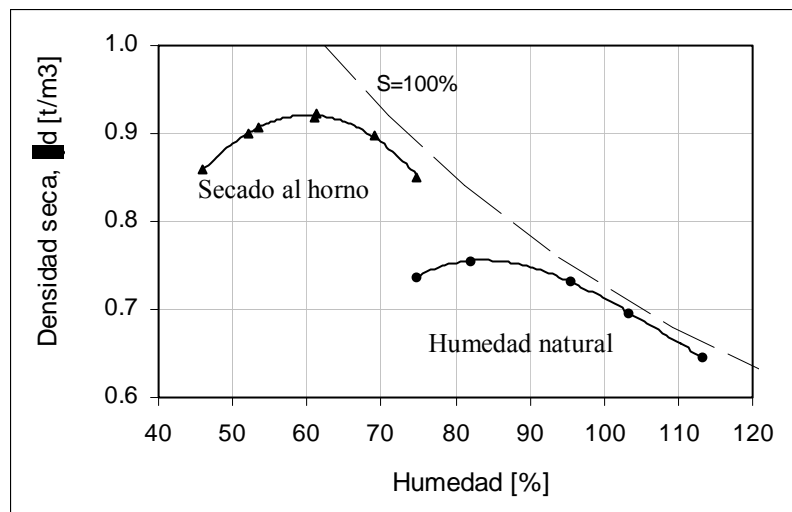


Fig. 4.- Efecto del secado en el Proctor Modificado. Suelo Chillán.

En la práctica estos cambios son realmente de gran importancia, pues de secarse el suelo al horno previo al ensayo Proctor, definitivamente se produce un cambio fundamental de estructura, tal que este ensayo entrega valores de densidades que están muy por sobre las densidades posibles de estos suelos en su estado natural. Cabe señalar que en la geotecnia práctica chilena, mayoritariamente, se está consciente de esta particularidad y por tanto estos ensayos se realizan en base a la humedad natural del suelo, ver por ejemplo, Pérez, (1982).

4. DENSIDADES NATURALES.

En la Fig. 5 se presentan densidades secas de los materiales ensayados, observándose que existen densidades secas inclusive cercanas a 0.5 t/m³. Se estima importante señalar que se han ensayado otros suelos alofánicos chilenos, encontrándose que las densidades secas

secas no superan el valor de 0.85 t/m^3 . Resulta interesante observar que el valor máximo de la densidad seca, obtenida mediante el ensayo Proctor Modificado, para el suelo a humedad natural (no secado), tampoco supera valores 0.79 t/m^3 .

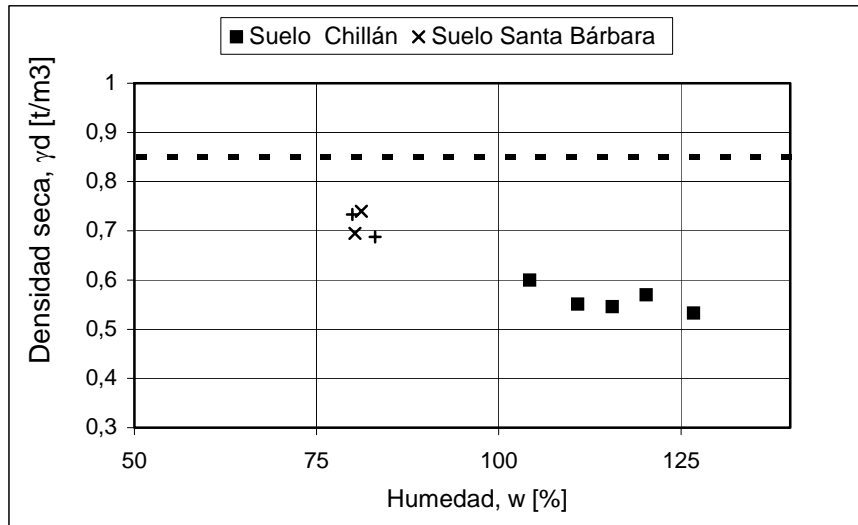


Fig.5 Densidades naturales secas para ambos suelos

5. COMPRESIBILIDAD.

Se ha estudiado la compresibilidad de este material mediante ensayos de consolidación, cuyos resultados se resumen en las Figs. 6 y 7, en términos de índice de vacíos y presión efectiva vertical, tanto en escala logarítmica como aritmética. Se observa que en ambos suelos existe un cambio de comportamiento, típico de suelos pre-consolidados, a una presión que en ambos materiales está mejor definida en escala aritmética, resultado también visto en cenizas volcánicas de otros continentes (Wesley, 1994). En el suelo de Sta. Bárbara esta presión es en torno a 2.0 kg/cm^2 , y en el suelo de Chillán está alrededor de 1.5 kg/cm^2 .

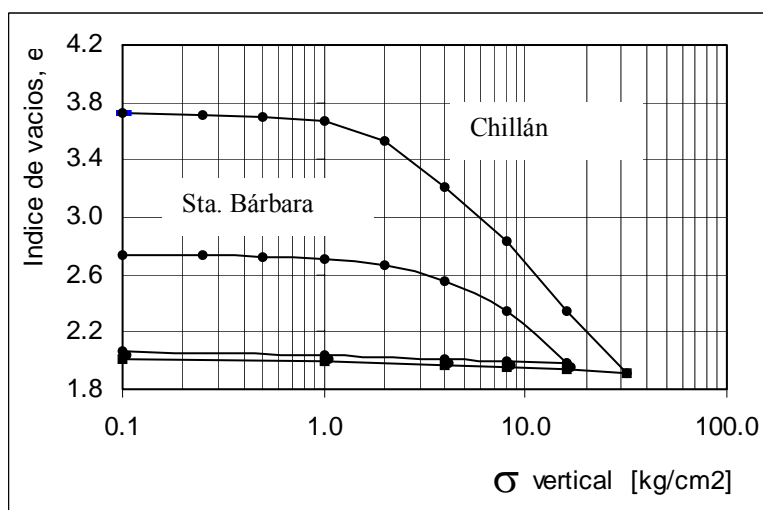


Fig. 6 Ensayos de consolidación, escala logarítmica.

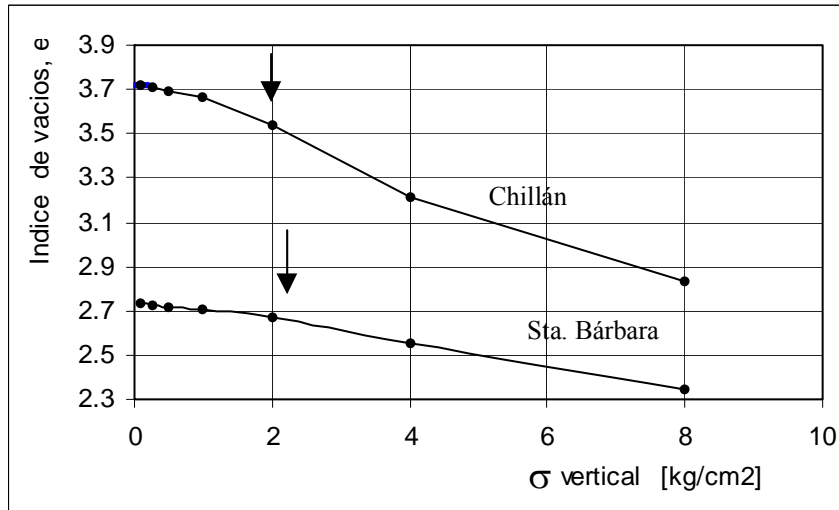


Fig. 7.- Ensayos de consolidación, escala aritmética

La evidencia geológica disponible para el sector donde se extrajeron ambas muestras, permite establecer que no han existido cargas verticales anteriores que expliquen los valores de estas presiones de pre-consolidación. Luego, se postula que estos suelos efectivamente desarrollan una presión de pre-consolidación, pero no sería necesariamente producto de un historial geológico, sino más bien de origen físico-químico (Wallace, 1973; Wesley, 1990, 1994). Los resultados de los ensayos de consolidación permiten establecer los siguientes coeficientes de compresibilidad para estos suelos:

Tabla No. 1.- Coeficientes de Compresibilidad

	Santa Bárbara	Chillán
Cc	1.23	1.53
Cr	0.05	0.05

A partir de estos datos es posible señalar que mientras no se supere la presión de pre-consolidación, la respuesta es la de un suelo de baja compresibilidad y por tanto resulta totalmente posible de utilizar como terreno de fundación, teniendo la gran precaución de no perturbar el sello de fundación durante el proceso constructivo.

6. RESISTENCIA AL CORTE.

Para evaluar la resistencia al corte se realizaron series de ensayos CIU sobre la base de probetas "inalteradas", con presiones de consolidación bajo y sobre la presión de pre-consolidación indicadamente anteriormente. Los resultados obtenidos para ambos suelos se presentan en las Figs. 8 y 9, en términos de curvas de trayectorias de tensiones efectivas. Para ambos suelos se observa el mismo patrón general, que evidencia que la presión de pre-consolidación actúa como frontera, existiendo una respuesta claramente contractiva cuando se está sobre la presión de pre-consolidación, y una respuesta dilatante cuando se está a presiones menores.

Los parámetros de resistencia al corte establecidos a partir de estos ensayos se indican en la Tabla 2, donde se observa que estos materiales movilizan una importante resistencia, aun cuando se presentan en un estado de alto índice de vacíos, o de muy baja densidad. Los valores del ángulo de fricción en la zona de contractiva son inusualmente altos, $\phi = 39^\circ$ para Sta. Bárbara y $\phi = 43.3^\circ$ para Chillán, y resultan difícil de explicar si se considera que el

V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica

material Sta Bárbara presenta un índice de vacío en torno a, $e = 2.7$, y el suelo Chillán un índice de vacío alrededor de, $e = 3.5$.

Tabla No. 2.- Parámetros de Resistencia al Corte

	Zona pre-consolidada		Normalmente consolidada	
	c (kg/cm ²)	ϕ°	c (kg/cm ²)	ϕ°
Sta. Bárbara	0.1	37.5	0	39
Chillán	0.5	30	0	43.3

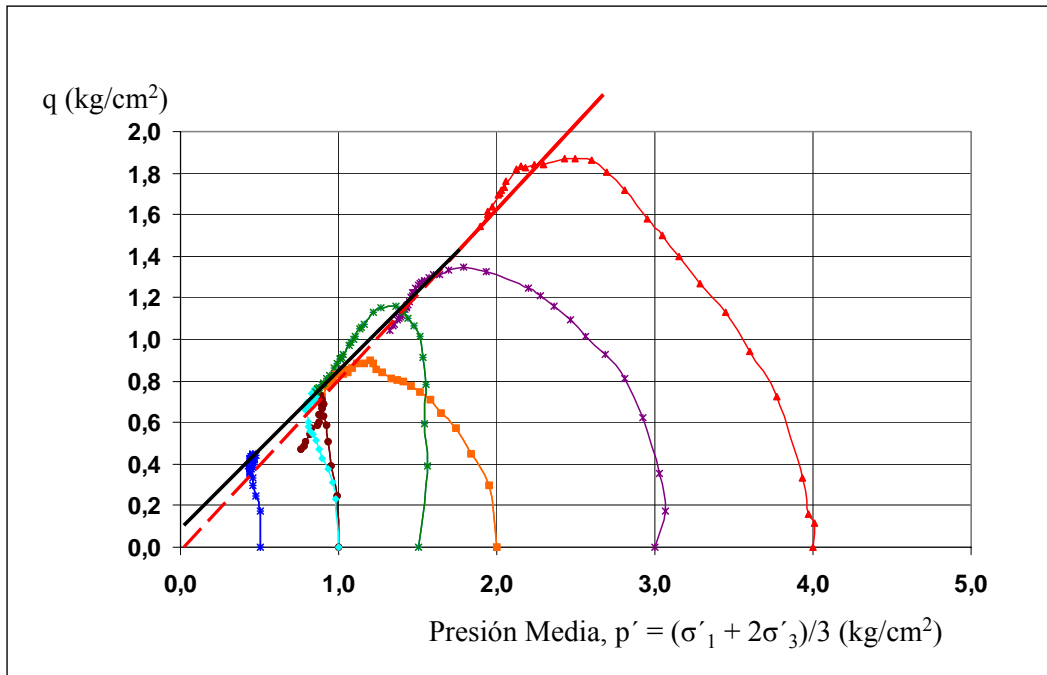


Fig. 8.- Trayectorias de tensiones efectivas. Suelo Sta. Bárbara.

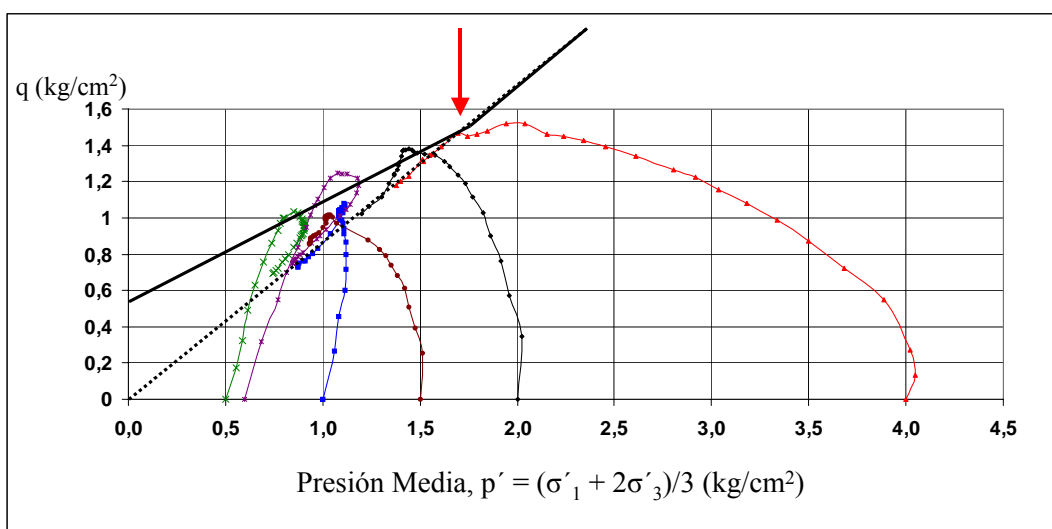


Fig. 9.- Trayectoria de tensiones efectivas ensayos CIU. Suelo Chillán.

Una posible explicación pasa a través de la compleja estructura que es posible que desarrollen las fibras de imogolita que se entrelazan entre ellas y con las partículas de alofán y otros

coloides. Además, las partículas de cenizas del tamaño de limos y arenas son de alta angularidad, lo cual también suma a la resistencia friccionante de estos suelos.

7. SENSITIVIDAD.

Es sabido en Chile que los suelos alofánicos, como por ejemplo los trumaos, pierden consistencia al ser removidos por medios mecánicos y muchas veces maquinaria pesada de construcción se ha visto “empantanada” en estos materiales saturados. Esta peculiaridad se puede considerar que está asociada con la sensibilidad del suelo, o el cambio de estructura debido a un proceso de remoldeo mecánico. En la Fig. 10 se presentan los resultados de ensayos de compresión no-confinada realizados en probetas “inalteradas” y en probetas remoldeadas. Las diferencias de resistencia son notables, obteniéndose valores de sensibilidad de 3 para el suelo de Sta. Bárbara y de 13 para el de Chillán.

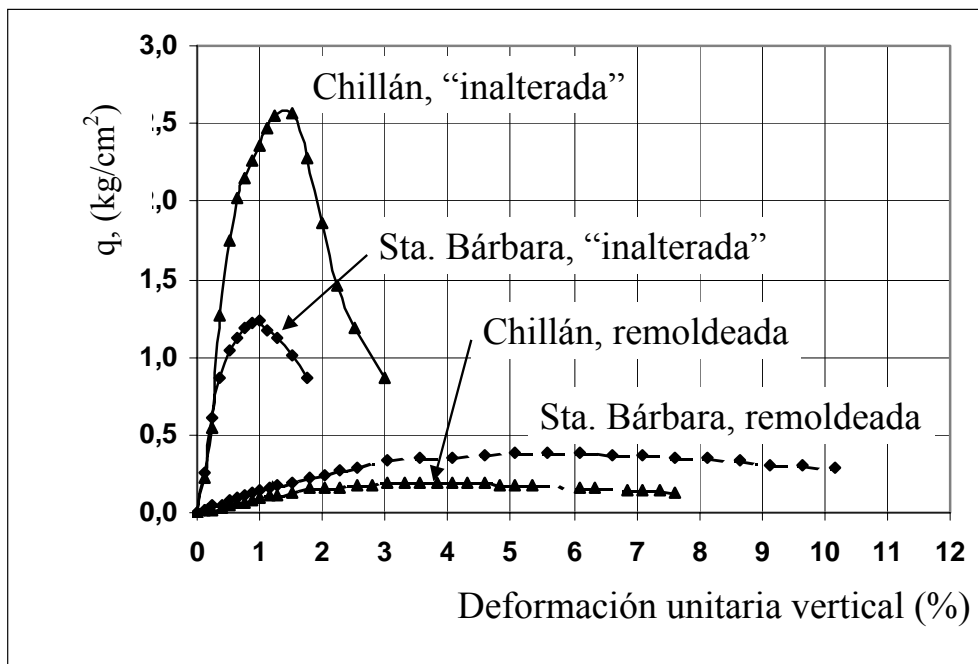


Fig.10 Ensayos de compresión no-confinada. Muestras “inalteradas” y remoldeadas.

Es importante señalar que esta condición de media a alta sensibilidad, hace que ensayos de terreno, como el SPT, arroje valores bajos del índice de penetración, pudiéndose inducir importantes errores de interpretación si no se tienen presentes las particularidades de estos suelos.

8. RESISTENCIA A LA LICUACION.

Debido a los importantes valores de sensibilidad que se midieron en estos suelos y a los bajos valores del índice de penetración que usualmente presentan estos suelos ($N-SPT = 3$ a 7 golpes/pie), se decidió investigar y evaluar la resistencia de estos materiales frente a una posible falla por licuación. Consecuentemente, se realizaron dos series de ensayos cíclicos a presiones de consolidación, bajo y sobre la presión de pre-consolidación previamente establecida. Se optó por presiones de consolidación de 1 y 3 (kg/cm²). Los resultados de estos ensayos se presentan en las Figs. 11 y 12, en términos de razón de tensiones cíclicas y número de ciclos para desarrollar 5% de deformación cíclica en doble amplitud. De estos datos

experimentales resulta significativo el efecto de la presión de confinamiento inicial en la resistencia cíclica. Todo indica que para presiones de confinamiento bajo la presión de pre-consolidación, la resistencia cíclica es elevada, alejando el riesgo de licuación. Sin embargo, para presiones de confinamiento por sobre la presión de pre-consolidación, la resistencia cíclica baja significativamente, siendo comparable a la de un suelo arenoso de densidad relativa media.

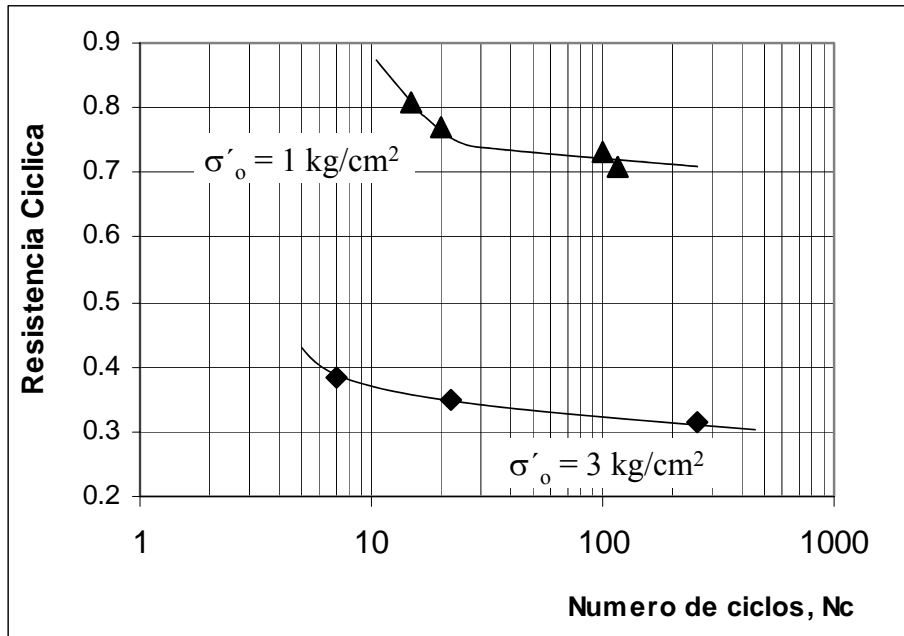


Fig. 11.- Resistencia Cíclica para 5% de deformación D.A. Suelo Sta. Bárbara

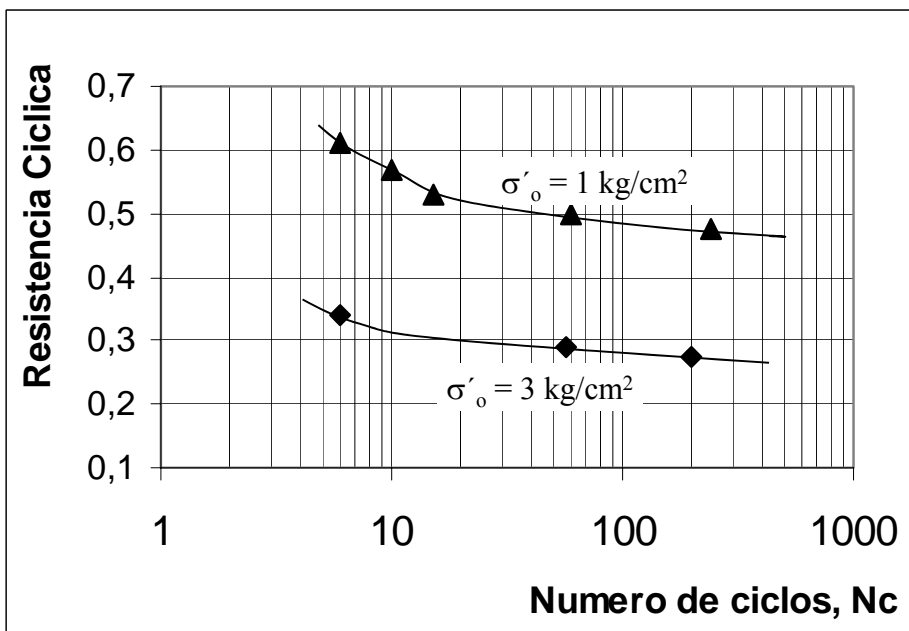


Fig. 12.- Resistencia Cíclica para 5% de deformación D.A. Suelo Chillán.

9. CONCLUSIONES.

Los resultados de los ensayos realizados permiten inferir las siguientes conclusiones:

- El secado al horno y al sol altera la estructura original del suelo, modificándose significativamente los límites de Atterberg y la densidad Proctor. Consecuentemente, los suelos alofánicos no pueden ser secados previo a cualquier ensayo que requiera no modificar la estructura original.
- Estos suelos presentan una importante sensibilidad y por tanto, son altamente alterables frente a perturbaciones de maquinaria pesada. Adicionalmente, ensayos de penetración no son los más adecuados para inferir propiedades mecánicas, debido a que la perturbación es fuerte y tiende a destruir la fábrica original.
- Tanto los ensayos de consolidación como triaxiales, ponen en evidencia una presión de pre-consolidación que actúa de frontera divisoria de comportamiento. Bajo la presión de pre-consolidación, la respuesta es dilatante y de baja compresibilidad, mientras que sobre dicha presión, el comportamiento cambia a contractivo y de mediana a alta compresibilidad.
- En los dos suelos ensayados la presión de pre-consolidación está en el rango de 1.5 a 2.0 kg/cm², lo cual es un valor que permite el diseño de fundaciones directas en estructuras comunes.
- Para presiones de confinamiento bajo la presión de pre-consolidación, la resistencia cíclica es elevada, dejando en la práctica fuera todo riesgo de licuación. Sin embargo, para presiones de confinamiento por sobre la presión de pre-consolidación, la resistencia cíclica disminuye y es comparable a la de un suelo arenoso de densidad relativa media.
- En resumen es posible señalar que los suelos alofánicos presenta apropiadas propiedades geomecánicas, pero deben ser estudiados y manejados adecuadamente.

REFERENCIAS

- Paredes, M. (2004): "Comportamiento geomecánico de cenizas volcánicas", Tesis de Magister en Ingeniería Geotécnica, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Paredes, M. y Verdugo, R. (2004): "Génesis y estructura de los suelos alofánicos en Chile", V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, Santiago.
- Pérez, A. (1982): "Influencia del grado de secamiento sobre el comportamiento de limos provenientes de cenizas volcánicas", 1er Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica.
- Wallace, K. (1973): "Structural behaviour of residual soils of the continually wet Highlands of Papua New Guinea," *Gèotechnique* 23, No. 2, pp. 204-218.
- Wesley, L. (1990): "Influence of structure and composition on residual soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No.4, pp. 589-603.
- Wesley, L. (1994): "The use of consolidometer tests to estimate settlement in residual soils" XIII ICSMFE, New Delhi, India.