

Fábrica y comportamiento geotécnico de las arcillas volcánicas de Xalapa, México

OSCAR LENZ (*)

RESUMEN La Ciudad de Xalapa se encuentra enclavada en la parte oriental del Eje Neovolcánico Mexicano y está cimentada, en su mayoría, en arcillas de origen volcánico del cuaternario. Dichas cenizas tienen un comportamiento peculiar cuando el microclima que les rodea varía, lo anterior se observa en los deslizamientos de taludes y en terraplenes, por otra parte, estas arcillas presentan problemas para su identificación, dado que estos suelos son ricos en halloysita y en menor medida por alofana.

Para comprender la microestructura en estado natural de la arcilla se estudia las características físico-químicas de sus componentes por el método de cromatografía iónica y la composición química, en partículas aisladas, se analiza con un microscopio electrónico de transmisión (MET), con un detector acoplado de dispersión de energía de rayos-X. Por otro lado, la composición mineralógica se obtiene a partir de difractogramas de rayos-X de polvo en fracción arcillosa. La morfología de las partículas se identifica por medio del MET. Se asocian los límites líquidos con la superficie específica de las partículas, esta última determinada por adsorción de N_2 . Se compara la fábrica de la arcilla en estado natural y artificial (con diferentes métodos de compactación) en el microscopio electrónico de barrido (MEB). A partir de lo anterior, se estudia los niveles de la fábrica, la morfología de los poros y el tipo de conexiones de las partículas. Para verificar la hipótesis de que las propiedades mecánicas del suelo dependen de la fábrica de este, se preparan probetas artificiales y naturales y se caracteriza su comportamiento geotécnico para observar su respuesta y compararla. También se observa como influye la fábrica en la deformabilidad de éste bajo succión constante. Se investiga cuidadosamente la resistencia residual y se compara con la de pico.

FABRIC AND GEOTECHNICAL BEHAVIOR OF THE VOLCANIC CLAYS OF XALAPA, MÉXICO

ABSTRACT *The City of Xalapa is located in the Eastern part of the Mexican Neovolcanic Axis and is laid the foundations, in its majority, clays of volcanic origin of the Quaternary. These ashes have a peculiar behavior when the microclimate around them varies, as shown in previous slides of the slope and embankments. On the other hand, these clays have problems for their identification, as these soils are rich in halloysite and to a lesser extent by allophanes. To understand the microstructure in natural state of the clay one studies the characteristics physical-chemistries of his components by the method of ionic chromatography and the chemical isolated particle composition is analyzed with a transmission electron microscope (TEM) with a connected detector of dispersion of X-ray energy. On the other hand, the mineralogical composition is obtained from X-ray diffractometer of dust in argillaceous fraction. The morphology of particles is identified by means of the TEM. Limits liquid associated with the specific surface of particles, this last one determined by adsorption of N_2 . The fabric of the clay in natural and artificial state (with different methods from compaction) in the scanning electron microscope (SEM) is compared. In accordance with the above-mentioned, it is studied the levels of the fabric, the morphology of the pores and the type of connections of the particles. In order to verify the hypothesis that the mechanical properties of the soil depend on the fabric of this, artificial and natural samples prepared and geotechnical behavior is characterized to observe its answer and to compare it. Also it is observed as it influences the fabric in the deformation of this one under constant suction. The residual strength is investigated carefully and it is compared with that of the peak.*

Palabras clave: Microestructura, Fábrica, Fuerzas interpartículas, Cenizas volcánicas, Mineralogía, Succión, Deformabilidad y Resistencia residual.

Keywords: Microstructure, Fabric, Forces interparticles, Volcanic ashes, Mineralogy, Suction, Deformability and residual strength.

1. INTRODUCCIÓN

Las arcillas volcánicas forman un grupo importante dentro de los suelos que se distribuyen a todo lo largo y ancho del Eje Ne-

ovolcánico Mexicano (ENM) y se encuentran en altitudes entre 1,300 y 3,120 m con respecto al nivel medio del mar. La parte oriental del ENM está bajo la influencia de condiciones climáticas subtropicales húmedas a tropicales, con abundantes lluvias

(*) Catedrático de las asignaturas de cimentaciones y comportamiento de suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Veracruzana, México.

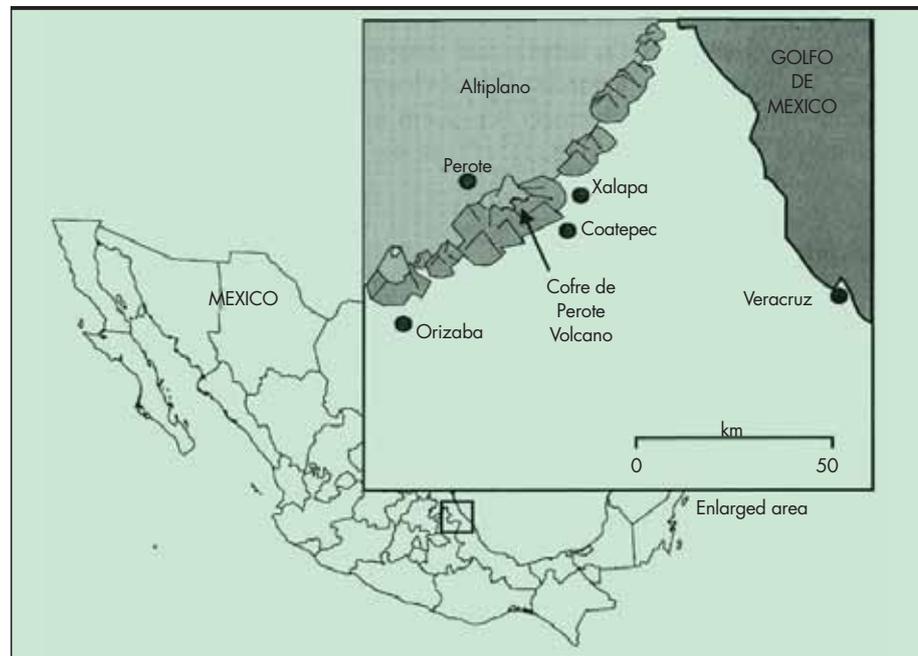


FIGURA 1. Localización de la Cuenca de Xalapa y la distribución de los volcanes de la región (Dubroeuq et al, 2002).

(precipitaciones anuales de 1,700 a 2,200 mm) y temperaturas altas, bajo estas condiciones, a las arcillas aquí estudiadas se les pueden denominar suelos tropicales (Vargas, M., 1985) o arcillas tropicales. Bajo este ambiente climático, las arcillas volcánicas sufren una intensa descomposición química (lixiviación¹) y evolucionan de cenizas volcánicas/vidrios a alofanas y halositas y ésta última hasta transformarse en metahalosita (González de Vallejo et al, 1981; Sifferman y Millot, 1969). Los depósitos de piroclastos que ocupan gran parte del área metropolitana de la Ciudad de Xalapa están constituidos por cenizas volcánicas (volcanic ash). Las laderas se encuentran compuestas por arcillas de color café rojizo *no saturadas*; y en las zonas bajas predominan las arcillas de color café oscuro o negras *saturadas*. Según González de Vallejo et al (2002), a estos depósitos se les puede considerar como suelos transportados, debido a la acción de las emisiones de materiales piroclásticos provenientes de los pequeños aparatos volcánicos del lugar.

Se ha observado en campo, que los taludes compuestos por arcillas café rojizas muestran un comportamiento inestable ante cambio climático. Estas arcillas o cenizas volcánicas presentan una compresibilidad baja anormal y resistencias altas, comparada con arcillas sedimentarias que tengan el mismo límite líquido. Por otro lado, el tratamiento previo a los ensayos de los límites de consistencia y análisis granulométrico influye en los resultados, como se apreciará más adelante, esto trae como consecuencia dificultad para la identificación en campo y dificulta la interpretación de los resultados de laboratorio.

En zonas constituidas por depósitos recientes de cenizas volcánicas meteorizadas y con buenas condiciones de drenaje, es común encontrarse a la alofana junto a la halosita; también se encuentra, específicamente, en las partículas de vidrio de suelos volcánicos meteorizados. Los suelos que contienen alofana, presentan propiedades plásticas anormales con respecto a otros suelos sedimentarios. Los contenidos de

humedad, en el límite líquido de un suelo compuesto por alofana y halosita, puede reducirse si se seca el suelo previo al ensayo (Terzaghi, 1958; Newill, 1961; Jiménez Salas, 1963; Wesley, 1973; González de Vallejo, 1979; Lenz, 2004). Como dato interesante, Mitchell (1993) apunta que la alofana no tiene una composición o forma definida y exhibe una gran variedad de propiedades físicas, por otra parte, Yong y Warkentin (1975) no consideran a la alofana dentro del grupo de las caolinitas o de algún otro grupo, sino la consideran como un grupo de mineral de arcilla aparte.

En resumen, la alofana la encontramos siempre asociada a la halosita en depósitos de cenizas y materiales piroclásticos que contienen partículas de vidrio meteorizados y de reciente deposición, como los suelos de Java, Indonesia, los suelos tropicales de África, Japón, Nueva Zelanda y Centro-América.

En los proyectos de ingeniería que han requerido utilizar rellenos compuestos por las arcillas volcánicas, confinadas por estructuras de retención, éstas han inducido el colapso a dichas obras ante cambios de sus propiedades, y por lo general estos rellenos han sido compactados con humedades de compactación inadecuadas.

Dado que se han tenido y existen problemas de inestabilidad en las laderas y taludes compuestos por estas arcillas de origen volcánico y también se presentan problemas en rellenos, se centrará nuestro estudio en ellas, partiendo del entendimiento de su fábrica y en general de su microestructura.

2. LA CUENCA DE XALAPA

Según la carta estatal de regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1987), la cuenca que aloja a la Ciudad de Xalapa se encuentra enclavada en la parte oriental del Eje Neovolcánico y al sur de la Sierra Madre Oriental, en el paralelo 19 y meridiano 96, y su elevación, con respecto al nivel medio del mar, varía de 1,300 (en la parte más baja) a 1,500 metros en el pináculo del Cerro Macuiltepec. La Figura 1 muestra la Cuenca de Xalapa compuesta por un campo de pequeños volcanes, el más sobresaliente corresponde al Cerro Macuilte-

¹ Lixiviación: en geología se maneja como descomposición química.

MATERIAL	ANTIGUEDAD	COMPOSICIÓN ⁽¹⁾	OBSERVACIONES
Cenizas (arcillas volcánicas)	Cuaternario reciente (<1,5 m.a.)	Cuarzo, cristobalita y Halloysita (abundante)	Las capas superficiales de estos suelos tienen propiedades de un andosol y presentan fisuras
Arena pumítica	Cuaternario reciente (<1,5 m.a.)	Vidrios volcánicos ricos en silicio	Arenas de compacidad media a muy compactas
Lavas	Pleistoceno (aprox. 1.5 m.a.)	– Piroxenos pequeños (augita) – Plagioclasas, predominio de labradorita	Presenta formas vesiculares y muy porosas.
Basalto andesítico	Pleistoceno (aprox. 1.5 m.a.)	Fenocristales: piroxenos, plagioclasas y poco andesina. La matriz es vítrea: microlitos de plagioclasas	Esta roca presenta cierto grado de agrietamiento.

⁽¹⁾ Quantin, P y Geissert, D., 1982

TABLA 1. Litología que predomina en la Cuenca de Xalapa.

pec (estratovolcán), que inició su actividad en el Cuaternario, con una significativa aportación de rocas ígneas extrusivas básicas (Carta Estatal Geológica INEGI, 1987) y materiales piroclásticos. Después, estas áreas se rejuvenecieron en superficie por cenizas volcánicas del Holoceno (Quantin, P, y Geissert, D., 1982) que son las que terminaron de modelar el paisaje actual. La mancha urbana de la Ciudad de Xalapa rodea el pequeño Volcán Macuiltepec. Hacia su parte occidental colinda con las faldas del volcán Cofre de Perote, y hacia su parte oriental con la provincia fisiográfica Planicie Costera de Golfo de México, esta última recibe todas las brisas del Golfo de México.

Los rasgos geomorfológicos están condicionados por la actividad volcánica que hubo en la región, representada por los Volcanes Macuiltepec y Coatepec, y a los grandes movimientos de terreno que ocasionó el Volcán Cofre de Perote, ubicado éste al suroeste de la Cuenca Xalapa, a una distancia aproximada de unos 20 Kms.

La Región de Xalapa está representada por laderas con pendientes suaves a abruptas, dando a la topografía del lugar características de buen drenaje. Las laderas están constituidas por cenizas volcánicas² de consistencia muy firme (tobas de color café fisuradas), y las zonas bajas están ocupadas por corrientes de lavas y rocas basálticas, cubiertas por materiales arcillosos provenientes de las laderas, con espesores que varían desde un metro hasta más de dos metros. Estos materiales arcillosos, por lo regular, se encuentran mezclados con gravas, arenas y bombas volcánicas, y a veces los bloques de rocas basálticas se encuentran empacadas en éste tipo de suelos. Otros materiales piroclásticos que se encuentran en la parte sur y oriental de la Cuenca de Xalapa son los grandes depósitos de arenas pumíticas que conforman una morfología muy irregular y accidentada.

De acuerdo con todo lo comentado en este apartado, se resume en la Tabla 1 la litología predominante del lugar y en la Figura 2 se muestra la estratigrafía típica que se encontró en sondeos realizados sobre las laderas que se localizan en la zona sur de la ciudad de Xalapa.

Además de lo comentado hasta aquí, cabe hacer mención del siguiente aspecto que influye en el entorno geológico de

la región: la tala inmoderada que se viene realizando en la Cuenca de Xalapa en los últimos 50 años, ha cambiado las condiciones climáticas del lugar, este cambio climático ha hecho que el régimen de temperaturas se torne más extremo y por tanto la meteorización de los materiales volcánicos se desarrolla con mayor velocidad y, por otra parte, la exclusión de la cobertura vegetal acelera el problema de erosión de los materiales superficiales que están a merced de los escurrimientos causados por las lluvias.

3. IDENTIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS VOLCÁNICAS: MINERALOGÍA, FÍSICO-QUÍMICA DE LAS ARCILLAS Y SU CLASIFICACIÓN

3.1. CONSTITUYENTES MINERALÓGICOS

Difracción de rayos-X. El difractograma de polvo indica que la arcilla está compuesta por minerales de la familia de los filosilicatos, es decir, los componentes de minerales de arcilla son la halloysita y alofana. Hay que considerar que se determinó el ensayo de polvo de muestra total al suelo cuyos diámetros de partículas oscilan entre 0.01 y 0.0001 mm. En la Figura 3 se muestra un difractograma de polvo correspondiente al suelo analizado, en dicha figura se puede inferir, de acuerdo a las intensidades, que predomina la Halloysita. La alofana presenta dos composiciones: $Al Si O H_2O$ y $Al_2O_3 2SiO_2 3H_2O$. Quizás esta doble identificación del componente químico de la alofana se deba a que los cristales no están definidos por su pobre cristalización (Mitchell, 1993).

3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Espectroscopía de dispersión de energía de rayos-X. La identificación de los componentes químicos de partículas aisladas del suelo se analizaron en un microscopio electrónico de transmisión (MET), con un detector acoplado de dispersión de energía de rayos-X, que permitió observar la morfología de las partículas e identificar la composición química de los minerales. De acuerdo con el espectrómetro que se muestra en la Figura 4 de una partícula de halloysita, los elementos que predominan en los minerales son: aluminio, silicio, oxígeno, magnesio, potasio, titanio (en menor medida) y hierro. Prácticamente, la composición química en láminas de alofana es la misma que en tubos de halloysita.

En aras de la brevedad, se presentan las propiedades físico-química de las arcillas en la Tabla 2.

2 Según Fisher (1961), estas cenizas volcánicas pertenecen al grupo de las rocas piroclásticas que contienen fragmentos producidos por explosiones volcánicas y lanzadas hacia el exterior desde las aberturas volcánicas, en partículas separadas. Estas partículas, según el autor, las denomina cenizas y tienen tamaños menores de 1/256 de mm.

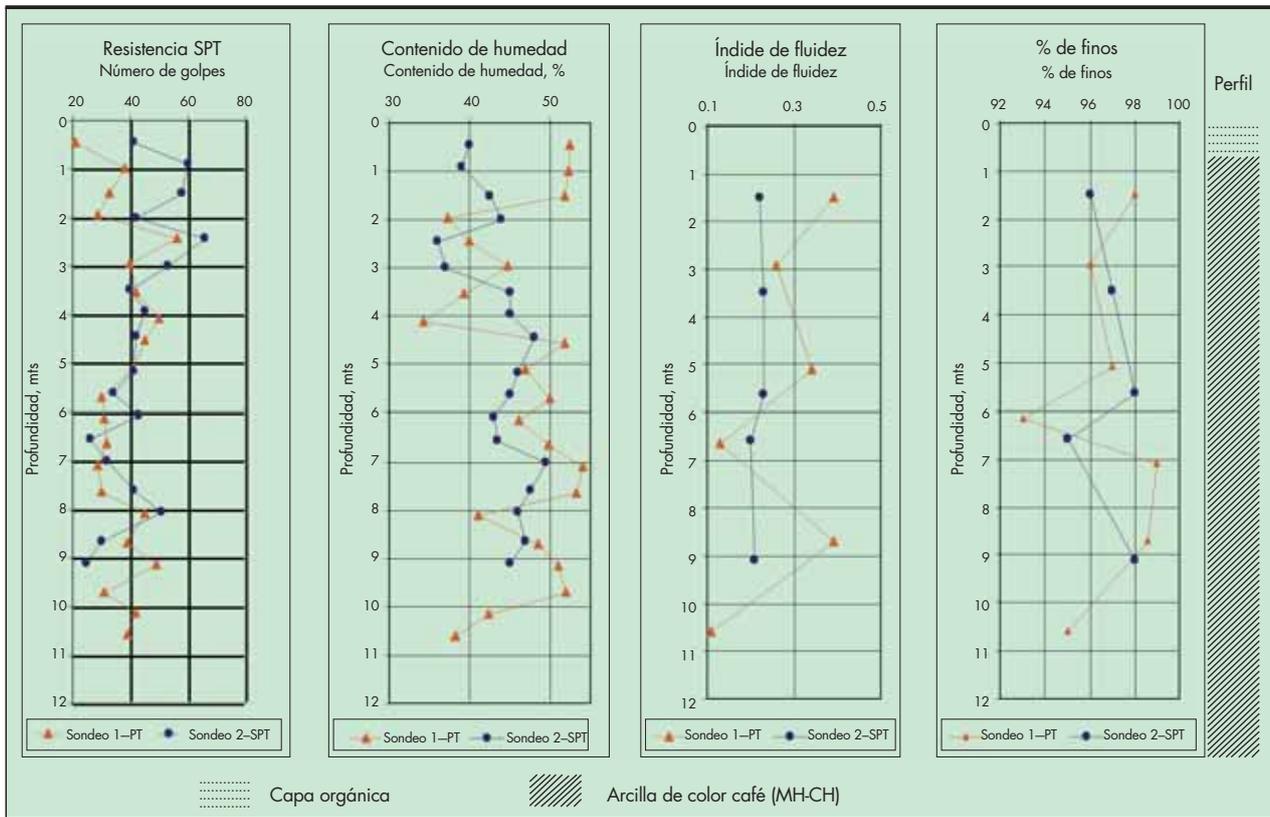


FIGURA 2. Estratigrafía típica detectada por sondeos realizados sobre ladera.

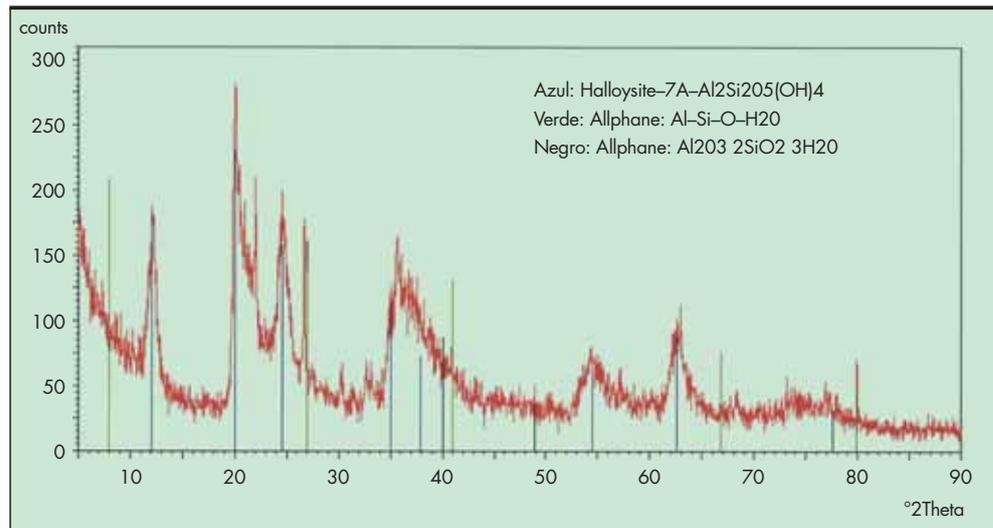


FIGURA 3. Difractograma de polvo.

Intercambio catiónico Meq/100 gr	Cont. de materia orgánica, %			pH -	Contenido de carbonatos %	Sup. específica m ² /gr
	MOT.	MOH	CO			
≈ 2	0.13	0.1	0.06	5.6	0.0	92.7

TABLA 2. Propiedades físico-químicas de la arcilla volcánica.

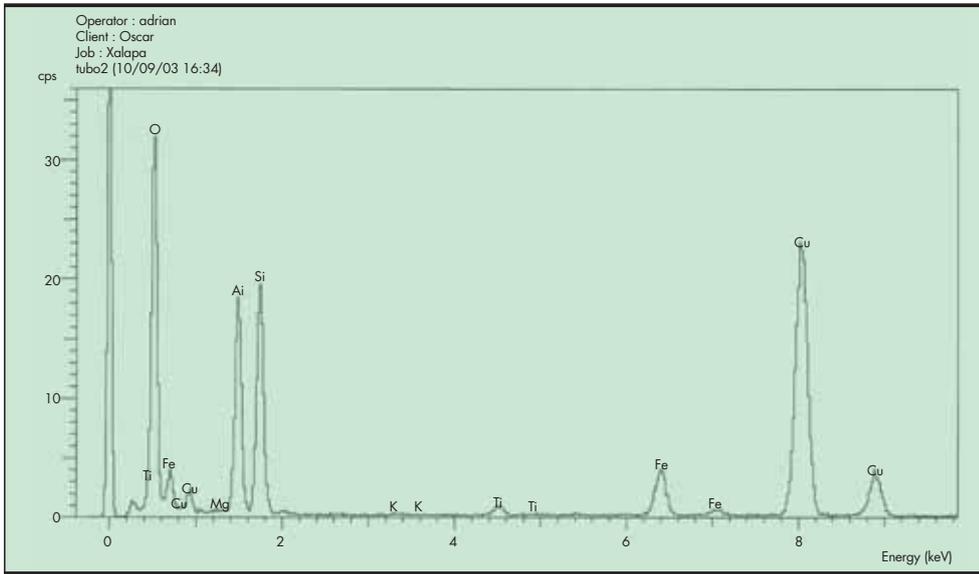


FIGURA 4. Espectrómetro que indica la composición química de las partículas de halloysita.

La capacidad total de intercambio catiónico (CTIC) fue determinada por el método de cromatografía iónica y los cationes de cambio detectados por el ensayo fueron el Sodio, potasio y calcio.

Es sabido que la presencia de materia orgánica en la trama porosa del suelo influye en su movilidad (conductividad hidráulica) y retención del agua, así como también en el intercambio catiónico de las partículas que componen el suelo. Por otro lado, la presencia de materia orgánica participa en la meteorización de los minerales de arcilla, aportando una fuerte influencia en las reacciones químicas del medio. Las sustancias húmicas son de carácter ácido y tienen carga eléctrica negativa que dependen del pH del suelo. Además, la presencia de materia orgánica influye en los límites líquido y plástico. En la Tabla 2 se puede apreciar los contenidos de materia orgánica total (MOT), húmica (MOH) y carbono orgánico (CO), obtenidos en laboratorio con el método modificado de Walkley-Black con valoración potenciométrica.

El pH del suelo se determinó con un equipo Tritino 751-GPD (valoración potenciométrica) en un período de una hora y el resultado reportado es de 5.6.

La carga eléctrica en la cara de las partículas de suelo depende del grado de sustitución isomórfica (sustitución del Si y Al por otro elemento dentro de la red cristalina de las laminas de arcilla) y del pH (González et al, 2002 y Tsige, 1999). Así por ejemplo, en medios con alto pH (>8.2) predominan las uniones de láminas de arcilla borde-cara, formándose una microestructura de tipo panal de abeja: estructuras abierta, típica de medios salinos y suelos susceptibles. El caso contrario, serían los suelos con bajo pH, que tienen microestructuras "oolíticas" o "nodular", éstas son representativas de suelos compactos, ricos en óxido de hierro y que preferentemente se localizan en terrazas continentales.

El contenido de carbonatos reportó el 0.0 %, lo que indica que no existe cementación entre las partículas por presencia de carbonatos.

La superficie específica fue determinada por adsorción de N₂, por el método de BET³, con una presión de saturación de

3 Este método fue propuesto en 1938 por Brunauer, Emmett y Teller.

718.38 mm de Hg y dicho valor está indicado en la Tabla 2. Un aspecto importante a destacar, es el hecho de que la superficie específica condiciona las fuerzas eléctricas de la superficie de las láminas de arcilla⁴ y por tanto, influye en las fuerzas interpartículas. La "actividad" de un suelo arcilloso, como la capacidad de adsorción del agua de sus partículas, aumenta con el incremento de la superficie específica. Por otro lado, el límite líquido se relaciona estrechamente con la superficie específica y éste, puede ser una medida índice de la superficie específica de las partículas. De acuerdo con Farrar y Coleman, Yong y Warkentin (1975) presentan una correlación entre el límite líquido y la superficie específica, en la cual el límite líquido está en función directa de la superficie específica y la pendiente de la recta de dicha correlación, depende de la naturaleza de la superficie específica.

3.3. PROPIEDADES ÍNDICE

Los resultados del análisis granulométrico se exponen en el gráfico de la Figura 5, en donde el eje de las abscisas indica el diámetro de las partículas, en escala logarítmica, y el eje de las ordenadas los porcentajes acumulativos. Como se puede apreciar en la citada figura, se dibujan dos curvas granulométricas que representan a dos muestras de la misma porción de suelo tratado con diferentes agentes dispersantes; la muestra 2 se ha tratado con menor energía de dispersión que el utilizado para la muestra 1. En la muestra 2 se puede ver que como el agente dispersivo era de menor intensidad no logró vencer las fuerzas eléctricas interpartículas de los agregados⁵ y el resultado del análisis granulométrico presentó menor porcentaje de arcilla. Sin embargo, los resultados obtenidos, para ambos casos, arrojan fracción arcillosa mayor del 60%, característica que coincide con el

4 Regularmente las partículas de arcilla suelen presentar morfologías de tipo laminar, excepto los minerales de arcilla de forma fibrosa (sepíolita y paligorskita) y tubular (halloysita). Las arcillas presentan superficies específicas muy grandes en comparación a las arenas y depende del tamaño y forma de las partículas.

5 Agregado (cluster) es el apilamiento o agrupación de partículas de minerales de arcilla. La misma acepción la da Terzaghi (1958), que fue el primero en llamar a los agregados clusters.

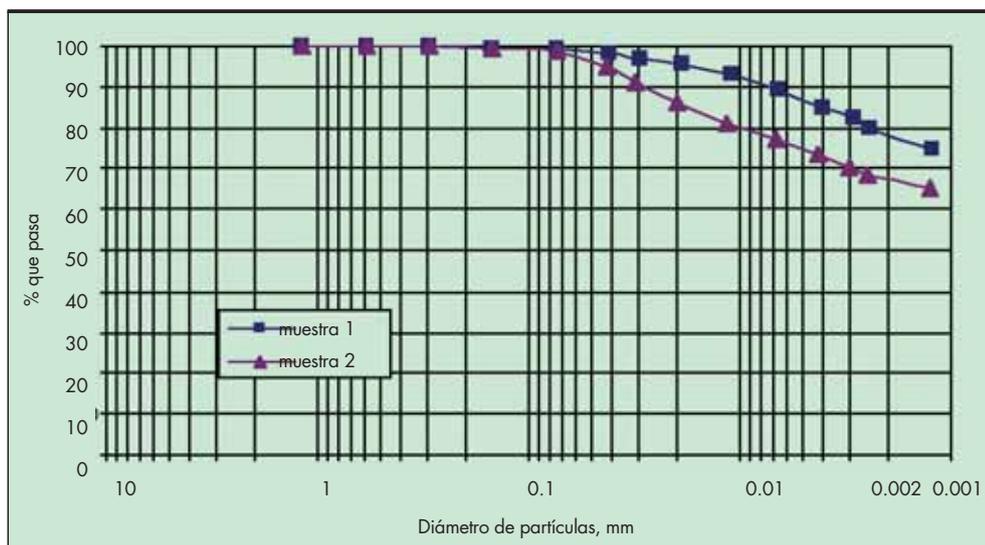


FIGURA 5. Curvas granulométricas de dos muestras que se trataron con diferentes energías de dispersión.

tamaño típico de las partículas arcillosas observadas en el microscopio electrónico de transmisión.

Llama la atención las discrepancias que se observan en la Figura 5, pues las muestras corresponden al mismo suelo, es decir, pertenecían a la misma muestra. Se ve claramente como el procedimiento del ensayo influye en los resultados del análisis granulométrico. Ya Terzaghi (1958) lo indicó en su reporte geotécnico de la Presa de Sasumua, Kenia, pero además, no tan sólo influye el método de ensayo, sino también el contenido de humedad del suelo con que se haga el ensayo. Newill (1961) reporta ensayos granulométricos realizados a dos arcillas rojas de Kenia⁶, con diferentes contenidos de humedad. Primero ensayó las arcillas rojas con su contenido de humedad natural y luego con secado en la estufa a 105°C.

La primera condición de ensayo, reportó mayor contenido de partículas arcillosas que la segunda. Lo anterior sugirió a Newill, que el secado en estufa causó el apilamiento de las partículas de arcilla en agregados (clusters o peds) y que el método de dispersión, parcialmente disgregó los agregados de las partículas.

Con lo comentado en las líneas de arriba, se quiere poner énfasis en la importancia del método que se utilice para realizar un análisis granulométrico que represente realmente el contenido de la fracción arcillosa del suelo. Los investigadores antes mencionados se han valido de otros recursos, como conocer las propiedades físico-químicas del suelo, identificar por medio de análisis de rayos-X la fracción arcillosa y conocer el carácter mineralógico del suelo. Con los métodos convencionales de análisis, a veces estos suelos de comportamiento anómalo (Terzaghi, 1958) no es posible conocerles sus contenidos reales de fracción arcillosa.

En la determinación del límite líquido y plástico se optaron por dos procedimientos: el primero consistió en secar la muestra en horno de una temperatura de 105°C, previo al ensayo, y el segundo procedimiento consistió en realizar los ensayos con el contenido de humedad natural. Se pudo apreciar como influye en los valores del límite líquido y plástico, el secado previo al ensayo. En la Figura 6 se muestran las características de plasticidad de las arcillas volcánicas en

ensayos realizados con la humedad natural del suelo y con secado previo. En la misma figura puede apreciarse que los puntos que representan los ensayos con previo secado disminuyeron en sus límites, con respecto a los que se determinaron con la humedad natural, es decir, de arcillas de alta plasticidad (CH), pasaron a ser limos de alta compresibilidad (MH), se aproximaron más a la línea recta vertical que pasa por el 50% del límite líquido y se instalaron, en definitiva, por debajo de la línea "A" del gráfico de Casagrande. Con lo anterior se verifica lo que Terzaghi (1958) y Newill (1961) afirmaron en sus investigaciones: la halloysita deshidratada es irreversible en su hidratación, es decir, toda vez que es excluida el agua del espacio basal del mineral, no vuelve absorberla. Mitchell (1993) afirma que a 60°C se presenta la pérdida de agua en la halloysita, cambiando su espacio basal de 10 Å a 7 Å, una vez que se ha deshidratado. Esto explica por qué los límites líquido y plástico varían con el secado del suelo⁷, previo al ensayo, con respecto a los límites determinados con la humedad natural. Esta es una de las causas por las que Terzaghi (1958) llamó a estas arcillas rojas "de comportamiento anómalo".

En virtud de que el suelo en estudio está compuesto, principalmente, por arcillas (ver Figura 5), se llevó a cabo el cálculo y la identificación de la actividad de los minerales de arcilla. Como la actividad de una arcilla está en función directa del índice de plasticidad (Skempton, 1953) y éste último en función de los límites líquido y plástico, basándose en lo anterior se efectuaron los cálculos considerando dos condiciones de ensayo en la determinación de los límites líquido y plástico: determinación de los límites con la humedad natural del suelo y con previo secado. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

3.4. CLASIFICACIÓN

Para la clasificación se consideró las propiedades granulométricas que presentó el suelo tratado con mayor energía

⁶ Estos suelos son de origen volcánico (Newill, 1961).

⁷ González de Vallejo (1979) encontró, en suelos de origen volcánico, que el tiempo de mezclado suelo-agua influye en la determinación del límite líquido y límite plástico, a medida que se incrementa el tiempo de mezclado, crecen ligeramente los mencionados límites de consistencia.

Condición del ensayo (LL y LP)	Origen geológico	Actividad	Mineral predominante	Observaciones
Realizado con la humedad natural	Volcánico, cuaternario	0.58	Halosita y alofana	Arcillas inactivas
Realizado con previo secado	Volcánico, cuaternario	0.48	Halosita y alofana	Arcillas inactivas

TABLA 3. Actividad de las arcillas en estudio, considerando dos condiciones en la determinación de los límites de consistencia.

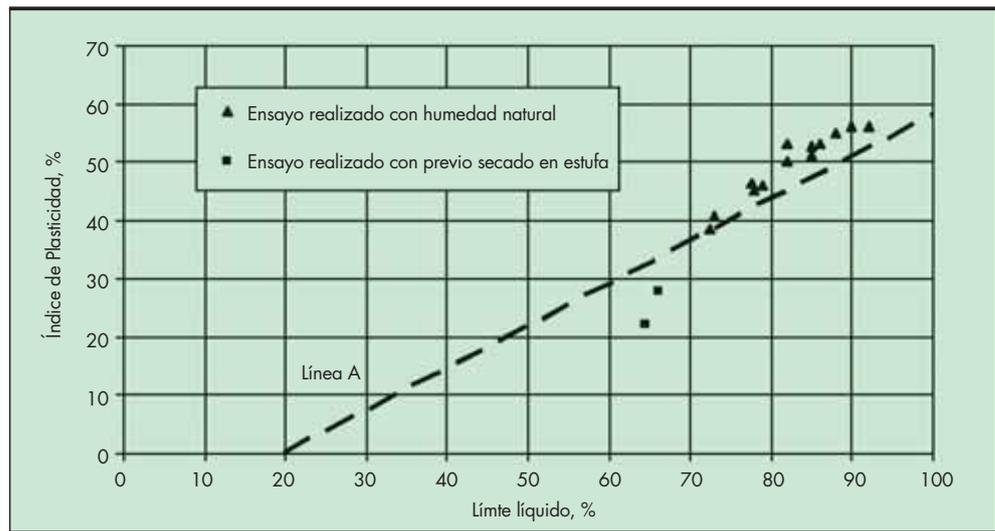


FIGURA 6. Características de plasticidad de la arcilla volcánica.

de dispersión (Figura 5, muestra 1), en la que predominó la fracción arcillosa (79%) con respecto a la limosa (20%), a las características de plasticidad que manifestó el suelo en ensayos realizados con humedad natural (puntos localizados por arriba de la línea “A” en el gráfico de Casagrande de la Figura 6), al contenido de materia orgánica (ver Tabla 2) y de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la ceniza volcánica se clasifica como arcilla limosa de color café rojizo de alta plasticidad “CH”.

4. FÁBRICA DE LAS ARCILLAS VOLCÁNICAS EN ESTADO NATURAL Y COMPACTADO

4.1. MORFOLOGÍA DE LAS PARTÍCULAS CONSTITUYENTES DE LA ARCILLA VOLCÁNICA

Con el microscopio electrónico de transmisión (MET) se pudo observar la morfología de las partículas de arcilla y además, con un detector acoplado de dispersión de rayos-X a dicho microscopio se comprobó la composición química de las mencionadas partículas.

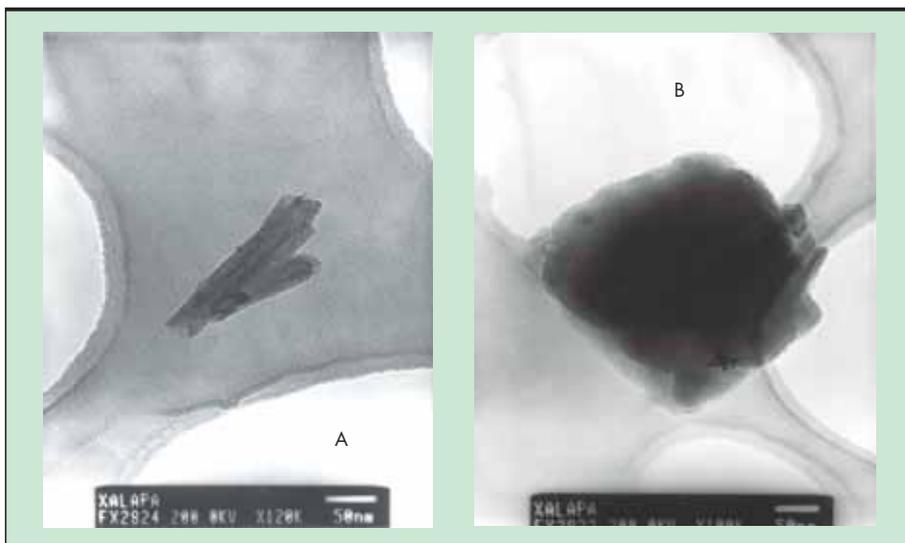


FIGURA 7. a) Microfotografía de partícula de halosita y b) lámina de alofana.

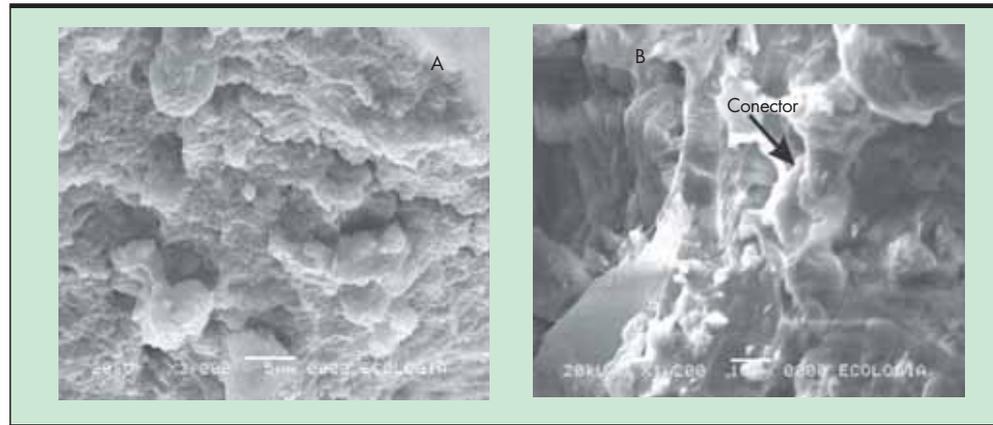


FIGURA 8.

a) Microfábrica de la arcilla en estado natural tipo oolítica y b) Detalle de conector.

En la Figura 7a puede apreciarse un par de partículas aisladas de halloysita en forma típica tubular⁸, de longitudes que varían entre 60 a 156 nm (600 a 1,560 Å) y sus diámetros entre 24 a 51 nm (240 a 510 Å) y la Figura 7b muestra una lámina de alofana con sus bordes rotos, manifestación de alteración por lixiviación. De acuerdo a microfotografías tomadas a tres muestras aleatorias analizadas, la morfología predominante de partículas de la arcilla volcánica son de forma tubular y laminar, predominando los tubos de halloysita respecto a la alofana.

4.2. FÁBRICA EN ESTADO NATURAL

La fábrica de un suelo arcilloso se entiende aquí, como al arreglo espacial de sus partículas y la distribución de tamaños de las mismas, así como también, a la forma de las partículas y los huecos. La microestructura asocia a la fábrica y a las fuerzas interpartícula⁹.

De acuerdo con las observaciones de Mitchell (1993), la disposición o arreglo de los sedimentos ya sea ocasionada por un agente transportador como el agua o el aire, obedecen a las mismas leyes de transportación. La arcilla volcánica (cenizas) fue movilizada por aire al lugar de deposición y dado el tipo de fuerzas repulsivas que predominan entre las partículas que constituyen estos depósitos, forman estructuras dispersas¹⁰, muy cerradas y con poros pequeños (Lambe, 1953; 1958, 1975), típicas de depósitos continentales. Acorde a lo comentado anteriormente y con la caracteri-

zación propuesta por Yong y Warkentin (1975), la fábrica de la arcilla volcánica corresponde a una “fábrica total anisótropa”; en donde las partículas tienen un arreglo orientado dentro de los peds o clusters y disposición orientada de los peds, *bajo estas condiciones el sistema es anisótropo*. Puede apreciarse en las microfotografías de la Figura 8a, obtenida con microscopio electrónico de barrido (MEB), como los agregados están constituidos por varios paquetes¹¹ formados por partículas dispuestas en paralelo (cara-cara), que a su vez forman agregados en forma de oolitos (microfábrica oolítica). En la microfotografía de la Figura 8b se muestra detalle de conector de la arcilla en estado natural, los peds se asocian en paralelo.

4.3. FÁBRICA EN ESTADO COMPACTO

Con el objeto de observar como influye en la fábrica del suelo el método de compactación, se analizó la arcilla en el MEB con la humedad óptima y bajo dos métodos de compactación, a saber: por amasado, utilizando el equipo Harvard-miniatura (Wilson, 1958) y por impactos, utilizando equipo Proctor estándar (Proctor, 1933; ASTM-D698-78). La Figura 9a expone una microfotografía de una muestra compactada por amasado, con la humedad óptima de 40.0%. La matriz arcillosa está compuesta por agregados con partículas orientadas y dispuestas cara-cara, y a su vez estos agregados se asocian en paralelo, quedando algunos agregados sin orientación preferente; también puede observarse los macroporos que se encuentran entre los agregados. De acuerdo a la microfotografía, la fábrica de la arcilla compactada por amasado que se observa es anisótropa.

En la imagen de la Figura 9b, puede apreciarse la fábrica de la arcilla compactada por impactos, con la humedad del ensayo Proctor normal ($\omega_{op} = 39\%$). La fábrica característica bajo estas condiciones de amasado es isotropa. Persiste la asociación de las partículas cara-cara en los agregados, pero estos no se encuentran orientados, sino tiene un arreglo al azar. Comparando las imágenes de las Figuras 9a y 9b, puede distinguirse que el método de compactación por amasado (Harvard miniatura) forma una fábrica bien orientada que la formada por impactos (Proctor normal), de hecho, los microporos de la fábrica que se forma por el método de compactado por amasado son más

8 La explicación de que los tubos de halloysita se encuentran enrollados, según Bates (1955), se debe a que las láminas de caolinita llegan a ser tan delgadas que sus bordes se rizan e incluso se enrollan completamente, esta curvatura es el resultado de la inadaptabilidad de las capas tetraédricas y octaédricas y a la presencia de uniones débiles de inter-capas.

9 Las fuerzas interpartículas están representadas por las eléctricas y los enlaces cementantes; las fuerzas eléctricas son de naturaleza repulsivas y atractivas y los enlaces son de carácter orgánico e inorgánico. La forma y tamaño de las partículas, el ambiente físico-químico del medio (pH, salinidad y presencia de materia orgánica), son factores que influyen en la microestructura (fábrica y fuerzas interpartícula) de una arcilla. Otro factor postsedimentario que influye en la microestructura del suelo arcilloso es el incremento de las presiones geostáticas por deposición de sedimentos, que provoca una reorientación de las partículas, disminución de la porosidad y por otro lado, un aumento de su densidad.

10 Cuando la concentración del electrolito disminuye (agua con mínimo de sales), aumenta la doble capa eléctrica difusa y las fuerzas que predominan son de carácter repulsivo; por tanto, las partículas se aplatan con alto grado de “orientación” para formar una estructura dispersa.

11 Los paquetes o dominios los constituyen dos o más partículas y en general se presentan ordenadas en paralelo (Yong y Warkentin, 1975; Mitchell, 1993).

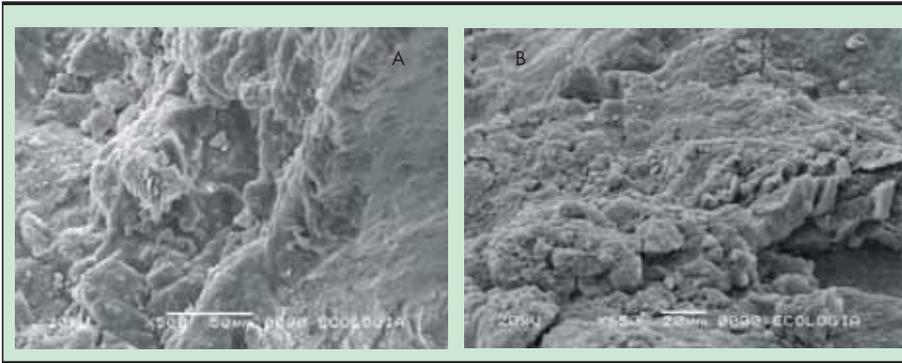


FIGURA 9. a) Microfábrica de la arcilla compactada por amasado y b) compactada por impactos.

pequeños que los formados por el método de impactos. Cabe destacar, que la diferencia de las densidades máximas obtenidas por ambos métodos es mínima, como se podrá comprobar en el siguiente apartado.

5. COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO

5.1. COMPACTACIÓN

No se trata de comparar aquí el método de compactación por impacto con el método por amasado, sino observar el resultado que da cada uno de ellos y cual produce una mejor orientación de las partículas en este suelo. Interesa observar como varía la densidad de la arcilla por diferentes métodos de compactación.

La Figura 10 muestra una curva de compactación que representa al suelo compactado por impactos (Proctor normal), en la que el suelo no se hidrató previo al ensayo y otra curva que representa al suelo compactado por amasado (Harvard-miniatura), en la que sí se hidrató al suelo durante un periodo de diez días antes de realizar el ensayo. En la misma figura puede apreciarse que el lugar geométrico de la densidad máxima-humedad óptima de la curva de compactación por

amasado está más próximo a la curva de saturación del 100% que el de la curva de compactación por impactos, también puede observarse que en las ramas húmedas de las curvas se obtiene una mayor orientación de las partículas (alto grado de orientación de las partículas) por el método de compactación por amasado que por el método por impactos, independientemente del tratamiento previo de la muestra. Marsal y Reséndiz (1975) ensayaron arenas arcillosas con ambos procedimientos de compactación y obtuvieron resultados similares a los que se determinaron aquí, es decir, los puntos geométricos de la densidad máxima-humedad óptima de las curvas de compactación por amasado estaban más próximas a la curva de saturación del 100% que los de compactación por impactos.

Para observar como influye el tratamiento del suelo (previo al ensayo de compactación) en la fábrica del mismo se prepararon dos muestras: una con hidratación por un periodo de diez días (suelo hidratado) y la otra sin hidratación, es decir, se seco al aire e inmediatamente se le empezó a incorporar el agua para definir su curva de compactación (suelo no hidratado). Las dos muestras se ensayaron con un mismo método y energía de compactación Proctor estándar. En la Figura 11 pueden apreciarse las curvas de compactación obtenidas.

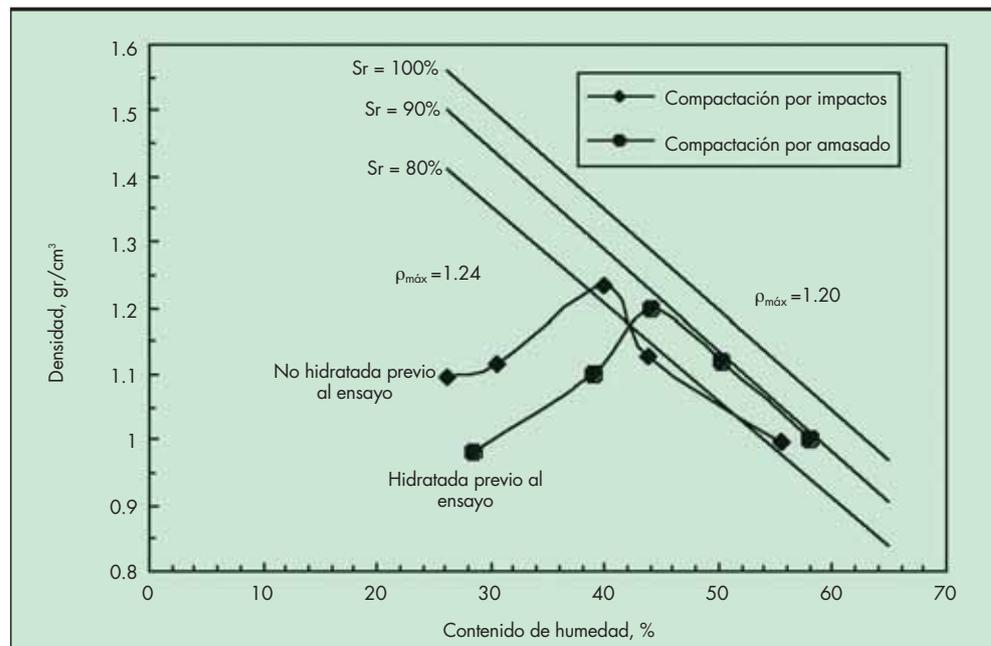


FIGURA 10. Influencia del método de compactación en la densidad y en la orientación de las partículas.

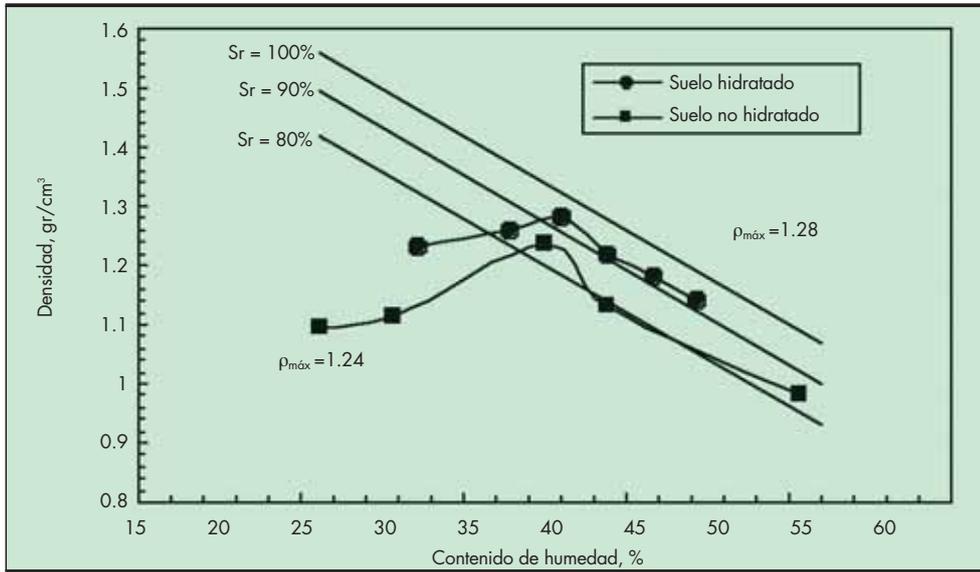


FIGURA 11. Comparación de curvas de compactación Proctor normal con diferente tratamiento.

5.2. RESISTENCIA PICO Y RESIDUAL DETERMINADA EN APARATO DE CORTE DIRECTO Y ANULAR

Cuando las arcillas normalmente consolidadas y preconsolidadas se someten a estados de tensiones, tienden a valores idénticos en cuanto a resistencia residual (Skempton, 1985). Ante este comportamiento, se estudia a las arcillas volcánicas en estado compactado por carga estática y con densidad seca máxima y contenido de humedad óptima (condiciones Proctor estándar), para determinar la resistencia de pico y residual. En la formación de las probetas se cuidó que la presión de compactación estática fuera mayor que las presiones normales aplicadas en ensayo de corte, para que de esta forma la relación OCR (razón de sobreconsolidación) fuera mayor que 1, y bajo esta circunstancia se represente las condiciones de preconsolidación que muestra en la naturaleza la arcilla volcánica. Tanto en el ensayo de corte directo como en el anular¹² se permitió la disipación completa de las presiones intersticiales, aplicando a las probetas de suelo baja velocidad de corte y consolidándolas previamente a la falla. Por otro lado, es bien sabido que la resistencia residual es un pequeño porcentaje de la resistencia máxima¹³ (de pico), y en este rango de tensiones (tensiones tangenciales constantes con gran-

des desplazamientos) representa la destrucción de los enlaces de las partículas de minerales arcillosos (Lambe, 1979; Lupini et al, 1981; Skempton, 1985). Wesley (1977), considera que la pequeña caída post-pico en estos suelos con gran contenido de Halloysita y alofana, se debe a la ausencia de partículas parecidas (ver Figura 7a, b), en las que dichas partículas no logran reorientarse en esa etapa de falla de la arcilla. La observación de Wesley no es en nada desatinada, pues se han observado curvas tensión-desplazamiento en arcillas inalteradas y no presentan una caída post-pico. De acuerdo a la evidencia experimental, la fábrica del suelo juega un papel influyente en la etapa de la caída post-pico de la arcilla. Resumiendo, la resistencia residual¹⁴ depende del porcentaje de partículas de arcillas (Skempton, 1964; Lupini et al, 1981), de la composición mineralógica (Kenney, 1967) y no a las tensiones que haya sufrido el suelo en su historia geológica. En suelos arcillosos procedentes de Java, Indonesia, compuestos por minerales de arcilla de Halloysita y alofana y compactados en laboratorio, Wesley (1977) reporta en resistencia residual (en corte anular) ángulos de fricción interna (ϕ_r) de 24.5° en suelos con fracción arcillosa de 83%. La fracción arcillosa (< 2 μm) en nuestro suelo es de 79%. La humedad de compactación del suelo analizado por Wesley es de 50%, la humedad de compactación empleada en este estudio es de 49.5%. En la Tabla 4 se muestran las condiciones del suelo ensayado y en la Figura 12 se dibujan las envolventes de falla en resistencia de pico y residual.

12 La confiabilidad del ensayo de corte anular, en la obtención de los parámetros de resistencia residual, consiste en la característica del ensayo de que la superficie de falla se mantiene constante en todo el proceso de ensayo, como sucede en la naturaleza.

13 La resistencia de punta se ve severamente afectada por la presencia de fisuras o grietas en la masa arcillosa, dado que estas actúan como planos de debilitamiento (Skempton, 1964).

14 Cuando la reorientación de las partículas se concluye, a lo largo de grandes desplazamientos, la resistencia permanece constante en el valor residual (Skempton, 1985).

Tipo de ensayo	Condiciones de ensayo	Contenido de humedad %	Índice de huecos -	Densidad seca gr/cm³	Presión de compactación kPa
Corte directo	Inundado Consolidado Rotura lenta	39.83	1.1	1.29	477.0
Corte anular	Inundado Consolidado Rotura lenta	49.5	1.31	1.2	-

TABLA 4. Condiciones del suelo y de ensayo.

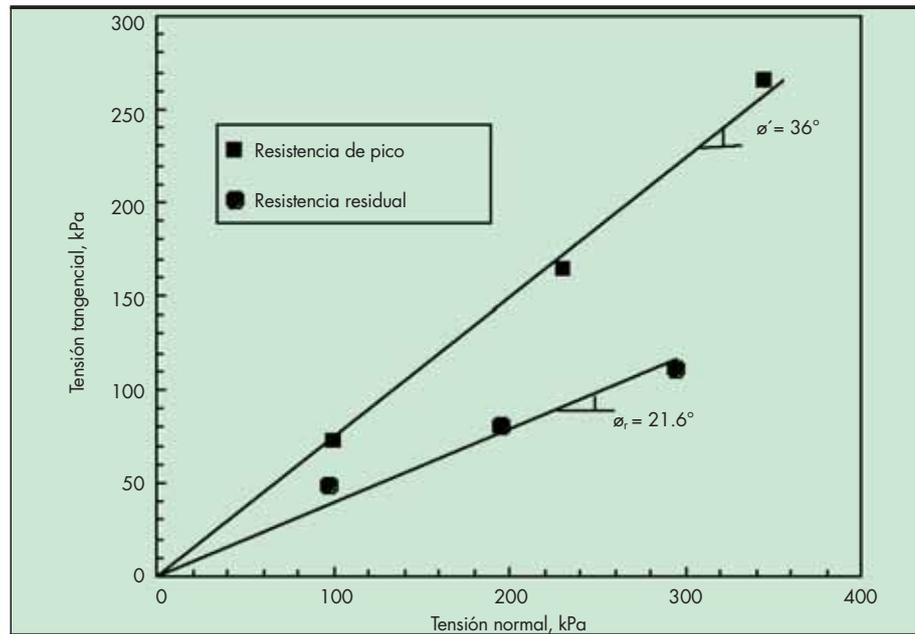


FIGURA 12. Envolventes de falla en resistencia de pico y residual.

5.3. DEFORMABILIDAD

Se ensayaron cuatro probetas para montarse en la célula edométrica (o edómetro de succión controlada¹⁵), con objeto de observar su deformabilidad ante el incremento de tensiones verticales y con succión constante de 539.33 kPa, la primera, fue en estado natural (M-td), otra se compactó con carga estática con densidad y humedad natural (M-td1) y las dos restantes se compactaron con la humedad y densidad del ensayo Proctor normal, pero una se compactó con

carga estática por una cara (M-td3) y la otra por impactos (M-td2); de tal forma que se tiene tres fábricas del suelo: una oolítica; representada por el estado natural de la arcilla, floculada; creada por la compactación por carga estática y una fábrica tendiente a la dispersa, con agregados sin dispersar; creada por la compactación por impactos.

Puede apreciarse en la Figura 13 como influye el tipo de fábrica en la deformabilidad de la arcilla. La probeta de arcilla inalterada (M-td) y la compactada por carga estática con humedad natural (M-td1), presentan menor variación volumétrica¹⁶ ante la aplicación de las tensiones verticales,

15 El edómetro de succión controlada fue desarrollado en el actual Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, de Madrid (Escario, 1967). Con lo que se consigue en el edómetro de succión controlada es aplicar la técnica de traslación de ejes que aplicó Hilf (1956), para medir la presión de agua en los poros del suelo.

16 Entiéndase a la variación volumétrica, a la diferencia del índice de huecos e_{v1} para el primer incremento de tensión vertical y e_{v2} que corresponde a una tensión vertical máxima aplicada a la probeta.

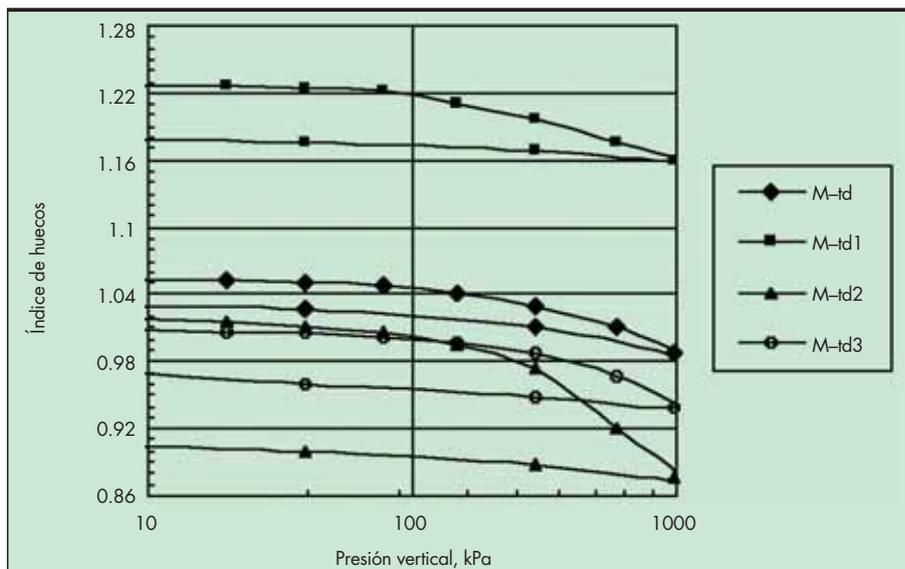


FIGURA 13. Influencia de la fábrica en la deformabilidad de la arcilla, bajo presión de succión constante.

Probeta	Condiciones de la probeta	W %	ρ gr/cm ³	e_o -	e_{min} -	Δe -	I_L -	E_m kPa	C_c -
M-d	Inalterada	43.5	1.21	1.05	0.987	0.065	0.12	30,142.7	0.073
M-d1	Compactación por carga estática, con humedad natural	43.4	1.20	1.22	1.16	0.06	0.11	42,365.0	0.068
M-d2	Compactación por impactos, densidad y humedad Proctor normal	43.0	1.25	1.017	0.876	0.141	0.10	14,279.1	0.185
M-d3	Compactación por carga estática, con densidad y humedad Proctor normal	41.5	1.24	1.01	0.939	0.071	0.08	28,140.7	0.69

w: contenido de humedad; ρ : densidad seca; e: índice de huecos; I_L índice de fluidez; E_m : módulo edométrico; C_c : índice de compresión

TABLA 5. Deformabilidad volumétrica bajo influencia de la fábrica en ensayo edométrico con succión constante.

que las otras dos. La probeta compactada por impactos, con densidad y humedad de las condiciones del ensayo Proctor normal (M-dt2) es la que presentó mayor variación volumétrica ante la aplicación de tensiones verticales, que la probeta compactada con las mismas condiciones (M-dt3).

Las condiciones de los ensayos se muestran en la tabla 5. Como se desprende de esta tabla, la fábrica de la arcilla en estado natural presenta menor deformabilidad que la creada por impactos.

En adición de lo dicho anteriormente, se investigó la sensibilidad (S_t) de la arcilla, considerando la relación de la resistencia no drenada en estado natural y amasada, en igual contenido de humedad que en estado natural, y se estimó un valor promedio de 2.42, que corresponde a una susceptibilidad “moderadamente susceptible”, valor típico de suelos fuertemente consolidados (Jiménez salas y De Justo, 1975), suelos que en su historia geológica han estado a tensiones mayores que en el momento en que se analizan. Los valores del grado de sobreconsolidación OCR, de estas muestras inalteradas, están por arriba de la unidad, valores que denotan sobreconsolidación de la arcilla volcánica. Los suelos con altos valores de S_t , como las arcillas rápidas, suelen tener fábricas abiertas e inestables; nuestra arcilla, en estado natural, presenta una fábrica cerrada tipo oolítica, con partículas asociados cara-cara. Por lo expuesto por Terzaghi et al (1996), se infiere que los suelos con un índice de fluidez (I_L) mayor que la unidad pueden ser muy susceptibles. Para la arcilla que se estudia (en estado natural), el índice de fluidez es menor que la unidad (Ver Tabla 5), valores próximos a cero.

6. CONCLUSIONES

De lo expuesto en este trabajo se pueden derivar muchas conclusiones, pero el espacio aquí requiere brevedad, por tanto, presentaremos las más importantes, a saber:

- La formación y morfología de la Cuenca de Xalapa es el resultado de una fuerte actividad volcánica, desarrollada en el Cuaternario y compuesta por materiales volcánicos básicos. La litología del lugar está representada por grandes depósitos de arcillas (cenizas), depósitos de arenas pumíticas, lavas y basaltos andesíticos. Por otro lado, el clima de la región lo condiciona la fisiografía y el efecto antrópico.
- Según la Figura 2, los depósitos de cenizas están constituidos por arcillas de color café rojizo, de consistencia firme (de 20 a 40 golpes en ensayos SPT).

- De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos con el aparato de rayos-X de difracción, el difractograma correspondiente detectó haloysita y alofana como minerales constituyentes de la arcilla volcánica y los componentes químicos de estos minerales son el aluminio, el silicio, y en menor medida, el magnesio, cobre y hierro (ver Figuras 3 y 4).
- El contenido de materia orgánica en la arcilla es prácticamente nulo y no existe presencia de carbonatos en la matriz arcillosa, lo cual indica que los enlaces entre partículas son de naturaleza puramente eléctrica o se encuentre soldadas entre si. Por otra parte, la arcilla volcánica tiene un pH de 5.6, valor característico de arcillas compactas, sobreconsolidadas y formadas en depósitos continentales. Bajo estas condiciones, *el tipo de contactos entre las partículas es cara-cara*, imperando las fuerzas repulsivas entre las partículas y adquiriendo un arreglo orientado.
- Los factores que mayor influyen, en los resultados para identificar las características reales de estos suelos volcánicos son: la presencia de agregados fuertemente apilados (partículas soldadas entre si), que presentan dificultad para disgregarse en el ensayo de análisis granulométrico y por otro lado, la disminución del espacio basal de la haloysita hidratada, producida por el secado previo a los ensayos para determinar los límites de consistencia (ver Figuras 5 y 6). Otro factor que incide, pero en menor medida, en los resultados para identificar la plasticidad de estos suelos es la estructura indefinida del mineral de alofana. Por tanto, la clasificación de la arcilla volcánica de acuerdo con el SUCS es CH, es decir, arcilla de alta plasticidad.
- De acuerdo con las observaciones llevadas a cabo con el MEB, la caracterización de la fábrica que presenta la arcilla en estado natural, corresponde a una fábrica total anisótropa (Yong y Warkentin, 1975). Por consiguiente, **el tipo de microfábrica de la arcilla analizada es de tipo oolítica o nodular**. Los conectores se encuentran unidos por agregados dispuestos cara-cara (ver Figura 8b).
- La arcilla *compactada por amasado* (Harvard miniatura) presenta una fábrica anisótropa, caracterizada por agregados constituidos por partículas orientadas y dispuestas en paralelo y agregados dispuestos en paralelo (Figura 9a). La arcilla *compactada por impactos* (Proctor normal) exhibe una fábrica isotrópica. Las partículas se encuentran orientadas cara-cara en los agregados y éstos se encuentran dispuestos dentro de la matriz arcillosa al azar (Figura 9b). Los macroporos son más pequeños en la arcilla

compactada por amasado, que en la arcilla compactada por impactos, pero en ambos métodos de compactación se manifiestan los agregados compuestos por partículas dispuestas cara-cara. El procedimiento de compactación influye en el arreglo de las partículas. El método de compactación por amasado proporciona una mayor orientación de los agregados, que el de compactación por impactos. Lo anterior se puede corroborar en las microfotografías de las Figuras 9a y 9b y en las curvas densidad máxima-humedad mostradas en la Figura 10. El tratamiento de las muestras antes de ser compactadas, influye en los resultados de los ensayos de compactación (ver Figura 11).

- Se distinguió que el porcentaje de partículas arcillosas y la mineralogía de la arcilla volcánica influyó en la resistencia residual. Suelos reportados por Wesley (1977), con mismas características mineralógicas y con casi el mismo contenidos de finos arcillosos que la arcilla volcánica de Xalapa, tienen ángulos de fricción muy similares a los obtenidos en este estudio (ver Figura 12). La diferencia de la forma del mineral de la halosita (forma tubular) y la alofana (forma laminar) que constituye la arcilla volcánica, influye en la reorientación de las partículas en la etapa de falla post-pico.
- En ensayos bajo succión constante y variación de la tensión vertical, el tipo de fábrica (estado natural y compactado) influye en la deformabilidad de la arcilla volcánica (ver Figura 13 y Tabla 5).

7. RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Los ensayos físico-químicos y geotécnicos fueron realizados en el Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento Español, y el análisis de microscopía de transmisión se realizó en el Centro de Microscopía Electrónica "Luis Brú, de la Universidad Complutense, de Madrid, España. La microscopía electrónica de barrido fue realizada en el Instituto de Ecología, A. C. de Xalapa, México. Doy mi agradecimiento al Dr. Jesús Sáez Auñón por sus consejos para la buena orientación de los ensayos geotécnicos. Agradezco también, al Ing. Juan Francisco Capallera Cabada la revisión crítica del texto de este trabajo.

8. REFERENCIAS

- BATTEY, M. H. Y PRING, A. (1997). *Mineralogy for students*. Hong Kong: Longman.
- ESCARIO, V. (1967). Measurement of the swelling characteristics of a soil fed with water under tension. *Int. Cooperative Research on the Prediction of moisture Content under road Pavements*. (paper).
- ESCARIO, V. (1967). Measurement of the swelling characteristics of a soil fed with water under tension. *Int. Cooperative Research on the Prediction of moisture Content under road Pavements*. (paper).
- BISHOP, A. W., GREEN, G. E., GARGA, V. K., ANDRESEN, A. Y BROWN, J. D. (1971). A new ring apparatus and its application to the measurement of residual strength, *Geotechnique* 21, No. 4, 273-328.
- DUBROEUCQ, D., GEISSERT, D., BAROIS, I. Y LEDRU, M-P. (2002). Biological and mineralogical features of andisols in the Mexican volcanic highlands. *Catena* 49, 183-202.
- FISHER, R. V. (1961). Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks. *Geological Society of American Bulletin*, Vol. 72, 1409-1414.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. (1979). *Influencia de la génesis, mineralogía y fábrica en las propiedades geotécnicas de los suelos volcánicos de La Laguna (Tenerife)*. Madrid: Tesis doctoral, UCM.
- GONZÁLES DE VALLEJO, L., FERRER, M., ORTUÑO, L. Y OTEO, C. (2000). *Ingeniería geológica*. Madrid: Prentice-Hall.
- HILF, J. W. (1956). An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. *Tech. Memorandum 654*. USA: Bureau of Reclamation.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (1987). *Carta Estatal Geológica y fisiográfica. Escala 1:1 000 000*. México: INEGI.
- JIMÉNEZ SALAS, J. A. (1963). Note on a halloysite red clay from Fernando Poo Island. *3rd Reg. Conf. Africa on soil mech. F. Eng.*, 1: 85-88.
- JIMÉNEZ SALAS, J. A. Y DE JUSTO, J. L. (1975). *Geotecnia y cimentaciones, Propiedades de los suelos y de las rocas*. Madrid: Editorial Rueda.
- KENNEY, T. C. (1967). The influence of mineral composition on the residual strength of natural soil, *Proc. Of the Geotech. Conf. on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks*, Oslo, Vol. I, 123-129.
- LAMBE, T. W. (1953). The structure of inorganic soil. *Jl. Of the Soil Mech. and Foun. Div. ASCE* Vol. 79, No. 315.
- LAMBE, T. W. (1958). The structure of compacted clay. *Jl. of the soil mech. and Foun. Div. Proc. Of the ASCE (Proc. Paper 1654)*. 1-34.
- LAMBE, T. W. (1959). Physico-chemical properties of soils: role of soil technology. *J. of the Soil Mech. and found. Div. ASCE*, Vol. 85, No. SM 2, 55-70.
- LAMBE, T. W. Y WHITMAN, R. V. (1975). *Mecánica de suelos*. Traducción de Jiménez Salas, J. A. México: Editorial Limusa.
- LENZ, O. (2004). *Influencia de la fábrica de las arcillas volcánicas de la Ciudad de Xalapa en su comportamiento geotécnico*. Madrid: Tesis doctoral, UPM.
- LUPINI, J. F., SKINNER, A. E. Y VAUGHAN, P. R. (1981). The drained residual strength of cohesive soils, *Geotechnique*, 31, No. 2, 181-213.
- MARSAL, R. J. Y RESÉNDIZ, D. (1975). *Fundamentos del diseño y construcción de presas de tierra y enrocamiento*. México: Editorial Limusa.
- MITCHELL, J. K. (1993). *Fundamentals of soil behavior*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- NEWILL, D. (1961). A laboratory investigation of two red clays from Kenya. *Geotechnique* 11, No. 4, 302-318.
- PROCTOR, R. R. (1933). Fundamentals principles of soil compaction (first of four articles on the design and construction of rolled-earth dams). *Eng. News-Record*, 9, 111, 245-248.
- QUANTIN, P Y GEISSERT, D (1982). *Características químicas y mineralógicas de un andosol y de un suelo ferralítico de Xalapa, México*. Xalapa, México: Boletín del Instituto Nacional de Investigaciones sobre recursos Recursos Bióticos. (paper).
- SIEFFERMANN, G. Y MILLOT, G. (1969). Equatorial and tropical weathering of recent basalt from Cameroon: Allophones, halloysite, methahalloysite, kaolinite and gibbsite. *Proc. Of the International Clay Conference. Tokio, Japan*. 417-428.
- SKEMPTON, A. W. (1953). The colloidal activity of clays. *Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech.*, 1, 57-61.
- SKEMPTON, A. W. (1964). Long-term stability of clay slope, *Geotechnique* 14, No 2, 77-102.
- SKEMPTON, A. W. (1985). Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Geotechnique* 35, No. 1, 3-18.
- TERZAGHI, K. (1958). Design and performance of the Sasumua Dam (with appendix: A mineralogical analysis of Sasumua Clay, by R.H. S. Robertson). *Proc. Inst. Civ. Engrs*. Vol. 9, 369-394.
- TERZAGHI, K., PECK, R. B. Y MESRI, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. USA: John Wiley & Sons, Inc. Third edition.
- TSIGE, M. (1999). Microfábrica y mineralogía de las arcillas azules del Guadalquivir: influencia en su comportamiento geotécnico. Madrid: CEDEX.
- VARGAS, M. (1985). The concept of tropical soils. *First Int. Conf. On Geomech. in Tropical Lateritic and Saprolitic soils. Brazilian Soc. for Soil Mech.* Vol. 3, 101-134.
- WILSON, S. D. (1958). Suggested method of test for moisture-density relations of soil using Harvard compaction apparatus. *Proc. For testing soil, ASTM, Filadelfia*, 133-135.
- WESLEY, L. D. (1977). Shear strength properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. *Geotechnique* 27, No.2, 125-136.
- YONG, R. N AND WARKENTING, B. P. (1975). *Soil properties and behaviour*. Amsterdam: Elsevier scientific Publishing Company. cap. 2, 3.

DIRECCIÓN GENERALDirector General: **Ángel Aparicio Mourelo**Calle de Alfonso XII, 3
28014 MADRID

- Telf.: 913 357 500
- Télex: 45022 CEDEX E
- Fax: 915 280 354

GABINETE TÉCNICODirectora: **Lucía Beloqui Urmeneta****SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PROGRAMACIÓN
TÉCNICA Y CIENTÍFICA**Subdirector General: **Manuel Echeverría Martínez****CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS**Director: **José María Grassa Garrido**Calle Antonio López, 81 • 28026 MADRID
Telf.: 913 357 700 • Fax: 913 357 622**CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS**Director: **Juan Manuel Ruiz García**Paseo Bajo de la Virgen del Puerto, 3 • 28005 MADRID
Telf.: 913 357 900 • Fax: 913 357 922**CENTRO DE ESTUDIOS DEL TRANSPORTE**Director: **Alberto Compte Anguela**Autovía de Colmenar Viejo, km 18,2
28049 El Goloso (MADRID)
Telf.: 913 357 800 • Fax: 913 357 822**CENTRO DE ESTUDIOS DE TÉCNICAS APLICADAS**Director: **Antonio Sánchez Trujillano**Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID
Telf.: 913 357 200 • Fax: 913 357 249— **GABINETE DE FORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN**Directora: **Isabel Vilches Dueñas**Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID
Telf.: 913 357 307 • Fax: 913 357 314**LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS
Y MATERIALES**Director: **Rafael Astudillo Pastor**Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID
Telf.: 913 357 400 • Fax: 913 357 422**LABORATORIO DE GEOTECNIA**Director: **Fernando Pardo de Santayana Carrillo**Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID
Telf.: 913 357 300 • Fax: 913 357 322**CENTRO DE ESTUDIOS HISTÓRICOS DE
OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO (CEHOPU)**Gerente: **Amparo Precioso de Murga**Calle de Zurbano, 7 • 28010 MADRID
Telf.: 913 489 800 • Fax: 913 489 816