



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Ingeniería y Morfología del Terreno

Influencia de la fábrica de las arcillas volcánicas de la Ciudad de Xalapa en su comportamiento geotécnico

OSCAR DE J. LENZ HERNÁNDEZ

INGENIERO CIVIL, UNIVERSIDAD VERACRUZANA

DIRECTOR: CARLOS OTEO MAZO

DOCTOR INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Madrid, 2004



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID

D. 12

Tribunal nombrado por el Mgfc. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ..15.. de ...JULIO..... de 200..4

Presidente D. ALCIBIADES SERRANO GONZALEZ
Vocal D. ALBERTO FOYO MARCOS
Vocal D. LUIS GONZALEZ DE VALLEJO
Vocal D. JUAN CARLOS HERNANDEZ DEL POZO
Secretario D. LUIS FORT LOPEZ-TELLO

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día ..7.. de ...OCTUBRE.... de 200..4

en la *E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la U.P.M.*

Calificación:Sobresaliente cum laude.....

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

In memórium a Flora Hernández y Alfredo Lenz

... There were few refinements, and no elaborate computer modelling to be "validated" by exotic remote-reading sensors. These refinements are not the essence of the observational method. They have their place but they should not deflect attention and resources from the essence of the method.

... Existían pocos refinamientos y ningún modelo de computadora elaborado para ser validado ante los exóticos sensores remotos de lectura. Estos refinamientos no son la esencia del método observacional. Los métodos analíticos tienen su valor, pero ellos no deben desviar la atención y recursos por la esencia del método observacional.

R. B. Peck*, 2000

Geotech. Engng. 149, 2. p. 71-74

*Cuando Pablo Giroault, en la II Conferencia Internacional Nabor Carrillo, le preguntó al profesor R. B. Peck de cómo debían ser los modelos matemáticos y experimentales en el campo de la geotecnia, el profesor Peck contestó: "Simples y sencillos, para que sean representativos de la naturaleza. Los modelos experimentales complejos, de ninguna manera representan el comportamiento del suelo".

AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS

Como este trabajo se realizó a trote entre dos países (México y España) y requirió del apoyo de varias instituciones y las instituciones están constituidas por muchos individuos, es larga la lista de agradecimientos, pero éstos se tendrán que realizar al estilo ingenieril para abreviar, esto es, utilizando un listado que en lo más mínimo menoscaba el sentido de gratitud hacia las personas que me ayudaron en este trabajo, a saber:

- Le agradezco a D. Carlos Oteo Mazo por aceptar la dirección de este trabajo y las consideraciones hacia mi persona.
- A D. Vicente Cuéllar y D. Claudio Olalla por su apoyo y confianza.
- A D. Jesús Sáez por apoyarme en todo momento en el desarrollo de mi trabajo experimental y por sus valiosos consejos en materia experimental y conceptual.
- A los compañeros José Luis Miranda, María Eugenia Martín, Jesús Hervás, Rafael Rodríguez, Clemente Áreas, José Luis Gómez, José Toledo, Manuel Pintado; todos ellos colaboradores del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX y poseedores de una experiencia profesional invaluable que contribuyó al desarrollo del trabajo experimental.
- A la Dra. Cristina de Santiago, le tengo que agradecer el haberme encaminado hacia el maravilloso mundo de la mineralogía y la microscopía.
- Sin el profesionalismo y la responsabilidad de Da. Encina Polo, encargada de la Biblioteca de Geotecnia del Laboratorio de geotecnia del CEDEX (Biblioteca Alejandrina de la geotecnia), que me facilitó toda bibliografía solicitada, este trabajo difícilmente hubiera podido presentar el estado del arte y la concertación de los argumentos para sustentarlo.
- Gratitud a Da. Conchita García (víctima de mi tozudez), encargada de la Biblioteca de la Escuela de Caminos de la UPM, que me apoyó en el acopio bibliográfico.
- Al Ing. José Antonio Palacios, encargado del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Veracruzana (Veracruz, México), por el apoyo y facilidades para la realización de los trabajos de campo complementarios y los primeros ensayos de laboratorio de este trabajo. A los Ingenieros Guadalupe Riquer Trujillo y Francisco Williams Linera, del Instituto de Ingeniería, por todo su apoyo.

- A Da. Eva Salazar Guevara, administradora de la Dirección General de Postgrado y Vinculación y al Ing. Salvador Tapia, coordinador del programa PROMEP de la Universidad Veracruzana, por apoyarme en todo lo relacionado con la gestión de mi beca.
- A Da. Milagros Martínez y D. Manuel Recuero, ambos del Departamento de Relaciones con Latinoamérica de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), por el apoyo y la gestión administrativa ante la UPM.
- Eterno agradecimiento al Dr. Daniel Geissert Kientz por facilitarme el acceso al Laboratorio de Microscopía del Instituto de Ecología, A. C. (IEAC) de Xalapa, Ver. y por sus comentarios a la parte concerniente a clasificación del suelo y geología de la región de este trabajo. Al Dr. Guillermo Ángeles le debo agradecer la confianza y las facilidades para acceder al laboratorio de Anatomía Vegetal del IEAC, circunstancia que permitió preparar las muestras para el análisis en el microscopio electrónico de barrido. Al Sr. Tiburcio Larios se le reconoce su pericia y profesionalismo en el desarrollo de la campaña de las tomas de microfotografías, con el microscopio electrónico de barrido. Al Mtro. Gonzalo Castillo Campos por sus consideraciones en la gestión administrativa.
- A D. Luis Puebla, director del laboratorio de Microscopía "Luis Brú", le agradezco su comprensión, pues gracias a ello me permitió el libre acceso a las instalaciones del referido laboratorio y se pudo complementar toda la microscopia electrónica de transmisión de este trabajo. A Adrián por su paciencia y valioso apoyo en el trabajo de microscopia de transmisión.
- A D. Luis Carlos Otero Díaz (entusiasta investigador), del Departamento de Química Inorgánica de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), por su valioso apoyo para acceder al Centro de Química Orgánica " Manuel Lora-Tamayo" del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), para determinar la superficie específica de las partículas. Sus comentarios en materia de investigación fueron muy alentadores y significativos para seguir adelante con la presente investigación. De la misma Facultad de Química, quiero agradecer a Julián Velázquez Cano por su apoyo para la determinación del difractograma de rayos-X.
- Al Dr. Andrés Rodríguez Díaz y al doctorando Juan López Valentín, del Centro de Química Orgánica " Manuel Lora-Tamayo" del CSIC, les agradezco las facilidades para determinar la superficie específica de las arcillas.
- Reconocimiento a Da. Concepción Bujalance Muñoz por maquetar el texto de este trabajo y a su paciente labor de corrección del mismo.
- Y por último, el agradecimiento capital: a mis hijas Ingrid, Ana y Elsbeth, por apoyarme moralmente y prestarme el tiempo para realizar este proyecto de trabajo, que implicó casi 5 años de ausencia mexicana. Tiempo irremisible que no se podrá pagar.

INDICE GENERAL

Resumen	15
Abstract	16
1. Introducción	17
1.1. Planteamiento	17
1.2. Estado del conocimiento	19
1.2.1. Introducción	19
1.2.2. Bosquejo histórico y aportaciones	23
1.2.3. Propiedades geotécnicas de algunos suelos tropicales	41
1.3. Objetivos	43
1.4. Alcances del presente estudio	44
2. Conceptos teóricos básicos	47
2.1. Mineralogía de las cenizas volcánicas	47
2.1.1. Concepto de mineral de arcilla	47
2.1.2. Minerales que predominan en las arcillas volcánicas	48
2.2. Sustitución isomórfica e intercambio catiónico	50
2.3. Superficie específica	51
2.4. Interacciones entre las partículas	53
2.5. Diferencia entre fábrica y microestructura	55
2.6. Problemática en arcillas volcánicas	58
3. Las arcillas volcánicas de la Cuenca de Xalapa	61
3.1. El Eje Neovolcánico	61
3.2. La Cuenca de Xalapa	64
3.3. Rasgos geomorfológicos	65
3.4. Litología del lugar	68
3.5. Rasgos climáticos e hidrológicos	70
3.6. Sismicidad	71
3.7. Aspectos a considerar de la geología del lugar	72

4. Metodología de Investigación	75
4.1. Introducción	75
4.2. Descripción de los trabajos de campo	77
4.2.1. Ampliación de los trabajos de campo	81
4.2.2. Estratigrafía identificada en los trabajos de ampliación	82
4.3. Instituciones donde se llevaron a cabo los ensayos de laboratorio	83
4.4. Análisis físico-químico	85
4.4.1. Determinación del contenido de sulfatos	85
4.4.2. Determinación del contenido de materia orgánica	85
4.4.3. Determinación del pH	86
4.4.4. Determinación del contenido de carbonatos	86
4.4.5. Agua adsorbida e inter-lámina	86
4.5. Técnicas utilizadas en el análisis mineralógico y de fábrica	86
4.5.1. Difracción de rayos-X	86
4.5.2. Microscopía electrónica de transmisión	87
4.5.3. Microscopía electrónica de barrido	87
4.6. Ensayos de identificación y clasificación	90
4.6.1. Normativa que se utilizó	90
4.6.2. Contenido de humedad	90
4.6.3. Límite líquido, plástico y de retracción	90
4.6.4. Análisis granulométrico	91
4.6.5. Densidad relativa de las partículas	91
4.6.6. Densidad del suelo	91
4.7. Estudios geotécnicos	91
4.7.1. Procedimientos de compactación utilizados	91
4.7.2. Ensayo con la máquina de corte directo y anular	92
4.7.3. Ensayo de compresión triaxial	93
4.7.4. Permeabilidad	93
4.7.5. Ensayo de deformabilidad en el edómetro estándar y célula edométrica	93
4.7.6. Ensayos de succión	94
4.7.7. Ensayo de hinchamiento libre y presión de hinchamiento	95
5. Identificación de la arcilla volcánica	97
5.1. Constituyentes mineralógicos	97
5.1.1. Difracción de rayos-X	97

5.2. Características físico-químicas	97
5.2.1. Espectroscopía de dispersión de energía de rayos-X	97
5.2.2. Intercambio catiónico	99
5.2.3. Contenido de materia orgánica	99
5.2.4. pH en el suelo	102
5.2.5. Contenido de carbonatos	102
5.2.6. Superficie específica de las partículas de arcilla	102
5.3. Propiedades índice	103
5.3.1. Granulometría	103
5.3.2. Límites de consistencia y humedad natural	106
5.3.3. Actividad coloidal	110
5.3.4. Densidad y peso específico	110
5.4. Clasificación	111
6. Microfábrica	113
6.1. Antecedentes	113
6.1.1. Factores que determinan la fábrica de un sedimento	113
6.1.2. Niveles de fábrica y tipos de poros	114
6.1.3. Caracterización de la fábrica	117
6.1.4. Manifestación de la estructura	118
6.1.5. Factores que gobiernan la resistencia y deformabilidad de los suelos	119
6.2. Morfología de las partículas que constituyen la arcilla volcánica	120
6.3. Fábrica de la arcilla volcánica	126
6.3.1. Fábrica en estado natural y en el límite de retracción	126
6.3.2. Aspectos de la fábrica de la arcilla meteorizada	127
6.4. Fábrica de la arcilla compactada	129
7. Comportamiento Geotécnico	131
7.1. Compactación	131
7.1.2. Compactación por impactos y por amasado	133
7.1.2.1. Influencia de la energía de compactación	133
7.1.2.2. Influencia del procedimiento de compactación	134
7.1.2.3. Influencia del tratamiento de las muestras en la compactación	135
7.2. Resistencia y deformación	136
7.2.1. Ensayos de corte	136

7.2.1.1. Corte directo con rotura rápida, sin inundar y sin consolidar	138
7.2.1.2. Corte directo con rotura rápida, inundado y consolidado	142
7.2.1.3. Corte directo con rotura lenta, inundado y consolidado	143
7.2.1.4. Ensayo de corte anular con rotura lenta, inundado y consolidado . . .	145
7.2.1.5. Comparación de resultados	145
7.3. Compresión triaxial	148
7.3.1. Ensayos en la cámara triaxial	148
7.3.2. Resistencia al corte sin drenaje	149
7.3.2.1. Influencia de la humedad natural en la resistencia al corte sin drenaje	149
7.3.2.2. Ensayo UU en arcilla inalterada	150
7.3.2.3. Ensayo UU en arcilla compactada por impactos	152
7.3.2.4. Ensayo UU en arcilla compactada por amasado	152
7.3.2.5. Influencia de las fisuras en la rigidez de la arcilla en estado natural .	152
7.3.2.6. Comportamiento tensión-deformación en arcilla en estado inalterado y compactado	154
7.3.3. Ensayo consolidado-no drenado en arcilla compactada por impactos	157
7.3.4. Ensayo consolidado-drenado en arcilla compactada por impactos	159
7.3.5. Permeabilidad en arcilla compactada por impactos	160
7.3.6. Consolidación bajo compresión isotrópica	160
7.4. Deformabilidad	161
7.4.1. Deformabilidad determinada en edómetro convencional y de succión controlada	162
7.4.2. Hinchamiento	166
7.5. Succión	169
7.5.1. Succión inicial	169
7.5.2. Curvas características succión-humedad	171
8. Conclusiones y recomendaciones	173
8.1. Conclusiones	173
8.2. Recomendaciones para futuras investigaciones	177
Bibliografía	179

RESUMEN

Las arcillas volcánicas de la Ciudad de Xalapa (México) se vienen estudiando sistemáticamente desde el año 1982, pero a raíz del crecimiento acelerado de desarrollos urbanos en los años 90, en áreas con topografía accidentada, se han tenido fallas de taludes a consecuencia de desmontes que han puesto en peligro edificios, casas habitación y cajas reguladoras de agua potable.

Estas arcillas preconsolidadas, presentan un comportamiento inestable en el periodo de lluvias y en periodos de sequía, manifiestan agrietamiento en superficies de terreno natural y en los taludes expuestos a la intemperie el material arcilloso se desgrana. Son susceptibles a la erosión hídrica.

Los conceptos teóricos básicos presentados, permitieron hacer la diferencia entre el concepto de microestructura y microfábrica de los suelos arcillosos.

Basándose en los rasgos geológicos de la Cuenca de la Ciudad de Xalapa, pudo identificarse que los factores geoambientales que más influyen en el comportamiento de las arcillas son los cambios climáticos, como el régimen de lluvias y los cambios de temperatura ambiente, que incide en las características de resistencia del suelo, por otra parte, el factor sísmico de la región es una componente de menor influencia en dicho comportamiento.

El trabajo de investigación presenta aspectos peculiares de la fábrica en este tipo de suelos volcánicos, que hasta la fecha no habían sido estudiados con profundidad. El estudio de la microestructura de la arcilla permitió comprender el comportamiento tensión-deformación y deformabilidad que exhiben estos suelos cuando se les somete a tensiones. Por otra parte, la identificación de la composición mineralógica de las arcillas volcánicas hizo posible entender el comportamiento del suelo en la etapa post-pico de resistencia residual. El tipo de interacciones entre las partículas, que constituyen estos suelos, fue identificado gracias a la caracterización físico-química que se llevó a cabo.

Gracias a la caracterización físico-química y mineralógica llevada a cabo se consiguió interpretar y clasificar a este tipo de arcillas, que en la mayoría de los casos son de difícil interpretación e identificación.

Los estudios de microscopía electrónica de transmisión y de barrido permitieron identificar la morfología de las partículas y la fábrica del suelo respectivamente.

Resumiendo, la identificación de la fábrica (ya sea en estado inalterado y compactado de la arcilla), caracterización físico-química y mineralógica, permitieron dilucidar la manifestación de la microestructura del suelo y cómo influye ésta en el comportamiento geotécnico, que es el objetivo primordial de este trabajo.

El desarrollo de la tesis cuenta con una relación del estado del conocimiento, marco conceptual, ambiente geológico de formación de las arcillas volcánicas, descripción de la metodología de investigación, caracterización mineralógica, físico-química y geotécnica y por último, presentación de las conclusiones que se derivan del trabajo y recomendaciones para el desarrollo de futuras líneas de investigaciones.

ABSTRACT

The volcanic clay in Xalapa city (México) are under study since 1982, but by the fast grown up of the urban development in the difficult topografic areas they are slop fault like consecuense of the dismounts they have under danger the buildings houses and the drinking water equipments .

This clays preconsolidates since her deposition show inestable behave in the rain period and in the droughth periods show crack in the natural surface of the land and in the slops exposed aut in the open , the cray material brake up they are suceptible to the hidric erotion.

In acording with the tecnicall literature the Xalapas's clay just have characterizes in the geo-tecnical area, but never never studied the fabric.

With this tesis I expect to find the correlation between the fabric and the geotecnicall caracte-ristics. Also I want to research the changes before the climatic changes.

1. Introducción

1.1. PLANTEAMIENTO

En sus inicios, la mecánica de suelos se avocó a analizar los suelos saturados (suelo bifásico), estos suelos planteaban serios problemas de deformabilidad y resistencia al corte ante sollicitaciones externas. Abunda la literatura técnica, con enfoques analítico como empírico, sobre estos suelos. Los depósitos sedimentarios fueron escenarios típicos para estudiar los suelos saturados, estos depósitos por lo regular, se encuentran dentro de un clima templado. Las arcillas de Londres, Leda de Canadá y las azules de Boston, fueron estudiadas de una manera profusa y representan ejemplos clásicos dentro de la mecánica de suelos del siglo XX. Otro aspecto que coadyuvo al desarrollo del estudio de estos suelos bifásicos, es que los depósitos sedimentarios se encontraban en porciones geográficas ocupadas por países desarrollados. Hasta hace más de medio centenar de años, se viene estudiando sistemáticamente las arcillas sedimentarias de origen volcánico del Valle de México, y las arcillas fuera de este entorno geológico no se han estudiado con profundidad, sobre todo si estos suelos son no saturados.

Mas sin embargo, no todos los depósitos de suelos que componen la corteza terrestre se encuentran en estado saturado, también existen depósitos de suelos parcialmente saturados (suelo trifásico) que están sometidos a ambientes climáticos áridos y semi-áridos, y éstos ocupan, con respecto a los depósitos compuestos por suelos saturados, una porción significativa en la superficie terrestre (Fredlund y Rahardjo, 1993). Además existen depósitos de suelos que se encuentran en ambientes con clima tropical, subtropical y ecuatorial, como es el caso de Kenya (Terzaghi, 1958), de Java (Wesley, 1974) de Brasil (Vargas, 1985), La Laguna (González, 1981), los suelos rojos de África oriental (Dumbleton, 1967), la Isla Fernando Poo (Salas, 1963) y de la Ciudad de Xalapa, México (ver Figura 3.1). La mayoría de estos suelos son de origen volcánico.

Los depósitos de piroclastos que ocupan el área metropolitana de la ciudad de Xalapa están constituida por cenizas volcánicas (volcanic ash). Las laderas están representadas por

arcillas de color marrón o rojizas no saturadas; las zonas bajas están constituidas por arcillas de color café oscuro o negras saturadas. Estos depósitos se les puede considerar como suelos transportados, por la acción de las emisiones de materiales pirocláticos provenientes de los pequeños aparatos volcánicos del lugar (González de Vallejo *et al.*, 2002).

La demanda de crecimiento de la ciudad, ha obligado a ocupar áreas compuestas por laderas con pendientes abruptas a suaves, que en algunos proyectos de desarrollo urbano ha obligado a realizar tajos al pie o a lo largo de las laderas que han inducido fallas, ocasionando amenazas contra vidas humanas y pérdidas económicas. Se tienen noticias de la ocurrencia de fallas en laderas naturales (fallas de creep) sin influencia antrópica.

Se ha observado en campo, que las arcillas que componen las laderas presentan un comportamiento inestable ante cambios climático bruscos.

En los proyectos de ingeniería que se ha requerido utilizar rellenos con las arcillas color marrón o rojizas, confinadas por estructuras de retención, éstas han inducido el colapso de las obras de retención ante cambios bruscos climáticos, es decir, ante presencia de lluvias que inducen incrementos del contenido de humedad en el suelo con el consecuente incremento de la densidad y por ende, los incrementos de las presiones horizontales.

En la literatura técnica local y en las publicaciones internacionales, no se ha encontrado un estudio amplio sobre el comportamiento geotécnico de estas cenizas volcánicas bajo la influencia de los factores ambientales y geológicos que presenta la Ciudad de Xalapa. No se ha estudiado la influencia de la fábrica de estas arcillas en el comportamiento geotécnico, ni tampoco las variables tensionales como la succión, los ciclos de histéresis en función de los cambios de humedad y la influencia del grado de saturación ante cambios bruscos de temperatura. Los estudios edafológicos realizados por el Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (Quantin y Geissert, 1982) han realizado estudios sobre los suelos del sur de Xalapa, pero lo han analizado desde el punto de vista de la edafología y han presentado resultados sobre las propiedades físico-química de las cenizas.

El que suscribe, considera que es tiempo y una necesidad de estudiar estos suelos en sus aspectos geológicos y geotécnicos más profundos y de esta forma aportar a la comunidad de la geotecnia un estudio que permita dilucidar las causas que generan las fallas de estas cenizas volcánicas.

Se espera que este estudio influya en futuras investigaciones, en donde se considere que el estudio de la fábrica y la composición mineralógica del suelo permita comprender mejor el comportamiento mecánico del suelo.

1.2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

1.2.1. Introducción

Es necesario en este estudio, iniciar este apartado con una clasificación de materiales volcanoclásticos que propone Fisher (1961), para circunscribir al suelo objeto de este estudio. El comentado autor clasifica tres tipos de sedimentos dentro de la actividad eruptiva de un volcán, a saber: autoclásticos, piroclásticos y epiclásticos.

De acuerdo a lo anterior, Fisher (1961) define a estos materiales de la siguiente manera:

- Las rocas autoclásticas son aquellos materiales de lava que se han formado dentro de las aberturas¹ volcánicas, durante el movimiento del flujo o por explosiones de gas dentro de las lavas que han dejado de fluir.
- Las rocas piroclásticas contienen fragmentos producidos por explosiones volcánicas y lanzadas hacia el exterior desde las aberturas volcánicas, en partículas separadas.
- Las rocas epiclásticas contienen fragmentos producidos por la meteorización y erosión por el solidificado o litificado de cualquier tipo de roca volcánica.

Fisher (1961) atiende a dos aspectos para su clasificación: el primero es el tamaño de las partículas y el segundo al origen primario de los fragmentos; también acepta que una simple clasificación funcional que incorpore todos los factores involucrados en el desarrollo de las rocas volcánicas es prácticamente imposible, por esta razón su clasificación la basa en los dos aspectos antes mencionados.

Como nuestro suelo se enmarca en los sedimentos volcanoclásticos lanzados hacia afuera del edificio volcánico, después son transportados por el aire y por último depositados, ya depositados entran en proceso de meteorización por los cambios de temperaturas y a la presencia de agua (presencia de lluvias intensas a moderadas) con sales. Bajo este pro-

¹Aquí Fisher se refiere, con respecto a las aberturas, a las chimeneas y grietas laterales de los edificios volcánicos.

ceso se presenta la tabla 1.1 en donde se muestra los fragmentos de tipo piroclásticos y epiclásticos atendiendo, de acuerdo a Fisher (1961), al tamaño y origen primario.

TABLA 1.1. Límites de tamaños de partículas para fragmentos epiclásticos y piroclásticos

Tamaño de partícula (mm)	Material volcanoclástico		
	Fragmentos epiclásticos	Fragmentos piroclásticos	
> 256	Bolo o canto rodado	Grueso	Bloques
256 a 64	Canto rodado	Fino	Y bombas
64 a 2	Guijarro	Lapilli	
2 a 1/16	Arena	Gruesa	<i>Cenizas</i>
1/16 a 1/256	Limo	<i>Fina</i>	
< 1/256	<i>arcilla</i>		

El suelo objeto de este trabajo, está enmarcado en los fragmentos piroclásticos, pero de tamaño menor que 0.0039 (1/256) mm (y hasta de menor tamaño) y corresponde (según Fisher, 1961) a las cenizas finas o arcillas, excluyendo a las arenas, pues como se verá en el capítulo 5, el análisis granulométrico por decantación reportó predominó de la fracción arcillosa.

Pero la arcilla en estudio no tan sólo tiene un origen volcánico, sino que también se encuentra enclavado en un ambiente tropical a subtropical, de tal manera que habrá que definir que es un suelo tropical.

La más amplia definición de suelo tropical que se encontró en la literatura técnica fue la presentada por Vargas (1985), que la define como a continuación se cita:

“El concepto de suelo tropical debe de estar basado sobre los procesos genéticos, descomposición de la roca madre, transportación de productos descompuestos por aguas calientes y evolución pedogenética de depósitos debido a condiciones climáticas tropicales y vegetación”.

El mismo Vargas comenta: no se puede afirmar, desde el punto de vista de la geotecnia, que todos los suelos que se encuentran en los trópicos son suelos tropicales, pues se cometería un abuso y se caería en error. Existen suelos que tiene las mismas características tanto en zonas tropicales, como en las zonas templadas o glaciales.

Vargas (1985) pone como ejemplos a las arenas de playa o de río, las arcillas orgánicas blandas y a los suelos de capas profundas de depósitos sedimentarios del terciario, todos estos suelos muestran las mismas propiedades mecánicas en cualquier latitud. Por tanto, los suelos tropicales no se deben circunscribir a una porción geográfica, sino aquellos suelos que se encuentren en los trópicos que muestren un comportamiento particular usados como materiales de construcción. Existe otra diferenciación que caracteriza a los suelos tropicales, y es que la intensa descomposición química (lixiviación²) de las rocas en los trópicos es el principal factor que diferencia a estos suelos de otros suelos provenientes de otras zonas. La influencia de altas temperaturas sobre las rocas oscuras (rocas que por su color son más absorbentes a los rayos solares, como los basaltos) y a las precipitaciones intensas de lluvias, hacen que se incremente la concentración de iones, todo ello hace que la descomposición de los materiales pétreos sea más rápida.

La definición que emite Vargas (1985), engloba las condiciones geológicas que influyen en el proceso de descomposición de los materiales pétreos, definición que satisface el concepto de suelo tropical y se ajusta a las condiciones ambientales en que se encuentra la arcilla objeto de este estudio.

A los suelos estudiados y publicado bajo el nombre de suelos tropicales, se les han asignado otros nombres provenientes del ámbito edafológico, como lateritas, latosoles y andosoles. También reciben el nombre de arcillas rojas y negras o simplemente arcillas tropicales. Las lateritas y los andosoles son estudiados en geotecnia. Los andosoles son suelos de origen volcánico cuya coloración va de amarillento a rojizo oscuro y se pueden desarrollar en cualquier tipo de clima. Los latosoles son suelos que necesitan un ambiente tropical para desarrollarse, y también proceden de la descomposición de rocas ígneas. La descomposición última o proceso de laterización (formación de hidróxidos y sesquióxidos) de los latosoles, es una laterita³. Las lateritas son suelos porosos (sin consolidar) que en estado natural son fáciles de cortar, pero al exponerse al medio ambiente y secarse se vuelven duros y son resistentes a los efectos de la meteorización ocasionados por el clima (Gidigasú, 1976). A finales del siglo XIX, las lateritas se reconocieron como productos provenientes de la meteorización de varias rocas ígneas, sedimentos, depósitos detríticos y cenizas volcánicas (*volcanic ash*). La identificación morfológica de estas lateritas ocurre

²Lixiviación: en geología se maneja como meteorización química.

³La palabra laterita fue introducida por primera vez por Buchanan en 1807, y deriva de la palabra latina "later", que significa ladrillo.

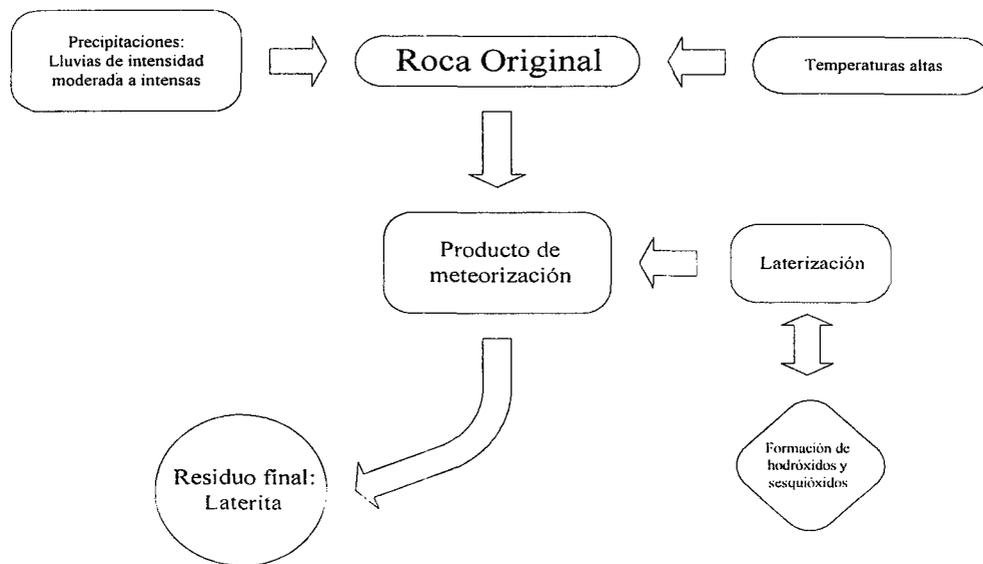


FIGURA 1.1. *Proceso de formación de las lateritas, a partir de la roca original.*

en la superficie o cerca de la superficie de depósitos que se encuentran en varias regiones tropicales y subtropicales del mundo. La presencia de hierro en las lateritas, debe considerarse como un factor importante que influye en el comportamiento geotécnico del suelo (Gidigasú, 1976). En la figura 1.1 se esquematiza el proceso de formación de las lateritas.

En resumen, las lateritas son el producto de materiales altamente meteorizados, ricos en óxido de hierro y aluminio, o ambos.

Las arcillas rojas tropicales se forman en ambientes con temperaturas relativamente altas y con lluvias que van de moderadas a intensas. Las arcillas rojas son suelos que se alojan por lo regular en las laderas o en zonas con buenas condiciones de drenaje, por el contrario, las arcillas negras se localizan en zonas con mal drenaje, mezcladas con materia orgánica. El principal mineral de las arcillas rojas es la halloysita⁴, cuando el ambiente es muy húmedo y cuando el ambiente es muy seco predomina la metahalloysita (Dumbleton, 1967). El mineral que predomina en las arcillas negras es la montmorillonita y suele presentarse con nódulos de carbonatos. En general, son suelos residuales, producto de la meteorización de rocas y son ricos en hierro y aluminio, resultado de la fuerte lixiviación (meteorización química) de las bases y sílice. Los minerales de arcilla se transforman en metahalloysita, cuando el ambiente es relativamente seco y la halloysita hidratada en goethita,

⁴Esta palabra se escribe en inglés 'Halloysite' y en la literatura técnica de habla castellana aparece como halloysita y haloisita, semánticamente tienen el mismo significado.

cuando el ambiente es húmedo. Las características de plasticidad de estas arcillas son modificadas por la presencia de óxido de hierro (Dumbleton, 1967).

Se ha formulado la tabla 1.2, para asociar algunos suelos tropicales con las condiciones medioambientales que los envuelven.

TABLA 1.2. Condiciones ambientales de algunos suelos tropicales

Lugar	Región	Topografía	Drenaje	Intensidad de lluvias mm al año	Temp. (°C)	Comentarios
Camerún	África central	-Llanura costeras -Mesetas -Montañas de origen volcánico (Monte Camerún)	De malo a muy buen drenaje	-En la costa: 3,900 -Zona montañosa: 10,160	21° a 35°	Clima tropical húmedo y hacia el norte seco. Zonas montañosas cubiertas por vegetación densa
Kenia	África oriental	-Franja costera -Amplia meseta -Montañas de origen Volcánico (Monte Kenia) -Gran depresión (Rift Valley)	De malo a buen drenaje	Zonas altas: 508 a 762	24° a 30°	La zona de meseta es árida. La zona sur y sureste de Kenia está ocupada por bosques
Java	Sureste asiático (Indonesia)	-Llanuras costeras -Cadenas de montañas volcánicas	Muy buen drenaje, en zonas bajas mal drenaje	-Tierras bajas: 1,780 a 3,175 -Región alta: 6,100	20° a 35°	Clima tropical y selva tropical húmeda
Etiopía	África oriental	-Relieve accidentado -Altiplanicie (macizo Etiope)	De malo a buen drenaje	-En altiplanicie < 500 -En zona tropical 500 a 1500 Zona templada 1,300 a 1800	-En altiplanicie: 22° -Área subtropical: 27°	Cuenta con zonas subtropicales. Problemas de fuerte erosión por deforestación. lo que implica cambio del clima
Brasil	América del sur	-Depresión del Amazonas -Meseta alta Brasileira -Llanuras costeras	De malo a bueno	2,030 a 5,080	27° a 32°	Cuenta con zonas subtropicales a tropicales. Problemas de erosión

1.2.2. Bosquejo histórico y aportaciones

El profesor Terzaghi inicia en el año 1958, a consecuencia de la construcción de la Presa de Sasumua, en Kenia, el estudio de las arcillas tropicales, publicando en el mismo año los resultados de sus observaciones en un artículo que llamó: *Desing and performance of the Sasumua Dam*. Se puede afirmar que con este artículo, se inicia el estudio sistemático de los suelos tropicales.

Terzaghi, en su artículo, reporta que la composición del cuerpo de la presa está constituido por productos de lavas basálticas meteorizadas, tobas y brechas. El mismo autor, considera que estos materiales se encuentran muy meteorizados. La geología del lugar o área de desplante de la presa, está representada por dos periodos de actividad volcánica. Estas actividades dejaron una serie de estratos casi horizontales de lavas y sedimentos piroclásticos. Los estratos superficiales están compuestos por “lavas arcillosas” descompuestas (meteorizadas). Las lavas arcillosas son de color rojo y están asociadas a las tobas. Los materiales que sirvieron para construir el cuerpo de la presa, presentaron “anormalmente” límites plásticos altos y densidades secas y contenidos de humedad óptima muy bajos. Los límites de consistencia o de Atterberg se graficaron en la carta de plasticidad y los puntos correspondientes se alojaron por debajo de la línea 'A'. Terzaghi observó que el tratamiento previo al ensayo, en la determinación de los límites de Atterberg, influye en los resultados. Es interesante mostrar en la siguiente tabla 1.3 los resultados que reporta Terzaghi, pues el suelo que aquí se estudia presenta la misma respuesta.

TABLA 1.3. Diferencias en los límites de Atterberg, de acuerdo al tratamiento

Condiciones de ensayo	Límite. Líquido %	Límite plástico %	Índice plástico %
Estado natural antes de secado	87	54	33
Secado a 105° C y pulverizado en mortero	58	39	19
Secado, pulverizado y rehidratado un mes	63	39	24

Por otro lado, Terzaghi observó que para determinar los contenidos de arcilla en ensayos por decantación, dependían del procedimiento que se utilizaba y el agente dispersor. Las arcillas de la Presa de Sasumua presentan una compresibilidad anormalmente baja y por otro lado, presentan ángulos de fricción interno y permeabilidad muy altos, que no corresponden con las propiedades de una arcilla que tenga el mismo límite líquido. Este comportamiento anormal, Terzaghi lo explicó a partir de la composición mineralógica de la arcilla y a la forma de agrupamiento (apilamiento) de la fracción arcillosa, que se presenta en forma de agregados (clusters) o granos porosos con superficies rugosas. Explica Terzaghi, que el límite líquido de la arcilla de Sasumua es alto, porque la cantidad de agua que se evapora durante el proceso de secado de la muestra, con un contenido de humedad

en el límite líquido es igual a la suma del agua localizada entre los grumos y aquella cantidad de agua alojada en los huecos de los agregados.

El mismo Terzaghi afirma: “el concepto de agregado de la arcilla de Sasumua es corroborado por los resultados obtenidos del examen en microscopio electrónico. Por tanto, la masa de esta arcilla esta compuesta por agregados de cristales esponjosos y no por cristales individuales”. Es posible, que lo anterior explique la alta permeabilidad que presenta esta arcilla y por otro lado, la disposición de los agregados en cristales esponjosos hacen que los ángulos de rozamiento interno sean altos. Terzaghi no habla de la influencia que pueda tener el agua con el ángulo de fricción interna, pero establece, para los suelos de Sasumua, una correlación empírica entre la cohesión y el contenido de agua. Por otra parte, la composición mineralógica de estos agregados está representada por halloysita deshidratada (como componente predominante), caolinita, goethita y cuarzo. Los cristales de halloysita se presentan en forma tubular. La goethita⁵ (hidróxido de hierro), ocupa el segundo lugar en porcentajes con respecto a los demás minerales enunciados.

Otro autor que investigó las arcillas rojas de Kenia fue Newill (1961), quien también reconoció que las arcillas rojas están constituidas por agregados o se disponen en grupos de agregados. Centró su investigación en observar el efecto que tiene la halloysita hidratada⁶ y la metahalloysita en las propiedades de estas arcillas rojas volcánicas y la influencia de la capa de óxido de hierro en las partículas de los minerales de arcilla que constituyen estos suelos. La halloysita hidratada, comenta este mismo autor, se presenta en forma tubular (también observado por Terzaghi, 1958), mientras la metahalloysita en tubos partidos o parcialmente desenrollados. La metahalloysita es más estable bajo condiciones naturales, pero la halloysita hidratada se convierte en metahalloysita en medios de baja humedad; este cambio es irreversible e implica la pérdida de la capa monomolecular de agua alojada entre las láminas de caolín, de la cual está formada la halloysita. La deshidratación de la halloysita hidratada ocurre cuando el contenido de humedad (de la arcilla) se reduce aproximadamente en un 10%, o cuando la humedad relativa está por debajo del 40%. Al parecer, Newill (1961) ha centrado la circunstancia que influye en la interpretación en los límites de Atterberg, aspecto que Terzaghi (1958) no planteó y basó el comportamiento anormal de las arcillas rojas de Sasumua en la disposición de las partículas en agregados. Newill

⁵También se le llama limonita y es el producto de la meteorización de los minerales que contiene hierro. Tiene coloraciones, que varían desde amarillo hasta marrón y rojo.

⁶La halloysita y la metahalloysita forman parte de la familia del caolín, cuya composición química de la halloysita hidratada es $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$ y de la metahalloysita $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$.

(1961) hizo un estudio comparativo de las arcillas de Kabete y Sasumua y encontró que las arcillas de Kabete también requerían riguroso tratamiento para dispersarlas. Por otra parte, también observó que las arcillas de Kabete presentaban una mayor disposición de grupos de agregados que las arcillas de Sasumua, en contenidos de humedad natural, pero en estado seco los agregados se manifiestan igual. Observó que cuando la haloysita se secaba, perdía el agua de la intercapa e irreversiblemente no se volvía a recuperar, por la remoción del agua de la intercapa. Esto conllevó a la incertidumbre en la determinación del contenido natural de agua y también en la determinación de los límites de Atterberg. Newill (1961) observó que el excluir el óxido de hierro libre en las muestras de suelo, la plasticidad de las arcillas de Sasumua y Kabete aumentaba. Por otra parte, Newill (1961) también encontró que el tratamiento previo al ensayo para determinar los límites de Atterberg, influye en los resultados.

Dixon (1963) hace una revisión de los suelos tropicales estudiados y la asocia a su experiencia, con el objeto de brindar una mayor información respecto a estos suelos. Reconoce también, que la disposición de las partículas del suelo se presentan en masas de agregados. Al igual que los autores anteriores se ha encontrado con la haloysita como componente principal en las arcillas estudiadas. La haloysita presenta la forma típica de tubos huecos o láminas dobladas que tienden a formas cilíndricas. Al igual que Tarzaghi, Dixon (1963) afirma que esta característica mineralógica es la que explica el comportamiento anormal de estos suelos, comparados con otros suelos sedimentarios. Otra observación que hace Dixon (1963) es la referente al agua alojada en los agregados y en los tubos de la haloysita, al parecer no influyen en el comportamiento mecánico del suelo, pero influye en los resultados numéricos y técnicas de laboratorio para determinar datos fiables en el diseño. Lo anterior, confirma un escollo para el diseño de taludes o estabilidad de rellenos. Según la experiencia de Dixon (1963), en terraplenes constituidos por estas arcillas y bien compactados, los parámetros de resistencia al corte son altos y la compresibilidad es baja y con un cuidadoso control de las presiones de poro durante el proceso de construcción, éstas se disipan rápido. La anterior afirmación, es congruente con las características de permeabilidad de estos suelos tropicales. Finalmente, Dixon (1963) considera que estos materiales en la práctica, pueden ser incluidos como buenos materiales en la ingeniería práctica, a pesar de su difícil interpretación y de su desviación de sus propiedades físicas.

Otro investigador que estudió los suelos tropicales fue el profesor Jiménez Salas (1963). Analizó las arcillas rojas de la Isla de Fernando Poo, del África occidental, las cua-

les tienen las características de poseer una densidad seca muy baja. Los puntos que representan la plasticidad de la arcilla, en la carta de plasticidad, están por debajo de la línea 'A'. Los límites líquidos oscilan entre 70 y 90%. Observó la influencia en el secado al aire del suelo en los ensayos de los límites de Atterberg, además, las muestras de arcilla las dejó humectarse durante un periodo de 24 y 72 horas, y los resultados obtenidos fueron erráticos. Comenta Jiménez Salas (1963), que la tendencia cuando se seca la arcilla, previo al ensayo, es disminuir el límite líquido y aumenta, cuando se humedece la muestra. Observó que los contenidos de humedad se encontraban por debajo de los límites plásticos. En el análisis diferencial termal, detectó que la arcilla tenía coloides (macromoléculas dispersas) de óxido férrico. En observaciones llevadas a cabo en microscopio electrónico encontró gran porcentaje de cristales tubulares de halloysita, pero también observó presencia de kaolinita. Lo que llama la atención del reporte del profesor Jiménez Salas (1963) son los altos valores del peso específico de las partículas sólidas, de 3.02, pero más adelante, explica que estos valores tan altos se deben a la presencia de minerales de manganeso y hierro. Investigó el hinchamiento utilizando el edómetro convencional y encontró que a una presión vertical de 0.2 kgf/cm² la arcilla roja hinchaba un 2% con respecto a su altura original, circunstancia que no afectó en el desplante de pavimentos de hormigón. Los problemas de construcción que presentan estas arcillas, sigue comentando Jiménez Salas (1963), es en los rellenos cuando se quieren construir siguiendo las normas técnicas de Proctor, ya que es casi imposible obtener la humedad óptima en campo (del ensayo Proctor normal), exceptuando algunos días (los secos y soleados) al año. Según Jiménez Salas (1963), los rellenos contruidos con las técnicas Proctor, no parecen que posean la homogeneidad y el equilibrio volumétrico, que se requiere para la estabilidad de un pavimento rígido de hormigón. La afirmación anterior no coincide con la de Dixon (1963), que califica a estos suelos de buenos desde el punto de vista de la ingeniería práctica.

Finalmente, concluye Jiménez Salas (1963), la arcilla contiene halloysita y caolinita, sus propiedades son aceptables, pero tiene una densidad seca muy baja. El profesor Jiménez Salas (1963) no aclara el origen de estos suelo, si son cenizas volcánicas meteorizadas o suelos producto de la meteorización de rocas básicas, rocas cuya presencia de sílice es alta.

Coleman *et al.* (1964) investigaron las arcillas rojas de Neury, Kenia. Los análisis de laboratorio los aplicaron a los suelos localizados próximos a la superficie del terreno, suelos que temporalmente se han secado *in situ* y que poseen características anormales, como

el grado alto de adsorción de agua de sus partículas y los valores anormales bajos (en ensayos de compactación de las normas británicas) de la densidad seca. Por otra parte, ese grado alto de adsorción de agua de las partículas del suelo incrementa los parámetros índice.

Para dar la explicación a la anormalidad de este suelo, Coleman *et al.* (1964), realizan estudios petrográficos para identificar la mineralogía de estos suelo. Encontraron que las partículas constituyentes eran amorfas y de color marrón y un 2 a 3% de las partículas se encontraban sin alterar. Los minerales transparentes encontrados fueron: cuarzo, feldespato, ortoclasa, labradorita y microclina. Comentan estos autores, que el cuarzo y el feldespato fueron los más comunes. Los minerales de arcillas identificados, producto de la meteorización del feldespato, que predominaron en el suelo, fueron: la kaolinita y la haloysita. En análisis de rayos-X, observaron la presencia de metahaloysita pobremente cristalizada e impregnada por óxido de hierro.

Coleman *et al* (1964), retoman las siguientes consideraciones para explicar el origen de las arcillas rojas, a saber:

- El suelo deriva de una roca basáltica.
- Sólo la roca basáltica contribuye a la formación de los suelos.

Dumbleton (1967) estudió, al igual que Terzaghi, las arcillas rojas de Kenia, África, y afirmó que son residuales, producto de la meteorización de rocas y capas de suelo superficiales, que han sido sometidos a temperaturas altas y lluvias y se encuentran en zonas con buen drenaje (laderas). En estas condiciones, las bases y sílices que se encuentran en estas arcillas rojas son lixiviadas, enriqueciendo al suelo en hierro y aluminio.

Bajo ambientes secos, el mineral predominante en el suelo es la metahaloysita y bajo ambientes húmedos (intenso régimen de lluvias) predomina la haloysita hidratada. Las tonalidades rojizas de estas arcillas se deben al óxido de hierro, que en condiciones ambientales secas el proceso de lixiviación transforma al óxido de hierro en hematites y en condiciones húmedas en goethita. Dumbleton (1967) observó que el óxido de hierro, influye en la plasticidad de estas arcillas rojas. Por otro lado, las arcillas negras montmorilloníticas, con alto contenido de sílice y bases se asocian a las arcillas rojas, pero por lo regular se encuentran en terrenos bajos y con mal drenaje. Las arcillas rojas tropicales están formadas en ambientes con temperaturas altas y en regiones con regímenes de lluvias de moderadas a altas y con una topografía de terreno que permite el buen drenaje, cuando el grado de lixiviación es alto. Los minerales presentes en las arcillas rojas son del grupo del

caolín, que contienen una proporción baja de sílice-aluminio en una relación 1:1. Para el caso de las arcillas negras (formadas en terrenos con mal drenaje) el mineral predominante es la montmorillonita, rica en bases solubles y sílice, con una relación de sílice-aluminio 3:1, y comúnmente se encuentra presente el calcio en forma de nódulos de carbonatos. Aclara Dumbleton (1967), que cuando las condiciones de meteorización son apropiadas, las arcillas rojas se formaran a partir de cualquier tipo de roca. En el caso de las arcillas rojas de la Presa de Sasumua, la roca original fue de origen volcánico (Terzaghi, 1958).

Por otra parte, las arcillas rojas que contienen caolín en forma de halloysita, presentan una estructura desordenada, que da lugar a un material con un alto potencial de plasticidad. Cabe mencionar a las arillas compuestas por cenizas volcánicas citadas por Dumbleton (1967), que corresponden a la carretera Nakuru-Eldoret, kilómetro 8, Kenia, dichas cenizas se encuentran en zona de planicie y están constituidas por halloysita hidratada, como mineral predominante y con trazas de caolín, hematites y goethita. A pesar de que estas cenizas se encuentran en planicie, no contienen montmorillonita.

Sherwood (1967) condiciona la formación de agregados en las arcillas rojas de Kenia, África, a la cementación que existe entre las partículas. Observó que el cementante que liga a las partículas es el óxido de hierro libre y la presencia de dicho cementante tiene el efecto de formar los agregados en las arcillas rojas. Aunque también la materia orgánica y presencia de carbonatos pueden servir de agentes cementantes y crear agregados, estos elementos se encuentran en porcentajes muy bajos en las arcillas rojas. Los análisis químicos han demostrado que las arcillas rojas contienen óxido de hierro libre, hecho irrefutable de que el óxido de hierro es el agente cementante. Por otra parte, la presencia de óxido de hierro, influye en los resultados de análisis granulométricos, pues los agregados no se pueden romper por simple lavado. Con lo anterior, Sherwood (1967) significó el hecho de que el cementante de óxido de hierro se encuentra de manera abundante en las arcillas rojas y por lo tanto es el principal agente cementante en las arcillas de Kenia.

Siffermann y Millot (1969) estudiaron, específicamente, las arcillas de Camerún, África. Analizaron la evolución de la alofana en suelos jóvenes, desarrollados en rocas basálticas y bajo tres condiciones que se indican en la tabla 1.4, en la que también se señala las condiciones de drenaje.

Siffermann y Millot (1969) destacan el siguiente aspecto: las zonas de mayor precipitación de lluvias (<10 m), tienen una estratigrafía cuyos horizontes superiores con alofana

contienen muchas diatomeas⁷, cuyo contenido de sílice tiene influencia en la nueva formación de minerales de arcilla.

TABLA 1.4. Condiciones climáticas de los suelos de Camerún

Zona	Lluvias anuales	Tipo de clima	Condiciones de drenaje
I	< 10 m	Sin estación seca, clima ecuatorial y siempre húmedo	Buen drenaje
II	3 a 6 m	Con una estación seca y clima ecuatorial	Buen drenaje
III	< 1.5 m	Con una larga estación seca y clima tropical	Buen drenaje

La variación de las lluvias controla el secado de los suelos y la concentración temporal de soluciones, estos dos factores dan lugar a la neoformación de minerales de arcilla.

Sifferman y Millot (1969) describen geológicamente a la Republica Federal de Camerún como una superficie cubierta por rocas y materiales piroclásticos volcánicos, escorias, tobas, y cenizas de composición basáltica. La génesis de los suelos y meteorización de los materiales rocosos, comentan estos investigadores, son estudiados de acuerdo a los climas indicados en la tabla 1.4 y consideran que la alofana está constituida por productos amorfos de sílice y aluminio, la halloysita hidratada la designan como a las partículas que tiene un espacio basal de 10 Å y el término metahalloysita se refiere a la halloysita deshidratada cuyo espacio basal en partícula es de 7.5 Å.

La evolución mineralógica de las arcillas rojas de Camerún se muestra en el recuadro de la página siguiente.

Como se puede desprender del recuadro anterior, sólo en la zona II y III la halloysita cambia a otros minerales y la alofana, que procede de la fuerte meteorización del basalto, es favorecida por la humedad y la permanente lixiviación.

Finalmente, las observaciones que llevaron a cabo Sifferman y Millot (1969) en microscopio electrónico, permitió identificar la halloysita de manera tubular y la alofana en forma de láminas amorfas. Para la zona Subecuatorial, con un periodo de sequía, se ve claramente como el desecado influye en la variación del espacio basal de la halloysita transformándose en metahalloysita.

⁷Diatomeas: son sedimentos constituidos por restos esqueléticos de plantas microscópicas llamadas diatomeas.

Recuadro 1.1. Evolución mineralógica en los suelos de Camerún, de acuerdo a las condiciones ambientales

AMBIENTE	
Zona I Ecuatorial húmedo (todo el año húmedo)	Zona II y III Subecuatorial (una estación seca) y tropical
Roca de origen (basalto)	Roca de origen (basalto)
↓	↓
Alofana	Alofana
+	↓
Caolinita	Halloysita
+	↓
Gibsita	Metahalloysita
	↓
	Gibsita

Morin y Parry (1971) estudiaron los suelos volcánicos de Etiopía. Los suelos identificados por estos investigadores fueron las arcillas rojas y las negras, formadas a partir de rocas basálticas del terciario y cuaternario, en estos periodos hubo una gran actividad volcánica que cubre gran parte la Planicie Etiope.

Las arcillas negras se encuentran en áreas con un drenaje pobre y con lluvias de intensidad moderada a bajas y el principal mineral que contiene es la montmorillonita y los minerales accesorios son la caolinita y halloysita. Las arcillas rojas se desarrollaron en zonas donde abundan las lluvias y el drenaje es bueno; contiene minerales de caolinita, halloysita y trazas de montmorillonita. En la tabla 1.5 se presentan las características de estos suelos.

TABLA 1.5. Características de los suelos de Etiopía

Suelo	Roca de origen	Características de drenaje	Lluvias	Minerales que predominan	Periodo de formación
Arcilla negras	Por lo regular basalto	Mal drenaje, zonas de planicie	De bajas a moderadas	Montmorillonita, minerales accesorios: Caolinita y halloysita	Terciario
Arcillas rojas	Por lo regular basalto y otras rocas volcánicas	Buen drenaje. Zonas de laderas	Abundantes	Caolinita y halloysita, con trazas de montmorillonita	Terciario

Morin y Parry (1971), sobre la base del análisis mineralógico, califican a la arcilla negra como más expansiva que la roja y muchos suelos de Etiopía causan problemas para los pavimentos y su construcción, por tener alta plasticidad y una marcada tendencia a hincharse. En observaciones hechas en campo, se aprecia que la transición de la roca a suelo es casi abrupta y estos autores encontraron que las propiedades índice no cambian con la profundidad de los estratos. La montmorillonita está en casi todos los suelos de Etiopía, se desarrollan sobre el basalto que es la roca madre que provee estos suelos ricos en minerales activos. En la carta de plasticidad, los límites de Atterberg de las arcillas rojas y negras se alojan muy próximo a la línea 'A' y por debajo de ella. La plasticidad de estos suelos depende del porcentaje de montmorillonita que se encuentra en la fracción arcillosa.

Finalmente, Morin y Parry subrayan que las arcillas negras tiene como mineral predominante a la montmorillonita y son potencialmente expansivos. Por otro lado, las arcillas rojas tienen como minerales constituyentes a la caolinita y a la halloysita, pero frecuentemente se les encuentra en la naturaleza con montmorillonita en cantidades significativas. Las arcillas rojas tiene un valor de pH ácido y se forman sobre una variedad de rocas (suponemos volcánicas, pues los autores no aclaran) incluyendo basaltos, en zonas con buen drenaje y con lluvias por arriba de 40 pulgadas (1016 mm) por año. En general, los suelos de Etiopía, ya sean de la Altiplanicie Etiope y el Rift Valley de Etiopía se han usado en la construcción de caminos, pero estos suelos tiene características de baja resistencia y son muy expansivos, reduciendo esta característica su estabilidad en el uso de obras de ingeniería. Por las recomendaciones que Morin y Parry (19719) hacen para compactar estos suelos, hacen suponer que estos suelos son malos materiales para la construcción de terraplenes y presas. Al contrario de los suelos de Indonesia y de la Presa de Sasumua, estas arcillas tiene característica desfavorables para las obras de ingeniería.

Wesley (1973a) estudió profusamente las arcillas rojas de Java y Sumatra, Indonesia. Fue el primero que cuestionó la hipótesis de los agregados (Cluster hypothesis) que utilizó Terzaghi (1958) para explicar el comportamiento anormal de las arcillas de la presa de Sasumua.

De acuerdo con Terzaghi y Robertson (1958), la arcilla utilizada para formar la Presa de Sasumua en Kenia, le atribuyen un comportamiento anormal debido a que este suelo se encuentra con sus partículas en forma agregada o aglomerada y las partículas no se encuentran en forma individual. Terzaghi pensaba que la arcilla proveniente de la Presa de Tjipanundjang, al oeste de Java, Indonesia, era igual a la arcilla de la Presa de Sasumua,

que consistía en agregados esponjosos, la cual, la mayor porción de la arcilla de Java estaba compuesta por agregados esponjosos, cuyas partículas estaban cementadas entre sí (Wesley, 1973a). De acuerdo con Wesley (1973a), la arcilla de Java y Sumatra han presentado buenas propiedades mecánicas, esto lo demuestra la estabilidad que se observa en los taludes distribuidos en toda Java. Hay poca evidencia de que la arcilla roja de Java su comportamiento se deba a la presencia de los agregados (Wesley, 1973a, b) y además, los ensayos sugieren que las propiedades anormales de las arcillas rojas de Indonesia se deban a la naturaleza de las partículas individuales, que a la presencia de los agregados o a las partículas agregadas. Estas partículas de minerales están representadas, en forma abundante, por Halloysitas, alofana y gibsita. El 50% del suelo está constituido por fracción arcillosa y el tamaño de partícula que predomina es de 0.2 μm . Acepta Wesley (1973a), que la experimentación no refuta la existencia de los agregados en estado natural del suelo, pero la existencia de estos agregados, si es que existen, no pueden considerarse de consistencia dura o suponer que se encuentran cementados, pues en los ensayos se pueden dispersar fácilmente por agitación mecánica. Lo anterior es válido para las arcillas de Indonesia. Por otro lado, la alta resistencia de las arcillas rojas de Indonesia (Java y Sumatra) no se debe a la presencia de agregados o aglomeración de agregados, sino a la naturaleza individual (dureza) de las partículas. El mismo Wesley (1973a), considera que la relativa alta permeabilidad en muestras procedentes de Java, sugiere la existencia de algún tipo de agregado o una forma inusual de estructura de suelo (fábrica). Por otra parte, el secado en estufa, de la arcilla roja de Indonesia, no provoca la presencia de agregados cementados. El comportamiento mecánico de las arcillas rojas de Indonesia, Wesley se lo atribuye a la naturaleza individual de las partículas. Otro aspecto que enfatizó Wesley, es la poca diferencia que ocasiona el secado en estufa en los resultados de los análisis granulométricos, circunstancia opuestas para las arcillas de Sasumua (Terzaghi, 1958).

Desde el punto de vista pedológico, Wesley (1973b) identifica dos tipos de suelos, a saber: los andosoles y latosoles. Estos tipos de suelos han sido formados a partir de rocas volcánicas y meteorizadas bajo un ambiente tropical (ver tabla 1.2). Los andosoles y latosoles se forman bajo un mismo proceso de meteorización, dando como resultado suelos que contienen óxido de aluminio o hierro. Los andosoles, continua Wesley, se caracterizan por su color café amarillento y los latosoles por su color rojizo. Los latosoles se les localiza a cotas menores de 1000 metros, es decir, cerca del mar. Los andosoles se encuentran a cotas mayores de 1000 metros. Wesley (1973b) estudia las propiedades de estos suelos bajo tres condiciones: en estado natural, secado al aire y secado en estufa.

Los suelos de Java se forman a partir de la meteorización de las rocas volcánicas, en un ambiente puramente húmedo-tropical. En el caso de la Isla de Java, los materiales volcánicos predominantes son: Tobas, lavas fluidas, lahares y particularmente cenizas volcánicas.

Wesley (1973) ha observado, que estos suelos de origen volcánico han sufrido meteorización a grandes profundidades, produciéndose los andosoles y latosoles. De acuerdo a Mohr y Van Baren, Wesley (1973b) comenta la secuencia que sigue una ceniza volcánica en el proceso de meteorización, en función de la variación del color, y lo describe de la siguiente manera: en su primera etapa tiene un color café amarillento y después cambia a color rojo, con concentraciones de hidróxido de hierro y bauxita, de tal manera que las arcillas rojas presentan un estado de meteorización más avanzado que las arcillas de color café amarillento. Estos suelos presentan las siguientes características ingeniriles (Wesley y Matuschka, 1988), a saber:

1. Contenidos de humedad y límites de Atterberg muy altos.
2. Disminución irreversible en la plasticidad y aumento del tamaño de las partículas, cuando el suelo se seca al aire o en estufa.
3. Las correlaciones empíricas utilizadas en arcillas sedimentarias al ser aplicadas a estas cenizas volcánicas, pueden dar resultados engañosos, es decir, estas relaciones empíricas no son válidas para estas arcillas de origen volcánico.
4. Estas arcillas o cenizas volcánicas presentan resistencias altas y compresibilidad baja.
5. Las propiedades de resistencia y compresibilidad, no son muy influenciadas por el contenido de agua o por los límites de Atterberg.

Los andosoles, continúan Wesley y Matuschka, que contienen altos contenidos de humedad, pueden tener la misma resistencia y compresibilidad que los que tienen bajos contenidos de humedad.

El alto contenido de agua de las cenizas volcánicas está directamente relacionado con el contenido de alofana. Por otra parte, los contenidos bajos de humedad, sugieren la presencia de halloysita (Wesley y Matuschka, 1988).

El mineral que predomina en los latosoles, según reporta Wesley (1973b), es la halloysita y en los andosoles el mineral predominante es la alofana. Esta característica influye en los límites de Atterberg, que ubica a estos suelos, en la carta de plasticidad, por debajo de línea 'A'.

González de Vallejo *et al* (1981) estudiaron los suelos de La Laguna, Tenerife (Occidente de África Septentrional). Investigaron la influencia de la composición mineralógica y fábrica del suelo en las propiedades de resistencia y deformación y consideraron que la fábrica del suelo es el factor principal que influye en estos suelos de comportamiento anormal.

Al igual que Sifferman y Millot (1969), González de Vallejo *et al* (1981) consideraron la influencia de las condiciones ambientales (lluvias, drenaje, cambios de temperatura, etc.) en la meteorización de los materiales volcánicos y la formación de nuevos minerales. De acuerdo con Kirkman y Fieldes, González de Vallejo *et al* (1974) acepta que en la secuencia de formación de minerales de arcilla, no siempre el mineral primario es la alofana y la halloysita como mineral secundario, existen otros tipos de secuencias, como puede apreciarse en el recuadro 1.2. Las condiciones geológicas y ambientales influyen de manera decisiva en la formación de minerales.

Los sedimentos de La Laguna están constituidos por escorias y materiales piroclásticos. El tamaño de partícula que predomina en estos sedimentos son los limos y arcillas.

Recuadro 1.2. Secuencia en la formación de minerales en arcillas volcánicas
(González de Vallejo *et al* 1981)

Islas del sur del Pacífico	Camerún		Kenia
«Cenizas volcánicas /vidrios»	«Rocas volcánicas»		«Cenizas volcánicas»
↓	↓		↓
Alofana	Alofana		Montmorillonita
↓	↓	↓	↓
Halloysita	Halloysita	Caolinita	Halloysita
↓	↓	↓	↓
Metahalloysita	Metahalloysita	Gibsita	Caolinita
↓	↓		
Caolinita	Gibsita		

Las formaciones identificadas por González de Vallejo *et al* (1979) en La Laguna, fueron las siguientes:

- Formación Las Mercedes.
- Formación Pozo Cabildo.
- Formación San Diego.

La formación Pozo Cabildo se encuentra en el fondo de la cuenca (zona de lago) y son suelos parcialmente sumergidos, que han estado sujetos a bombeo para suministro de agua potable. Los suelos de esta formación están representados por arcillas de color azul y gris, con espesores que varían de 5 a 25 metros. Estos sedimentos se formaron en el Holoceno (González de Vallejo, 1979; González de Vallejo *et al*, 1981) y la montmorillonita, micas y sanidina son los minerales que predominan en estos suelos. Estos sedimentos se encuentran sobre un sustrato de lavas basálticas con materiales piroclásticos.

La formación San Diego (González de Vallejo le llama fase de transición) está constituida por limos arcillosos de color rojizo, de consistencia firme y el mineral predominante es la halloysita.

La formación Las Mercedes está compuesta por arcillas limosas de color café oscuro y el mineral constituyente es la Halloysita

Según González de Vallejo *et al* (1981), la estructura del suelo de estas formaciones geológicas tiene una tendencia a formar agregados de partículas de arcilla. Estos agregados los asocia a la composición mineralógica del suelo.

Los suelos compuestos por halloysita, como la formación San Diego, presentan sus componentes de minerales de arcilla con agrupamientos de agregados (entretrejidos), mientras los suelos que contienen montmorillonita, como la formación Pozo Cabildo, presentan una matriz arcillosa con orientación de partículas al azar.

En otro orden de aspectos, González de Vallejo *et al* (1981) comentan que la susceptibilidad de estos suelos, con valores entre 1 y 2, se debe a la sobreconsolidación, además del tipo de fábrica que tienen estos suelos. En ensayos realizados en edómetro se encontró que los suelos que contenían montmorillonita eran menos compresibles que los suelos que

contenían halloysita y los ricos en mica, resultado que no es congruente con la composición mineralógica de las arcillas.

Concluye González de Vallejo *et al* (1981), que los suelos de La Laguna muestran características similares que otros suelos volcánicos tropicales, ocupando el mismo lugar en la carta de plasticidad. También reconoce que las partículas forman agregados y eventualmente se encuentran cementados. La composición mineralógica no es el principal factor que domina las propiedades ingenieriles, pero es un factor contribuyente que relaciona el tamaño de la partícula con la fábrica del suelo.

Quantin y Geissert (1982) estudiaron las características químicas y mineralógicas de un andosol y suelo ferralítico de Xalapa, México (Eje Neovolcánico Oriental). Estos autores estudian los suelos de Xalapa con fines edafológicos.

La zona de estudio corresponde a la parte sur de Xalapa y está constituida por laderas con pendientes suaves a abruptas, se puede decir que el lugar cuenta con buen drenaje. La altitud de estos suelos se localiza entre las cotas 1000 a 1500 metros. Estos suelos ferralíticos y andosoles corresponden a formaciones volcánicas del Cuaternario y dichos depósitos están cubiertos por cenizas del Holoceno. El clima del lugar es subtropical húmedo, con temperatura entre 17° y 20° C, con precipitaciones anuales entre 1 700 a 2 200 mm. A altitudes mayores de 1000 metros predominan los andosoles y a cotas menores aparecen los suelos ferralíticos representados por arcillas de color rojo (Quantin y Geissert, 1982). Por otro lado, otra característica que presentan los andosoles es su proximidad a los conos volcánicos recientes y son de color café oscuro. El análisis mineralógico, comentan Quantin y Geissert (1982), se obtuvo en polvo de suelo, en la fracción menor de 2 μm mediante difracción de rayos-X y microscopía electrónica de transmisión (MET). De acuerdo a los resultados del análisis mineralógico, sobre todo en la parte superior de la columna estratigráfica, se pudo identificar que está ocupada por productos de alteración constituida, principalmente, por alofana y gel de hidróxido de hierro y aluminio. También se identifica mineral de halloysita con espacio basal de 10 Å, en forma tubular, así como trazas de gibsita, goetita mal cristalizada. Con la profundidad, va aumentando la presencia de la halloysita con espacio basal de 10 Å (hidratada), en forma tubular y de glomérulos. También se encuentra presente la alofana y gel de hidróxido y la gibsita desaparece en capas profundas. En la tabla 1.6 se hace un resumen de la variación mineralógica con la profundidad.

TABLA 1.6. Composición y variación mineralógica de un andosol con la profundidad (Quantin y Geissert, 1982)

Profundidad metros	Minerales primarios				Minerales secundarios		
	Cuarzo y cristobalita	Feldespato plagioclasa	Sanidino	Anfibola	Alofana	Halloysita	Gibbsite
0.40 a 0.50	◆◆	◆	◆	t	◆◆◆	◆	t
1.60 a 1.70	◆	t	◆	-	◆	◆◆◆	t
2.20 a 2.3	t	t	◆	-	◆	◆◆◆	e
2.9 a 3.10	◆	e	e	-	◆	◆◆◆	-

◆◆◆: abundante; ◆◆: mediano; ◆: poco; t: trazas; e: Trazas ínfimas; -: no se observó.

Se puede apreciar en la tabla 1.6 como disminuye la presencia de la alofana con la profundidad, y como aumenta la presencia de la halloysita con la misma.

En superficie el andosol presenta un pH entre 6.5 y 6.7 (ligeramente ácido) y con la profundidad disminuye a 5.5. De los suelos ferralíticos, sólo se comenta aquí, que tiene abundante presencia de halloysita y trazas de alofana, así mismo, estos suelos proceden de cenizas volcánicas al igual que los andosoles (Quantin y Geissert, 1982).

Hürlimann *et al* (2001) estudiaron el fenómeno de deslizamientos en suelos residuales de Tenerife, Islas Canarias, puntualmente en el Valle La Orotava. Las Islas Canarias tiene un clima que se puede considerar como semiárido a subhúmedo. Las Islas Canarias son bañadas por los vientos predominantes del norte y norte-este. Estos vientos y el efecto influyente de la orografía, inducen precipitaciones en el área de las islas. Indican estos autores, que las áreas de los grandes deslizamientos ocurre en zonas húmedas, al norte y al noreste de Tenerife.

Con la finalidad de comprender mejor el mecanismo de falla de los deslizamientos, estos autores estudiaron la composición mineralógica, química y microestructura de los sedimentos, utilizando fluorescencia de rayos-X, difracción de rayos-X y microscopía electrónica de barrido y en sayos geotécnicos.

El proceso de meteorización, explica Hürlimann *et al* (2001), ocasionó el cambio de los depósitos piroclásticos a suelos residuales, que después fueron cubiertos por nuevas oleadas de lavas o nuevos depósitos de productos piroclásticos y finalmente, todos estos materiales sufrieron “procesos térmicos”. El resultado de todo este proceso, dio un suelo residual de color rojo, cuya característica relevante es la de poseer una doble cementación.

La primera cementación es debida a la litificación que le ocasionó la deposición de productos piroclásticos calientes y la segunda, es debida a la alteración térmica de la lava que cubrió la capa de suelo.

Los suelos de La Orotava están representados por arenas limosas, con 5% de fracción arcillosa. Estos suelos están mezclados con materiales piroclásticos. Los ensayos de Atterberg demostraron que el suelo no es plástico.

El mineral de arcilla que predomina en estos suelos volcánicos es la halloysita, sobre todo en los suelos jóvenes que pertenecen a depósitos volcánicos. En los difractogramas de rayos-X que presentan estos autores, puede apreciarse que éstos registran minerales de feldespatos, piroxenos y hematitas y en algunas muestras se llega a detectar mica.

Estos suelos volcánicos presentan una fábrica abierta, con partículas redondeadas, con macroporos visibles. Observaciones en microscopio electrónico revelaron varias formas de uniones y contactos entre partículas individuales. Estos contactos se encuentran de forma redondeada y en clastos⁸; existen otras formas de contactos caracterizadas por tipos de contactos heterogéneos, como son: contactos en forma de tubos, en forma de copos (flakes) o partículas planas formando puentes entre los clastos. Todas estas uniones forman una masa amorfa de pequeños cristales y pequeñas granos. Se observa en las microfotografías presentadas por estos autores, que las láminas (plates) están unidad cara-cara formando estructuras oolíticas en grumos dispersos o en forma de agregados.

Estos suelos se caracterizan por presentar una consolidación primaria rápida (presentan deformación súbita ante aplicación de tensiones) debido a su alto grado de porosidad que permite una disipación rápida de presión de agua entre los poros.

De acuerdo con Vaughan, Hürlimann *et al* (2001) consideran que el efecto de deslizamiento del suelo se debe a la falla de las uniones entre las partículas.

Una característica interesante del suelo de La Orotava es su colapso volumétrico ante tensiones de corte, lo que implica una reducción en su resistencia. Los ensayos de laboratorio mostraron que la resistencia residual disminuye fuertemente al romperse las uniones interpartícula del suelo. La resistencia residual de los suelos de La Orotava disminuye significativamente ante tensiones altas, este hecho apoya la hipótesis que tales suelos son propensos a las fallas a gran escala (Hürlimann *et al*, 2001) en los flancos de los volcanes.

⁸Clastos: Fragmentos (de diversos tamaños) de roca formados por alteración mecánica.

Por otro lado, el análisis de las Islas Canarias revela que la actividad tectónica tiene una fuerte influencia en los deslizamientos que se observan en La Orotava.

Finalmente, Hürlimann *et al* (2001) afirman, a partir de la experimentación realizada, que los suelos de La Orotava se caracterizan por su comportamiento mecánico particular.

Dubroeuq *et al* (2002) llevaron a cabo el estudio de un andosol de color negro, con fines edafológicos. En este estudio, a pesar de que tiene un enfoque edafológico, tiene cuatro aspectos de interés aquí, a saber: la mineralogía de estos andosoles, la fábrica, las características succión-humedad que presentan estos investigadores y por último, estos andosoles se encuentran próximos a los depósitos de suelos que se estudian en este trabajo.

Estos andosoles se localizan en la región montañosa del Volcán Cofre de Perote (ver figuras 3.2, 3.3 y 3.4) y es el resultado de una fuerte actividad volcánica reciente. La altitud a la que se encuentra el andosol es de 3 100 metros, al oriente del Volcán Cofre de Perote. Este suelo se expone a temperaturas frías y recibe los vientos húmedos del Océano Atlántico. La precipitación anual oscila entre 1 800 a 2 000 mm y la temperatura anual media es de 5 a 10° C.

Para identificar la mineralogía y microestructura de estos suelos, se recurrió a microscopía electrónica de transmisión y de barrido y para identificar la antigüedad de los andosoles se realizaron estudios de radiocarbono. También determinaron estos investigadores curvas características succión-humedad, con la finalidad de observar la capacidad de retención del suelo.

En la estratigrafía observada, Dubroeuq *et al* (2002) reportaron la presencia de cenizas meteorizadas con fragmentos de piedra pómez. Subyacen a estas cenizas, arcillas de color amarillo con presencia de materia orgánica coloidal.

La formación de estos suelos fue hace más de 7 550 años y los espesores aumentan con la profundidad, a causa de la fuerte meteorización.

La neoformación de minerales se orienta hacia la alofana y la halloysita. Además, existen en estos suelos minerales ricos en aluminio, como la imoglita y la gibsita; el agua del suelo presentó alto contenido de silicio.

El análisis de microscopía electrónica permitió observar microagregados y presencia de fragmentos de pómez. En microfotografías obtenidas con microscopio electrónico de

transmisión se identificaron minerales de halloysita en forma típica tubular. También se observó que las partículas estaban cubiertas de materia orgánica coloidal.

Finalmente, Dubroeuq *et al* (2002) comentan que los suelos analizados presentan altos contenidos de humedad inusuales y en ensayos de succión, encontraron que estos suelos volcánicos muestran una curva característica succión-humedad casi vertical, esto indica que el suelo tiene una gran capacidad de retención del agua, debido a la alta tensión capilar dentro de los microporos del suelo.

1.2.3. Propiedades geotécnicas de algunos suelos tropicales

Con la finalidad de comparar parámetros de resistencia y propiedades índice de los suelos de otras zonas tropicales y con el aquí estudiado, se ha formulado la tabla 1.7, retomado información del trabajo de González de Vallejo (1981, 1979). En la misma tabla se observa que los contenidos de humedad más bajos son los suelos de la Laguna, formaciones de San Diego y Las Mercedes (González de Vallejo, 1981) y los suelos de Java, representados por un latosol (Wesley, 1973). Caso contrario, suelos con altos contenidos de humedad, son los de Sasumua (Dixon, 1968) y los de Java, representados por un andosol (Wesley, 1973).

Por otro lado, las arcillas de la Presa de Sasumua (Terzaghi, 1958), en ensayos de compactación, presentan una densidad máxima de 1.12 gr/cm³ y la humedad óptima de 49 %, y para los suelos de La Laguna (González de Vallejo, 1981) la densidad máxima oscila entre 1.40 y 1.45 gr/cm³ y la humedad óptima entre 18 y 33%, estos últimos valores son similares a los obtenidos en este trabajo. Wesley (1973b), en un andosol de Java, reporta, en ensayos Proctor normal y el suelo secado a temperatura ambiente, densidades máximas hasta de 0.55 y 0.45 gr/cm³ y humedades óptimas de 127 y 160%.

Llama la atención, independientemente del método que se haya utilizado en el ensayo, la heterogeneidad de los valores del por ciento de finos (fracción menor de 2 μ) que se reportan en la tabla 1.7. Quizás, esta diversidad del contenido de finos arcillosos, de este tipo de suelos tropicales, se pueda entender por los procesos de meteorización que las rocas y los suelos han sufrido *in situ* a lo largo del tiempo. Otro factor que influye en el resultado del proceso de meteorización es el tipo de la roca madre y por ende en el producto final: suelo.

TABLA 1.7. Propiedades geotécnicas de algunos suelos de origen volcánico

Localización/ referencia	Propiedades índice y mecánicas								
	w %	LL %	LP %	<2 μ^a %	γ_{max} gr/cm ³	W _{op} %	S _G -	C' Kg/cm ²	ϕ' °
Sasumua (Kenia) Terzaghi, 1958	63	87	58	20-30 ^b 40-50 ^c	1.12	49	2.86	0.20-0.30 ^f	30-36 ^f
Sasumua Newill, 1961	-	65-101	49- 70	79 ^d 47 ^e	-	-	2.79-2.94	-	-
Sasumua Dixon, 1968	66-79	71-78	48- 52	-	-	-	-	-	-
Kabete (Kenia) Newill, 1961	82	56-74	38	82 ^d 68 ^e	1.32	34	2.55-2.79	-	-
Nyeri (Kenia) Coleman et al, 1964	-	-	-	63	1.31	36	2.75	-	-
Fernando Póo J. Salas, 1971	40-76	70-90	-	70-80	-	-	3.02	-	-
Etiopía.; arcillas rojas Morin, 1971	-	44-66	30- 36	34-76	1.18- 1.69	29-38	2.61-2.9	-	-
Java (Indonesia); latosol Wesley, 1973	31-50	71-102	35- 52	71-86	1.1-1.4	30-50	2.73-2.78	0.25	31 ^f
Java; andosol Wesley, 1973	70-180	74-213	57- 167	11-76	0.5-1.1	20-160	2.54-2.88	0.15 ^f 1.6 ^g	40 ^f ; 30 ^g 35 ^h
Montufar (Ecuador) Polimón et al, 1976	90-100	80-100	50	5-10	-	-	-	0.20-0.4	25-35
La Laguna (Islas Canarias) González de Vallejo, 1974	30-36	55-60	20- 44	38-57	1.4- 1.45	18-33	2.8-2.88	0.5-2.2 ⁱ	-

a) Según B. S., 1965 (1377); b) Con oxalato Na; c) Con hexametáfosfato; d) Contenido nat. de agua; e) Secada al aire; f) Muestra compactada; g) Con consolidación y sin drenaje; h) Con consolidación y drenaje; i) No consolidada- no drenada

w: humedad natural; LL: límite líquido; LP: límite plástico; <2 μ : fracción menor de 2 micras; γ_{max} : densidad max. seca; W_{op}: humedad óptima; S_G: peso específico; C': cohesión efectiva; ϕ' : ángulo de rozamiento.

González de Vallejo (1979) ilustra lo anterior con dos *perfiles de meteorización* mostrados en la figura 1.2, en la cual puede observarse el grado de meteorización a todo lo largo de la estratigrafía encontrada, en sondeos de la Laguna. Las arcillas sobre piroclastos (terrenos con pendientes bajas), que están constituidos por halloysita principalmente, tiene rangos de resistividad aparente más bajos que los suelos residuales sobre basalto. El cambio de la arcilla a lapillis es registrado por los ensayos SPT y la resistividad. Para el caso de los suelos residuales sobre basaltos (figura 1.2), se observa que el paso de materiales

basálticos a arcillas es abrupto y el índice de calidad de la roca (RQD) identifica el grado de meteorización del balto, pudiéndose contemplar que a mayor profundidad, los basaltos presentan menos grado de alteración (RQD > 50).

Suelos residuales sobre piroclastos						Suelos residuales sobre basaltos					
Perfil	Descripción	E m	R (Ω -m)	SPT	GM	Perfil	Descripción	E m	R (Ω -m)	SPT	GM
[Hatched pattern]	Arcillas rojizas o marrones de plasticidad alta a intermedia	2-5	10-30	20-40	VI	[Hatched pattern]	Arcillas limosas rojizas o marrones	0.5-2	10-80	40-50	VI
						[Cross-hatched pattern]	Limos arenosos marrón	0-1			
[Dotted pattern]	Lapillis amarillentos o rojizos muy meteorizados	1	10-200	40-50	V-IV	[Cross-hatched pattern]	Gravas basálticas en matriz arcillosa	0-2	40-150	Rechazo	V
[Vertical lines pattern]	Escorias y piroclastos de aspecto tobáceo	-	100-700	Rechazo	II-I	[Cross-hatched pattern]	Escorias basálticas	0-1	60-500	RQD < 20	IV
						[Cross-hatched pattern]	Basaltos muy escoriáceos	-	200-500	RQD 20-40	II
						[Vertical lines pattern]	Basaltos masivos	-	100	RQD > 50	I

E: espesor; R: resistividad aparente; SPT: número de golpes en ensayo SPT; GM: grado de meteorización; RQD: % de recuperación RQD
 Nota: Se indica el grado de meteorización (GM) según el Engineering Group, Geol. Soc. (1970), que establece los siguientes grados: I= roca fresca; II= roca algo meteorizada; III= roca moderadamente meteorizada; IV= roca muy meteorizada; V= roca completamente meteorizada; VI= Suelo Residual

FIGURA 1.2. Dos perfiles de alteración encontrados en la Laguna, Tenerife (González de Vallejo, 1979)

1.3. OBJETIVOS

Son varios los objetivos que se persiguen en este trabajo, a saber:

- Identificar la fábrica que presentan los suelos de la ciudad de Xalapa en estado natural y en estado compacto, bajo diferentes métodos de compactación y observar como influye ésta en su comportamiento geotécnico.
- Revisión bibliográfica que permitirá actualizar hasta el presente el estado del conocimiento de los suelos de origen volcánico. Esta revisión permitirá comparar las características geológicas y las propiedades geotécnica y de fábricas de otros suelos con los suelos en estudio. También permitirá comparar los ambientes climáticos en que se encuentran los suelos volcánicos del resto del mundo.

- Recopilación de la información geológica y geotécnica existente del lugar. Se recopilará la información geológica de la región en estudio, así como también, los estudios edafológicos realizados en los alrededores de Xalapa y se acopiarán los estudios geotécnicos que se han realizado en estos últimos dieciséis años.
- Se realizarán estudios complementarios de campo, como calicatas y recuperación de muestras de suelo en estado inalterado y alterado, para aplicarles ensayos que permitan caracterizar al suelo.
- Dilucidar las causas que controlan el comportamiento geotécnico de las cenizas volcánicas y esclarecer cómo los factores ambientales influyen en estos suelos.
- Identificación de las propiedades físico-químicas de los minerales de arcilla
- Identificar las propiedades geotécnicas del suelo, tanto en estado natural como amasado, y sobre la base de ello, caracterizar al material arcilloso.
- Considerando los puntos anteriores, comparar las propiedades geotécnicas obtenidas con otros suelos ya estudiados por otros autores.

1.4. ALCANCES DEL PRESENTE ESTUDIO

A partir de las necesidades planteadas por los objetivos que se enumeran en el apartado anterior, los alcances de este estudio comprenden lo siguiente:

- Recopilación de la información existente sobre suelos tropicales para plantear el estado del conocimiento (estado del arte) antes descrito.
- Se recopiló la información geológica de la región, incluye cartografía del Estado de Veracruz y estudio puntual del Eje neovolcánico. Además, se recopilaron los estudios geotécnicos que se llevaron a cabo en la zona sur de la ciudad de Xalapa, zona que ha presentado el mayor número de fallas en taludes compuestos por cenizas volcánicas.
- En el verano del año 2001 se llevó a cabo un par de calicatas dentro de la zona sur de la Ciudad de Xalapa, para obtener muestras del tipo alterado e inalterado. Del suelo extraído, 28 kg de suelo se remitieron al Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Madrid) y 4 kg al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana (Puerto de Veracruz, México).

- A finales del invierno de año 2003, se remitió 1 kg de suelo al Instituto de Ecología de Xalapa, México, para analizar en el microscopio electrónico de barrido la fábrica del suelo, tanto en estado natural (inalterado) como en estado compacto.
- En el mes de octubre del año 2003, se remitieron 300 gramos de suelo al Centro de Química del Consejo Superior de Investigación científica, para determinar la superficie específica de las partículas del suelo.
- Concluidos los trabajos de campo y de laboratorio se precedió a la interpretación de los resultados y a la redacción del presenta trabajo.

2. Conceptos teóricos básicos

2.1. MINERALOGÍA DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS

2.1.1. Concepto de minerales de arcilla

Desde el punto de vista de la geología, los minerales de arcilla son el producto de la degradación, ya sea por meteorización o por procesos hidrotermales, de otros silicatos o vidrios silicatados (Whitten y Brooks, 1980). Se encuentran en la naturaleza en forma de láminas, tubular y, raramente, de aspecto fibroso. El 80% a 95% de la corteza terrestre está constituida por silicatos (Lambe, 1979; Day, 2000; Whitten y Brooks, 1980).

Whitten y Brooks (1980) presentan una clasificación de los minerales de arcilla a partir de cinco grupos distintivos: caolinita, illita o ilita, montmorillonita, vermiculitas (se asocian con las montmorillonitas y las cloritas) y el grupo paligorskita (menos comunes y de aspecto fibroso). La tabla 2.1 se ha formulado con el objeto de observar, cuando el mineral origen pasa por un proceso de meteorización y presentar los minerales representativos de los grupos antes enunciados.

Desde el punto de vista de la ingeniería geotécnica, las arcillas son aquellas partículas cuya medida de diámetro es menor a 0.002 mm ($2\mu\text{m}$), estas partículas tienen un comportamiento coloidal en un medio acuoso, es decir, las fuerzas interpartículas de carácter eléctrico son las que predominan en sus uniones, más que las fuerzas gravitacionales. Otro aspecto que distingue a estos suelos, desde el punto de vista de la ingeniería práctica, es su naturaleza activa y por esta característica causan problemas en la mayoría de las obras. Otra propiedad que caracteriza a estos suelos, es su capacidad de adsorber y perder agua.

Para Yong y Warkentin (1975) los minerales de arcilla son el resultado de la meteorización química de las rocas y generalmente se presentan en partículas finas. Los minerales de arcilla, confirman estos autores, son silicatos de aluminio. Combinados el aluminio y el

oxígeno forman la unidad estructural básica (desde el punto de vista químico) que garantiza la formación de láminas.

TABLA 2.1. Clasificación de los minerales de arcilla desde el punto de vista geológico y su degradación según el medio en que se encuentra

Grupo	Mineral representativo	Meteorización en		Comentarios
		Medio ácido	Medio alcalino	
Caolinitas	Caolinita, dickita, nacrita	Feldespatos alcalinos ↓ Caolinitas	–	Es útil para manufactura de cerámicas. Minerales de arcilla comunes en la corteza
Ilitas	Ilita y sericita	–	Micas / feldespatos alcalinos ↓ Ilitas	Son minerales de arcilla comunes en la corteza terrestre.
Montmorillonitas (Esmectitas) / Vermiculitas	Montmorillonita, nontronita, beidellita	–	Rocas básicas*/Silicatos pobres en K ↓ Montmorillonitas	La degradación es considerando que se encuentra presente el Ca y Mg. Este grupo tiene la cualidad de absorber agua o perderla.

* Las rocas básicas son rocas ígneas, pobres en minerales de cuarzo y que tienen feldespatos cálcicos.

Para Mitchell (1993), los minerales de arcilla pertenecen a la familia de los minerales llamados filosilicatos, que también incluye a otro grupo de silicatos, como: la serpentina, pirofilita, talco, mica y la clorita.

En la actualidad, se acepta que las arcillas están constituidas por silicatos de aluminio hidratados.

2.1.2. Minerales que predominan en las cenizas volcánicas

No se entrará a definir y establecer las unidades estructurales de cada mineral de arcilla, pues está fuera del alcance de este documento y además hay abundante literatura al respecto, que viene ampliamente explicada por sus autores, por ejemplo existen los trabajos de Mitchell (1993), Yong y Warkentin (19775), Jiménez Salas y De Justo (1975), González de vallejo et al (2002), Lambe y Whitman (1979), De Santiago (2000), Battey y Pring (1997) y Tsige (1999), por citar algunos; pero sí se enmarcarán los aspectos de interés geotécnico en este apartado.

Los minerales de arcilla que predominan en las cenizas volcánicas vienen a estar representados, principalmente, por la halloysita y la alofana. La halloysita pertenece a la familia de la caolinita y se presenta en la naturaleza en forma hidratada y deshidratada. La forma hidratada tiene dos capas de caolinita separadas por una de moléculas de agua y la deshidratada carece de la capa de agua y sus láminas tiene la misma composición que la caolinita (Mitchell, 1993). El espacio basal, que comúnmente presenta la halloysita hidratada, es de 10 Å y la deshidratada de 7Å. La transformación de halloysita hidratada a deshidratada puede ocurrir a bajas temperaturas y es un cambio irreversible, es decir, no vuelve a recuperar la halloysita que estaba hidratada, la capa de moléculas de agua. A la halloysita deshidratada suele llamársele metahalloysita, pero preferentemente se alude de acuerdo al estado hidratado en que se encuentra (Yong y Warkentin, 1975).

Ahora bien, el espesor de la capa de moléculas de agua tiene 2.9 Å y se encuentra, como se dijo con antelación, entre dos capas cuyas estructuras son octaédricas-tetraédrica (láminas de caolinita). La diferencia entre la caolinita y la halloysita es la presencia de la capa de moléculas de agua en la halloysita, pero en esencia tiene la misma estructura, a saber: una capa tetraédrica ocupada por Si^{4+} y una octaédrica ocupada por Al^{3+} .

Como se dijo al principio del cuerpo de este apartado, el otro mineral constituyente de las cenizas volcánicas es la alofana. Consiste en un arreglo al azar de una capa tetraédrica de sílice y otra octaédrica comúnmente de aluminio. La alofana cuenta con una cristalización pobre, por la cual se le considera dentro de los minerales de arcilla no cristalizados (Mitchell, 1993). Como la alofana no tiene una estructura regular cristalina, suele no presentar los picos de difracción de rayos-X, por tanto se acostumbra a identificarse por la ausencia de líneas de difracción de rayos-X (Yong y Warkentin, 1975; Mitchell, 1993). La capacidad de intercambio catiónico de la alofana es alto y aumenta significativamente, cuando aumenta el pH. En la naturaleza se encuentra asociada a la halloysita, como la arcilla en estudio. En zonas constituidos por depósitos recientes de cenizas volcánicas meteorizadas y con buenas condiciones de drenaje, es común encontrarse presente a la alofana junto a la halloysita; también se encuentran, específicamente, en las partículas de vidrios 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 halloysita, puede reducirse si se seca el suelo previo al ensa-

yo (ver tablas 1.3 y 5.4). Según Mitchel (1993), la alofana no tiene una composición o forma definida y exhibe una gran variedad de propiedades físicas.

En resumen, la alofana la encontramos asociada a la halloysita en depósitos de cenizas y materiales piroclásticos que contiene 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.

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.

2.2. SUSTITUCIÓN ISOMÓRFICA E INTERCAMBIO CATIONICO

Dos aspectos juegan un papel importante en el control de la sustitución atómica: 1) el tamaño de los átomos o iones, y 2) su carga o valencia¹ (Battey y Pring, 1997).

Las láminas de los filosilicatos no son eléctricamente neutras, por tener defectos en su red cristalina o bien, debido a sustitución de cationes por otros de distinta carga. Cuando se produce la sustitución de un ión que se encuentra en una lámina de arcilla, por otro ión de igual tamaño, pero de valencia inferior se produce un defecto de carga en la superficie de dicha lámina. Esta sustitución incrementa la carga eléctrica en la superficie de la lámina de arcilla. Para equilibrar el defecto de carga en superficie, las láminas de arcilla atraen cationes y aniones de cambio hacia su superficie. Estos cationes y aniones atraídos, establecen enlaces leves en las superficies de las partículas de arcilla y pueden ser sustituidos por otros. A estos cationes y aniones se les denomina de intercambio. Las sustituciones de iones que se operan en las láminas se llevan a cabo, pero con la retención de la misma estructura del cristal (Mitchel, 1993).

La capacidad de intercambio cationico es la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede “adsorber”. Expresado en otras palabras: es igual a la medida del total de cargas en el mineral (De Santiago, 2000). La capacidad de intercambio cationico se expresa en miliequivalentes por cada 100 gramos de arcilla secada a 110° C.

¹Desde el punto de vista de la química, la valencia es el número que expresa la capacidad de combinación de un átomo con otros.

Por tanto, la sustitución isomórfica, ausencia de cationes en la estructura cristalina, disociación de hidroxilos (Al-OH, Mg-OH), adsorción de aniones y “presencia de materia orgánica”, son factores que justifican la presencia de carga eléctrica en la superficie de las partículas (Lambe, 1953, 1958). La carga eléctrica presente en las partículas de minerales de arcilla, es un factor muy importante que influye en las interacciones entre las láminas de arcilla, y por tanto, en las propiedades de permeabilidad, deformabilidad, de resistencia y en las características de plasticidad del suelo.

La descompensación eléctrica en las partículas de arcilla y debido al carácter de la estructura dipolar de las moléculas de agua, son factores que contribuyen a la creación de la doble capa difusa eléctrica, que cubre a dichas partículas. Esta doble capa está compuesta por una capa de aniones (carga negativa), situada en superficie de partícula y la rodea una capa exterior de carga opuesta (cationes). En la literatura técnica a esta doble capa se le denomina, usualmente, como capa dura de agua o capa de agua adsorbida. El espesor de la doble capa es de 400 Å y crece en función directa con el aumento de la superficie específica de la arcilla.

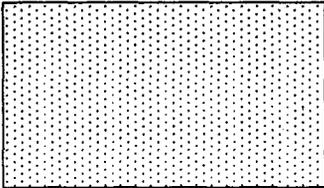
El incremento de la concentración de sales en el agua que se encuentra en el medio poroso del suelo, hace que el espesor de la doble capa difusa decrezca e implique una disminución de las fuerzas osmóticas del medio.

2.3. SUPERFICIE ESPECÍFICA

En el apartado precedente se habló de la capacidad de intercambio catiónico y capacidad de adsorción de las partículas, que son propiedades físico-químicas importantes, pero otra propiedad relevante de las arcillas es su superficie específica, que influye en las fuerzas eléctricas de la superficie de las láminas de arcilla y por tanto, influye en las fuerzas interpartículas.

La superficie específica es el área de superficie de la arcilla por unidad de masa. Se acostumbra a expresarse en m²/gr. Regularmente las partículas de arcilla suelen presentar morfologías de tipo laminar, excepto los minerales de arcilla de forma fibrosa (sepiolita y paligorskita) y tubular (haloysita). Las arcillas presentan superficies específicas muy grandes en comparación a las arenas. Por otro lado, los minerales de arcillas presentan grandes diferencias en sus valores de superficie específica, correspondiendo a la montmorillonita

los valores más altos, como se puede apreciar en la figura 2.1, donde se muestran los bordes de las partículas y sus tamaños relativos.

Mineral de arcilla	Vista de perfil	Superficie específica m ² /gr
Montmorillonita		800
Mica		80
Clorita		80
Caolinita		15

Nota: los valores de superficie específica son aproximados

FIGURA 2.1. Valores de superficie específica de algunos minerales de arcilla (Yong y Warkentin, 1975).

De la figura 2.1, se deduce que entre más pequeña es la partícula, mayor será la superficie específica de las arcillas.

La superficie específica influye, según su variación, en el comportamiento físico-químico de los suelos constituidos por minerales de arcilla (Tsige, 1999). Cabe destacar, que la superficie específica de las partículas depende del tamaño y forma de las mismas.

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.

Con el objeto de tener una idea de los valores en que oscilan la superficie específica y la capacidad de intercambio catiónico de los minerales de arcilla se ha formulado la tabla 2.2, cuyos datos han sido recopilados de Mitchell (1993) y Jiménez Salas y De Justo (1975). También se incluyen datos sobre minerales de arcilla típicos en cenizas volcánicas

TABLA 2.2. Superficie específica e intercambio catiónico de algunos minerales

Mineral de arcilla	Superficie específica m ² / gr	Cap de inter. Catiónico meq/100gr	Peso específico de las partículas
Halloysita	35- 70 ^a	5-40 ^a 10-50 ^b	2.55-2.56 ^a
Alofana	–	20-43 ^b	2.64 ^c
Ilita	65-100 ^a	10-40 ^{a,b}	2.60-3.0 ^a 2.60-2.86 ^b
Caolinita	10-20	3-15 ^a 2.2-15 ^b	2.60-2.68 ^a 2.63-2.66 ^b
Montmorillonita	700-840 ^a	80-150 ^a 75-150 ^b	2.35-2.70 ^a 2.65-2.84 ^b

a: Mitchell (1993); b: Jiménez Salas y De Justo (1975); c: estimado en este trabajo.

2.4. INTERACCIONES ENTRE LAS PARTÍCULAS

Las interacciones entre partículas en un fluido están condicionadas a las fuerzas de atracción y de repulsión; las primeras debidas a las fuerzas de Van der Waals y las segundas, deben su existencia a la carga negativa en superficie de partícula e implica a la doble capa difusa; a estas últimas se les denominan fuerzas de repulsión de carácter electroestático.

Las fuerzas de atracción de Van der Waals son denominadas por Battey y Pring (1997), como fuerzas atractivas “débiles”, no direccionales. Estas fuerzas decrecen y llegan a ser nulas con el aumento de la distancia entre partículas, es decir, dichas fuerzas son inversamente proporcionales a la séptima potencia de la distancia. Además de las fuerzas de Van der Waals, existen las fuerzas atractivas debida a las “diferencias de cargas eléctricas” en las partículas entre borde-borde y borde-cara.

Las fuerzas de repulsión de carácter eléctrico se desarrollan cuando dos partículas, inmersas en un fluido, se encuentran sus respectivas doble capa eléctrica difusa, éstas como son de la misma carga eléctrica se repelen, de tal suerte, que la distancia mínima de acer-

camiento entre partículas dependerá del espesor de la doble capa eléctrica de cada una de ellas.

La combinación de las fuerzas atractivas de Van der Waals y de repulsión de carácter eléctrico, determinan el comportamiento de las partículas en el medio fluido, a su vez, este comportamiento estará influido por las características físico-químicas del fluido. El pH y la salinidad del medio son dos factores que influyen en el comportamiento de las partículas y en su asociación de partícula a partícula. Puede decirse, que las fuerzas de repulsión de carácter eléctrico dependen también de la carga que presentan las partículas en sus bordes (enlaces insaturados) y del pH de la solución. Por otro lado, las fuerzas de atracción de Van der Waals no son influidas por las condiciones químicas del medio (De Santiago, 200), pero sí la doble capa eléctrica de las partículas, disminuyendo su espesor cuando el fluido aumenta su concentración de electrolito, es decir, cuando el fluido se hace más salobre (Lambe, 1958). Esta circunstancia hace que cuando la capa eléctrica disminuye de espesor, las partículas se aproximan entre ellas y la magnitud de las fuerzas de Van der Waals, superando una cierta distancia, imperan con respecto a las fuerzas eléctricas de repulsión y las partículas se unirán formando agregados (De Santiago, 2000; Tsige, 1999). La disminución del espesor de la doble capa eléctrica permitirá que las partículas se aproximen y entren en contacto, produciéndose el fenómeno de floculación; las partículas se apilan con orientación "aleatoria". En caso contrario, cuando la concentración del electrolito disminuye, aumenta la doble capa eléctrica difusa y las fuerzas que predominan son de carácter repulsivo; las partículas se apilan con alto grado de "orientación" (Lambe, 1953; 1958; 1979).

De todo lo dicho en este apartado, puede representarse por la siguiente ecuación:

$$\text{Interacciones electroestáticas} = f \{ \text{pH, cationes de cambio, salinidad del medio, temperatura} \}$$

En donde f es el operador de la función, que abarca todas las variables que acondicionan las interacciones electroestáticas entre partículas.

Si las partículas se aproximan (fluido con concentración de sales), pueden asociarse de la siguiente manera: contacto borde-borde, borde-cara y cara-cara. Estas mismas asociaciones, cuando se agrupan, forman flóculos que a su vez, constituyen estructuras abiertas con macroporos. Por el contrario, cuando la doble capa eléctrica aumenta de espesor (fluido con poca concentración de sales) y se incrementa las fuerzas repulsivas entre partículas, se produce una asociación dispersa, en la que las partículas no entran en contacto hasta su

“sedimentación”, pues el mismo signo de la carga de la doble capa eléctrica de las partículas hacen que se repelen (Lambe, 1958). En el apilamiento disperso, las partículas presentan una disposición en paralelo o casi en paralelo, con poros pequeños. En la figura 2.2, se ilustra lo comentado con anterioridad.

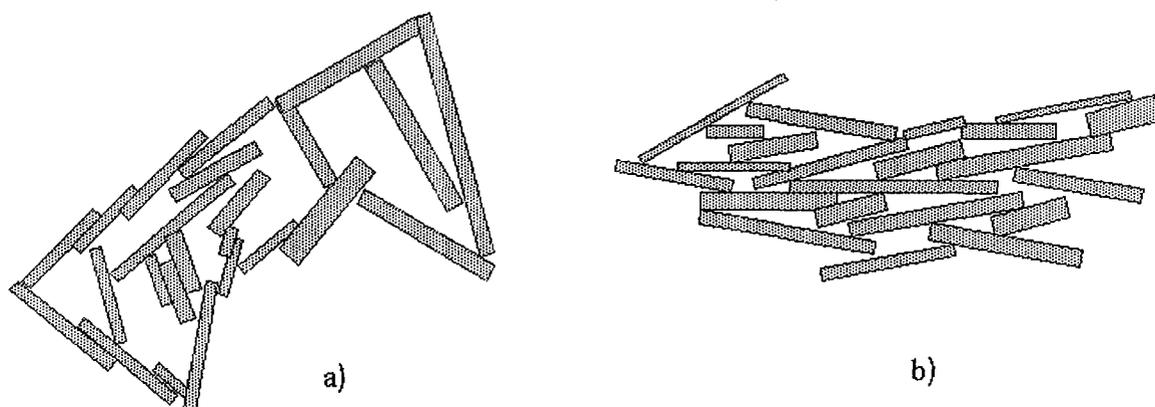


FIGURA 2.2. Tipos de estructuras. a) Floculada y b) Dispersa (Lambe, 1958)

Estas asociaciones elementales en los sedimentos se presentan en la naturaleza de una manera compleja, dado que están supeditadas a las características de las partículas (composición mineralógica y química, tamaño de las partículas y superficie específica) y a las condiciones del medio ambiente, dando como resultado conexiones y orientaciones de las partículas muy complejas. Dentro de las condiciones del medio ambiente se consideran la salinidad del medio, el pH, la temperatura, turbulencia del flujo, presencia de materia orgánica y carbonatos disueltos. Evidentemente, las presiones geostáticas influyen en el proceso postsedimentario y por ende, en la microfábrica final del suelo.

Por lo tanto, la infinita variedad de asociaciones elementales y ordenamientos que las partículas adquieren en la naturaleza, han dado motivo para asignar nombres a una gran variedad de tipos de micro fábricas. Estas se definirán en el siguiente apartado.

En la tabla 2.3 se resume todo lo comentado en este apartado y puede apreciarse la relación que existe entre el tipo de fluido y el tipo de estructura que se forma en el sedimento.

TABLA 2.3. Interacciones entre partículas y asociaciones elementales de acuerdo al tipo de fluido

Tipo de fluido	Tipo de contacto	Tipo de carga en		Tipo de fuerzas que predominan	Característica de la estructura	Tipo de estructura	Medio en que se desarrollan	Observaciones
		Borde	Cara					
Aguas saladas	Borde-cara	(+)	(-)	Atractivas	Abierta y con grandes poros	Floculada	Marinos y lagos salobres	El pH muy alto facilita la floculación, por la disminución de la capa doble. Las partículas se organizan al azar.
Aguas dulces	Cara-cara	(-)	(-)	Repulsivas	Cerrada y con pequeños poros	Dispersa	Lagos de aguas dulces y depósitos fluviales	Las fuerzas de repulsión se ven afectadas por la temperatura del medio. Las partículas se organizan en paralelo.

2.5. DIFERENCIA ENTRE FÁBRICA Y MICROESTRUCTURA

La fábrica de un suelo arcilloso se refiere 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 interpartícula. La figura 2.3, retomada de De Santiago (2000), ilustra claramente lo anterior.

Las tipologías de microfábricas de los suelos arcillosos más características, que se presentan en los depósitos son: turbostrática o regular, laminar u orientada, panal de abeja, esqueletal y oolítica² o nodular (González de vallejo *et al*, 2002). Se formula la siguiente tabla 2.4 que incluye características geotécnicas de las microfábricas antes enlistadas.

²Oolítico: concreciones en forma subsféricas, formadas por la precipitación de los carbonatos de calcio alrededor de un cristal de calcita. Las formas resultantes de estas concreciones son semejantes a las huevas de pescado. La palabra oolítica, hace alusión a las formas antes aludidas.

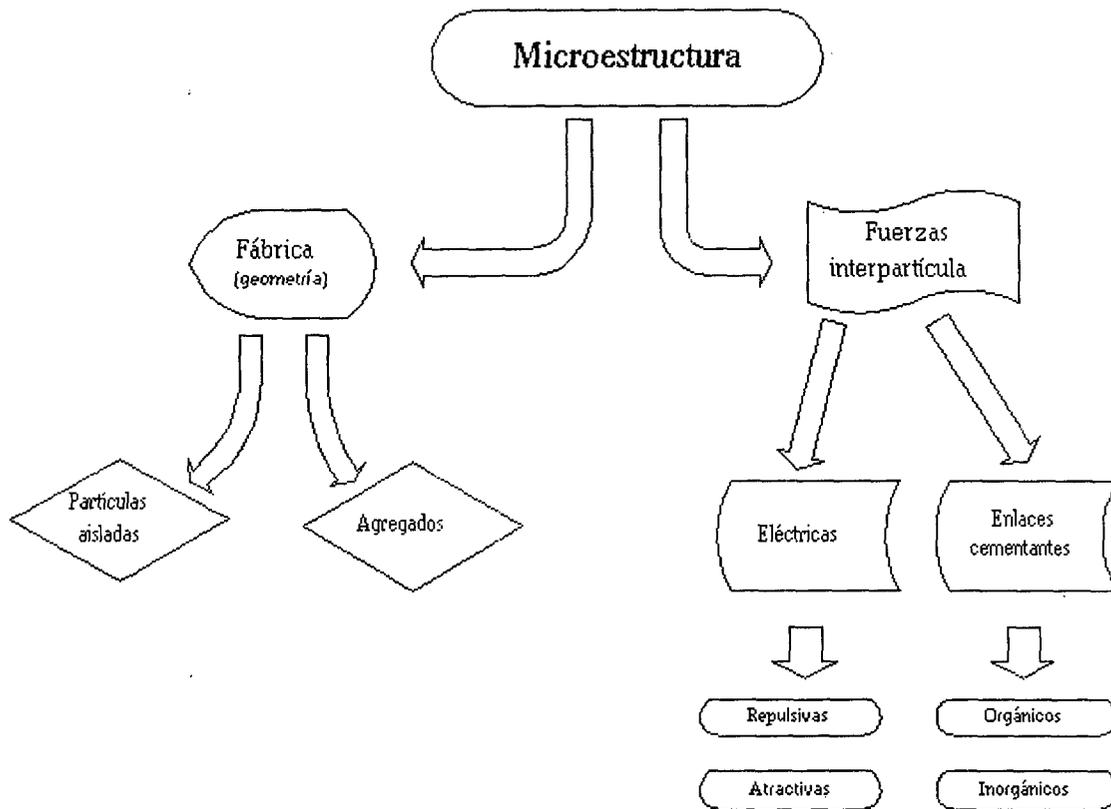


FIGURA 2.3. *Relación entre fábrica, microestructura y fuerzas interpartículas.*

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, que provoca una reorientación de las partículas, disminución de la porosidad y por otro lado, un aumento de su densidad.

2.6. PROBLEMÁTICA EN ARCILLAS VOLCÁNICAS

Uno de los problemas con que se enfrenta el ingeniero geotecnista al tratar con las arcillas volcánicas es la dificultad para identificarlas, dado que son suelos ricos en minerales de halloysita y alofana. Por una parte la halloysita se manifiesta de dos formas: hidratada y deshidratada (metahalloysita) y por otra parte, la alofana presenta una amplia gama de propiedades físicas (Mitchell, 1993). Estas características de los minerales de arcilla antes mencionados, influyen en los resultados de los límites de Atterberg y no permiten identificar su verdadera plasticidad en este tipo de suelo. Como observó Terzaghi (1958), los sue-

TABLA 2.4. Tipos de microfábricas más comunes y sus características geotécnicas
(González de Vallejo, *et al*, 2002)

Tipo de microfábrica	Densidad/porosidad	Orientación de las partículas	Tipo de estructura	Tipo de depósitos	Comentarios
Turboestrática o regular	Muy compacta/baja	Sin orientación Preferente	Matriz arcillosa continua	Marinos Sobreconsolidados	Suelen presentar resistencias muy Altas. No son susceptibles, ni colapsibles
Laminar u orientada	Compacta/ Muy baja	Orientadas según una dirección preferente	Matriz arcillosa continua (estructura compacta y anisótropa)	Marinos	La resistencia depende de la orientación de las partículas. No son susceptibles y no presentan colapsibilidad. Son poco compresibles.
Panal de abeja	Poco compacta/alta	Sin orientación preferente	Estructura abierta muy porosa	Medios salinos	Presentan resistencia alta en estado inalterado y susceptibilidad alta. Existe posibilidad de colapso
Esqueletal	Muy poco compacta/ muy alta	Sin orientación preferente	Organización, abundan poros y conectores	Depósitos de suelos meteorizados y residuales	Suelen presentar resistencias bajas y susceptibilidad alta. Existe posibilidad de colapso
<i>Oolítica o nodular</i>	<i>Compacta/baja</i>	<i>Orientación según los nódulos</i>	<i>Agregados esféricos y poco porosos</i>	<i>Depósitos de cenizas volcánicas</i>	<i>Presentan resistencias altas y susceptibilidad de media a alta. Colapsibilidad baja y son poco compresibles.</i>

los compuestos por minerales de halosita presentaban un límite plástico alto e índice de plasticidad inusual, en comparación a otros suelos residuales.

Atendiendo a otro aspecto importante, las arcillas volcánicas manifiestan en el ámbito natural fábricas oolíticas con agregaciones de partículas en forma nodular y como son suelos que se depositan con temperatura altas, sus partículas suelen tener contactos soldados, esta circunstancia se ve reflejada en los ensayos granulométricos por tamizado, que al no disgregarse debidamente, estos suelos dan granulometrías de tamaños grandes. De hecho, en el análisis granulométrico por decantación tiene que recurrirse a agentes defloculantes de mayor concentración en el fluido, para disgregar las partículas (ver figura 5.5).

Por lo anterior, debe tenerse en cuenta el origen geológico de los suelos para identificar las propiedades verdaderas del suelo.

Desde el punto de vista de su compactación, estas arcillas volcánicas no se les puede aplicar el método Proctor estándar, pues la humedad óptima determinada por esta técnica, hace imposible el manejo y la compactación del suelo en campo, a excepción en días muy soleados. En el presente trabajo se pudo observar, que el método de compactación por amasado ofrece mayores ventajas que el método de compactación por impacto (Proctor normal o modificado), pues el grado de acomodo de las partículas es mayor por amasado que por impactos.

Estas arcillas volcánicas mal compactadas, para formar rellenos y expuestos a la intemperie –por lo regular, en la práctica no son bien identificados estos suelos y por lo regular la técnica de compactación es mal seleccionada, dando como resultado rellenos mal compactados– son peligrosas, sobre todo cuando estos rellenos se mojan por presencia de lluvias, manifiestan grandes deformaciones verticales y afectan a las estructuras que soportan. Si estos rellenos se confinan lateralmente por obras de contención de gravedad (muros de mampostería), sus densidades aumentan y, por tanto, los empujes, resultando un saldo de grietas en las obras de contención: falla incipiente.

El efecto antrópico influye en las laderas, cuando se les aplican cortes para formar taludes que respondan a necesidades de los proyectos de urbanización o desarrollo de autovías. Los taludes fallan a menudo cuando el periodo de lluvias se presenta. Estas arcillas volcánicas, ante presencia de lluvias, adquieren un comportamiento inestable y dan la apariencia de ser muy susceptibles. Al modificarse las condiciones ambientales (periodos de lluvias relativamente prolongados) las arcillas volcánicas se tornan inestables ante rápidos incrementos de la presión intersticial y aunado a la presencia de fisuras de estos suelos, los taludes fallan. Estas fallas pueden implicar grandes deslizamientos de tierras, según sea el impacto antrópico.

Por último, no hay que olvidar que los minerales procedentes de materiales volcánicos son altamente inestables ante la meteorización, el efecto anterior conlleva a la modificación de sus propiedades físico-químicas y por ende sus mecánicas.

3. Las arcillas volcánicas de la Cuenca de Xalapa

3.1. EL EJE NEOVOLCÁNICO

El Eje Neovolcánico o Cinturón Volcánico Mexicano es una faja compuesta por edificios volcánicos que atraviesa de oriente a poniente a la República Mexicana, a la altura del paralelo 20 (INEGI, 1984). Este cinturón volcánico tiene un ancho que varía de 20 Km (en su parte más angosta) a 150 Km y tiene un largo de aproximadamente de 1.200 Km, contados a partir del litoral del Océano Pacífico (Estados de Nayarit, Jalisco, Guerrero y Michoacán) hasta el litoral del golfo de México (Estado de Veracruz).

El Cinturón Volcánico Mexicano, en su parte septentrional, colinda con las siguientes provincias fisiográficas: Llanura Costera del Pacífico, Sierra Madre Occidental, Mesa del Centro, Sierra Madre Oriental y llanura Costera del Golfo Norte; en su parte oeste y sur colinda con la Sierra Madre del Sur y al este, con el litoral del Golfo de México. En la figura 3.1 se muestra la localización del Eje Neovolcánico y la localización de las provincias fisiográficas de México.

Los aparatos volcánicos predominantes del Eje Neovolcánico son: estratovolcanes y conos de cenizas o volcanes cineríticos (Medina Martínez, F., 2000). También existen buena cantidad de calderas volcánicas¹ rellenas de coladas magmáticas y materiales piroclastos. En la figura 3.2 se indica la distribución de los edificios volcánicos a todo lo largo y ancho de la provincia fisiográfica en estudio.

La actividad del Cinturón Volcánico Mexicano se inició en el Oligoceno, Era Cenozoica (alrededor de 27 millones de años de antigüedad) y ha continuado hasta la época reciente. En la actualidad, la gran mayoría de los estratovolcanes del Eje Neovolcánico se

¹Un edificio volcánico derrumbado por el colapso del techo de su cámara magmática que lo soportaba, forma una caldera.



FIGURA 3.1. Localización del Eje Neovolcánico (INEGI, 1985).

encuentran en actividad². En la tabla 3.1 se indica los principales edificios volcánicos que están en actividad (Popocatepetl) y más próximos a la Cuenca de Xalapa. Sobre todo, como se verá mas adelante, el volcán Cofre de Perote ha tenido una fuerte influencia en la morfología que ocupa la Cuenca de Xalapa, además de la incidencia de los volcanes menores de la región que han contribuido a la actual morfología. Estos edificios menores han influido en el modelado final de la actual topografía.

El volcanismo del Cinturón Volcánico Mexicano está asociado a la zona de subducción formada por las placas tectónicas de Cocos y la placa continental mexicana, cuya zona de subducción se ubica en las costas de los estados de Guerrero y Oaxaca (INEGI, 1985, Medina Martínez, F. 2000). Como es sabido, la placa de Cocos tiende a encajarse por debajo de la placa Continental y forma una trinchera (zona de subducción) que va paralela al litoral, suministrando el magma al Cinturón Volcánico Transmexicano. El Eje Neovolcánico es la excepción a la regla: que todo sistema volcánico va paralelo a la zona de sub-

²Según la norma de la Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI), un volcán se considera activo si durante los últimos 5.000 años tiene registrada al menos una manifestación eruptiva.

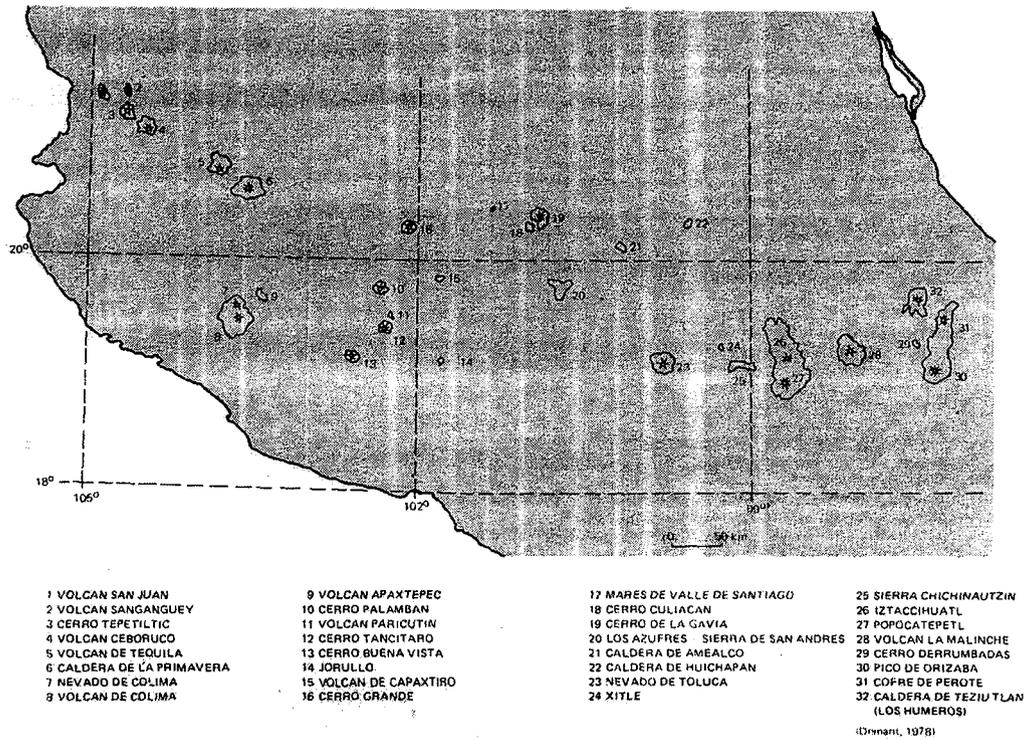


FIGURA 3.2. Localización del Eje Neovolcánico (INEGI, 1985).S

ducción, éste forma un ángulo con el eje de la trinchera. Ante esta peculiaridad, los volcanes localizados en el Estado de Veracruz (muy alejados de la zona de subducción) han presentado dificultades para su estudio (Medina Martínez F, 2000). En la figura 3.3 se ilustra el sistema de placas oceánicas de la parte del Océano Pacífico y del Mar Caribe.

TABLA 3.1. Principales volcanes activos del Eje Neovolcánico, localizados en su parte oriental (Medina Martínez F. 2000; Espíndola Castro, J.M., 1999)

VOLCÁN	ALTURA m.s.n.m.	TIPO	LOCALIZACIÓN	LITOLOGÍA	ÚLTIMA ERUPCIÓN
Xitle	3.120	cono cinerítico	19°15'N, 99°12'W	basalto olivínico	450 a.c.
Popocatépetl	5.452	estratovolcán	19°01'N, 99°37'W	hiperstena-andesita	1 935
Citlaltépetl (Pico de Orizaba)	5.676	estratovolcán	19°02'N, 97°17'W	andesitas de horblenda y augita	1 687
Cofre de Perote	4.280	estratovolcán	19°25'N, 97°11' W	Andesita de horblenda	-
San Martín	1.550	cono basáltico	18°35'N, 95°10'W	basalto-olivínico	1 922
Chichón	1.350	estratovolcán	17°20'N, 93°12'W	Andesita hornblenda	1 982

La litología predominante del Eje Neovolcánico está representada por andesitas, riocacitas y manifestaciones aisladas de volcanismo riolítico reciente, como los de la Caldera de la Primavera, en el Estado de Jalisco (INEGI, 1984). En la porción oriental, dentro de las manifestaciones volcánicas del volcán San Martín a finales del Mesozoico y principios del Cenozoico, se presentan emisiones de coladas basálticas-alcalinas, dentro de la región de Los Tuxtla (ver figura 3.1) que se encuentra pegada al litoral del Golfo de México.

Desde el punto de vista químico, la zona oriental del Eje Neovolcánico (región de Los Tuxtla) es considerada como alcalina y el resto de la porción como calco-alcalina, representada por gran abundancia de andesitas y dacitas. Los materiales pétreos son ricos en dióxido de silicio (INEGI, 1984).



FIGURA 3.3. La placa de Cocos y su influencia en el Eje Neovolcánico (INEGI, 1984).

3.2. LA CUENCA DE XALAPA

Según la carta estatal de regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de estadística, geografía e Informática (INEGI), 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 metros (en la parte más baja) a 1.500 metros en el pináculo del Cerro Macuiltepec.

La Cuenca de Xalapa está formada por un campo de pequeños volcanes, el más sobresaliente corresponde al Cerro Macuiltepec, que inició su actividad en el Cuaternario, con

una significativa representación 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 y Geissert, 1982) que son las que terminaron de modelar el paisaje actual.

El Cerro Macuiltepec es un pequeño edificio volcánico del tipo estratovolcán y su cráter tiene un domo compuesto por roca de basalto-andesítico. De acuerdo con la evidencia de campo, las erupciones fueron del tipo explosivo. En las inmediaciones del volcán se aprecian bombas, corrientes de lava, basalto fragmentado empacado en conglomerado volcánico y escorias. 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 colinda con la provincia fisiográfica Planicie Costera de Golfo de México, esta última recibe todas las brisas del golfo de México. En la figura 3.4 se indica la distribución antes descrita.

3.3. RASGOS GEOMORFOLÓGICOS

Los rasgos geomorfológicos están condicionados por la actividad volcánica que hubo en la región, representados por una serie de pequeños edificios volcánicos, de los que destacan el Volcán Macuiltepec y el de Coatepec, y a los grandes movimientos de terreno que

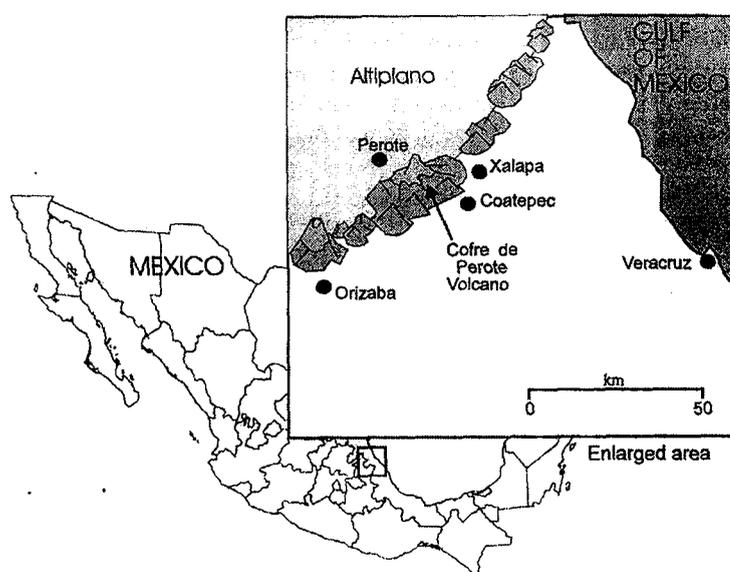


FIGURA 3.4. Localización de la Cuenca de Xalapa y la distribución de los volcanes de la región (Dubroeuq et al, 2002).

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 de suaves (planeze) a abruptas, dando a la topografía del lugar características de buen drenaje. Las laderas están constituidas por cenizas volcánicas de consistencia muy firme (tobas de color rojizo), 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. Éstos materiales arcillosos, por lo regular, se encuentran mezclados con grabas, arena y bombas volcánicas, y a veces los bloques de rocas basálticas se encuentran empacadas en éste tipo de suelos. Otro tipo de materiales piroclásticos que se encuentran en la parte sur y oriental de la Cuenca de Xalapa son grandes depósitos de arenas pumíticas que conforman una morfología muy irregular y accidentada.

Los problemas geotécnicos asociados a esta morfología que muestra actualmente la Cuenca de Xalapa, son los siguientes:

- Las laderas compuestas por cenizas (arcillas volcánicas) presentan inestabilidad ante cambios climáticos, es decir, presencia de lluvias muy intensas y temperaturas altas que hacen que se sequen y después, ante el agua de lluvia se mojen. Este fenómeno es muy común en laderas con pendientes mayores de 40° con respecto a la horizontal. Se incrementa la ocurrencia del fenómeno ante la acción antrópica, es decir, ante cortes en laderas mal diseñadas, para formar taludes que se adecuen a las necesidades de proyectos urbanos. El tipo de falla que presentan estos suelos arcillosos es del tipo de falla por pie de talud. Las superficies de falla son siempre planas y es común que pasan por pies de talud, o las superficies de falla salen por la cara del talud. Dado que los materiales que componen la base o pies de talud tienen una rigidez considerable, nunca se presentan fallas de fondo (observación directa de campo durante un periodo de 20 años), como ocurre en taludes o laderas que son soportados por estratigrafías compuestas por suelos blandos o muy compresibles. La manifestación típica de estas fallas, consiste en la exhibición de grietas de tensión sobre corona de talud. La incidencia de fallas de estas laderas o taludes, inducido por el efecto antrópico sobre el paisaje, se hace frecuente en los periodos de lluvias (verano y parte del invierno). Para el caso de taludes en terreno natural, los periodos de lluvias agudizan los eventos de fallas, sobre todo en taludes con relaciones mayores de 1:1. El efecto de la deforestación, como corte de árboles de raíz profunda y la exclusión de la

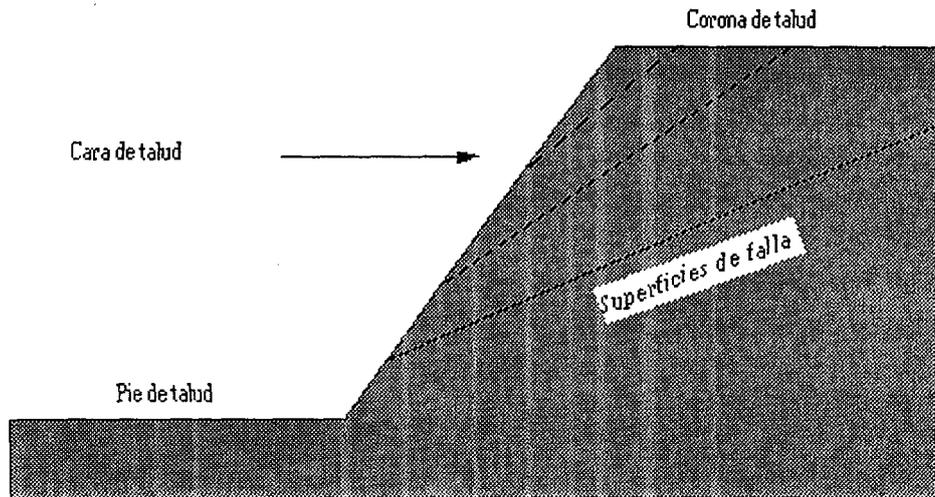


FIGURA 3.5. Tipos de superficies de falla en taludes compuestos por arcillas volcánicas

cobertura vegetal, contribuye a minimizar la estabilidad de los taludes. El mecanismo de falla de estos taludes o laderas es secuencial, es decir, primero desliza un bloque o cuña frontal que minimiza la pendiente original del talud y después se genera el deslizamiento de otro bloque que también reduce la pendiente hasta llegar al “ángulo de reposo”. En la figura 3.5 se ejemplifica el tipo de falla que presenta este tipo de arcilla de origen volcánico.

Los taludes compuestos por arenas pumíticas, presentan superficies de falla similares al de las arcillas volcánicas

- En los períodos de sequía, las arcillas volcánicas se resecan y manifiestan retracción y agrietamiento en superficie de los taludes o laderas desprovista de cobertura vegetal, ocasionando este evento desprendimientos de materiales que se depositan ladera o talud abajo, creando el taponamiento de causas naturales. En el caso de taludes con pendiente mayores de 40 % y alturas que sobrepasan los 8 metros y se encuentran junto a vialidades que son atacados por los agentes erosivos (principalmente agua de lluvia), colmatan las obras de arte hasta el punto de limitar su vida útil de proyecto.
- Las edificaciones que se desplantan próximas o sobre las coronas de taludes compuestos por arcillas volcánicas en estado natural, se ven seriamente amenazadas por la inestabilidad que muestran éstos al verse afectados por los cambios climáticos. Sobre todo, estos taludes fallan cuando el drenaje superficial e interno no se cuida.

3.4. LITOLOGÍA DEL LUGAR

Hacia el norte y sur de la Ciudad de Xalapa se encuentran los mayores depósitos de cenizas volcánicas, conforman éstas un terreno representado por un paisaje de pendientes abruptas a suaves. Quizás la actual disposición de estos depósitos de cenizas se deba a que los vientos dominantes de la región son los que provienen del norte y sur. En el momento de formarse las columnas eruptivas provocadas por las explosiones del Macuiltepec, las cenizas mezcladas con otros gases calientes formaron oleadas de piroclastos de muy baja densidad con respecto al aire circundante, y la presencia de los vientos predominantes arrastró las cenizas a varios kilómetros de distancia de la fuente de emisión. Las cenizas o arenas de tamaño menor a dos milímetros son fácilmente arrastradas por las corrientes de aire y pueden alcanzar grandes distancias para depositarse (Araña y Ortiz, 1984; Espíndola Castro, J. M. 1999). Por otra parte, la consistencia firme que muestran estas cenizas (arcillas volcánicas) se deba a que en el momento de su decantación, se depositaron casi secas y muy calientes, este hecho pudo ocasionar la soldadura entre partículas y darle la rigidez que actualmente tienen estas arcillas. Por esta razón se explica que a estos materiales volcánicos, algunos autores mexicanos les llamen tobas. A este tipo de tobas también se les llama ignibritas, mezcladas con un poco de arena (granos entre 1/16 a 2 mm) y diminutos cristales.

Las cenizas volcánicas o arcillas son de color café a café rojizo, se encuentran muy fisuradas y su consistencia natural es de firme a muy firme. El contenido de arena de estas arcillas es casi nulo, pasando prácticamente del 96 al 100% por el tamiz 200. La resistencia en estado seco es alta a muy alta (imposible de romper bajo la presión de los dedos) y su reacción al agitado es nula. La resistencia en el límite plástico es alta; al pasar del estado natural al seco, la arcilla presenta agrietamiento. En campo se observa que estos suelos soportan cortes verticales hasta de 10 metros sin que se les tengan que aplicar obras de sostenimiento alguno, siempre y cuando dichos corte (tajos) no se expongan al régimen de lluvias. En la figura 3.6 se presenta una fotografía que muestran en estado natural de la arcilla volcánica comentada, en ella se puede apreciar las pequeñas fisuras y agrietamiento que manifiestan estos suelos cuando se les expone al aire libre. Las fisuras de esta arcilla no presentan una orientación preferente, es decir, no tiene una orientación única y los planos de las fisuras tienen una orientación desordenada. Estas arcillas son muy vulnerables ante el agua, es decir, cuando se saturan pierden rápidamente su resistencia inicial. Por su plasticidad son muy problemáticas para compactarlas en campo. Si no se compactan debida-

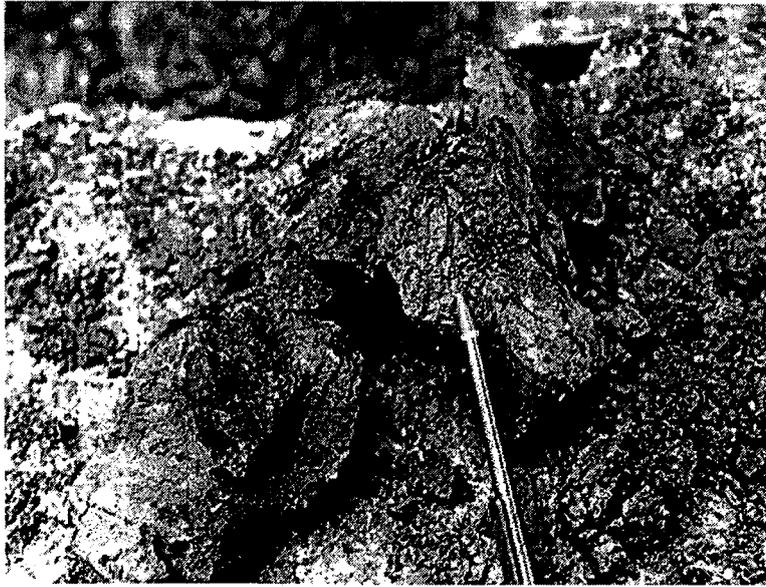


FIGURA 3.6. *Fisuras y pequeñas grietas en arcilla volcánica.*

mente, con su densidad máxima y su humedad óptima, estos materiales arcillosos cuando se usan en rellenos mal compactados son capaces de volcar obras de sostenimiento.

Hacia el sur y poniente de la Ciudad de Xalapa se localizan grandes depósitos de arenas pumíticas de color café claro, finas, de compacidad media a alta, uniformes, tiene un bajo contenido de finos ($< 6\%$) y granulometrías uniformes. Sus coeficientes de uniformidad y curvatura los clasifican como arenas mal graduadas. Estos depósitos de arena tienen inclusiones de piedra pómez y pequeños cristales volcánicos. Es interesante apuntar que estas arenas, por sus compacidades relativas altas, soporta cortes sin sostenimiento hasta de 17 mts. Este hecho da una idea de que las partículas de arena se encuentran soldadas entre ellas. Otra característica física de estas arenas es que sus granos tienen pesos específicos relativos muy bajos, por tanto, presentan en campo bajas densidades en estado natural.

Al pie del volcán Macuiltepec se encuentran conglomerados y coladas de basalto, con ramificaciones hacia oriente, poniente, norte y sur. Por las oquedades que se observan en los cortes de los bancos de basalto, puede inferirse que hubo una significativa emisión de gases. En estas porciones de terreno, abundan los aglomerados volcánicos de color café oscuro mezclados con cenizas y escorias y son muy compactos. En las inmediaciones del volcán se aprecian bombas que muestran formas moldeadas por trayectorias balísticas. Las escorias son muy porosas y de baja densidad.

En la tabla 3.2 se indican los materiales que predominan en la región, su antigüedad aproximada y la composición mineralógica.

TABLA 3.2. Litología que predomina en la Cuenca de Xalapa

MATERIAL	ANTIGÜEDAD	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
Arena pumítica	Cuaternario reciente (<1,5 m.a.)	Vidrios volcánicos ricos en silicio	Arenas de compactación media a muy compactas
Lavas	Pleistoceno (aprox. 1.5 m.a.)	-Piroxenos pequeños (augita) -Plagioclasas, predominio de labradorita	Presenta formas vesiculares y muy porosa.
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

3.5. RASGOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS.

El clima de la vertiente del golfo de México (porción oriental del Eje Neovolcánico) varía de acuerdo a los rasgos fisiográficos y se puede clasificar como de templado húmedo en las zonas altas de la Sierra Madre Oriental, de tipo subtropical en la parte intermedia (como es el caso de la Cuenca de Xalapa) y cálido húmedo (de tipo tropical) en la zona baja que corresponde a la Planicie Costera del Golfo de México (ver Fig. 1).

Las temperaturas promedio anual de la región de Xalapa varía entre 17°C y hasta de 28°C en el periodo seco de abril a mayo. La precipitación anual es de 1.700 mm a 2.200mm aproximadamente, con 280 días de niebla al año.

De acuerdo con al carta estatal de climas (1987) y según al criterio de Köppen (modificado y adecuado por García) la Cuenca de Xalapa se encuentra en una región cuyo clima es del tipo semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano, pero también colinda

hacia el oriente con la Planicie o Llanura costera del Golfo con un clima que se considera cálido húmedo. Cabe apuntar además, que la precipitación en la región de Xalapa, en el mes de más seco, es menor a 40 mm.

Es importante indicar que la Cuenca de Xalapa y los alrededores a ésta, se ha modificado por la tala inmoderada de árboles que se viene haciendo en estos últimos veinte años, creando este evento un cambio climático en todo este tiempo. Este cambio climático ha hecho que el régimen de temperaturas se torne más extremo, aunado a que la región en estudio está junto a la provincia Costera del Golfo de México con un clima cálido húmedo, hace que el medio se torne más favorable a la meteorización de los suelos y los materiales pétreos en superficie.

La hidrología de la Cuenca de Xalapa está representada por el Río Sedeno que surge, de poniente a oriente, la parte septentrional de la Ciudad de Xalapa, hacia el sur la bordea el Río Sordo y hacia el poniente el Río Pixquiac, con un trazado de norte a sur. Todos estos ríos descienden de las faldas del volcán Cofre de Perote, siendo el Pixquiac el más caudaloso. Los ríos mencionados tienen sus flujos continuos durante todo el año.

Sobre la base de la revisión de la carta estatal de hidrología subterránea (INEGI, 1987) y a la carta estatal de hidrología superficial (INEGI, 1987), la Cuenca de Xalapa se considera de mediana permeabilidad y cuenta con un escurrimiento anual entre 500 mm y 1000 mm.

3.6. SISMICIDAD

Según el Servicio Simológico Nacional del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional de México (2003), la Cuenca de Xalapa se encuentra en una zona de mediana sismicidad, zona que corresponde a sismos “no tan frecuentes”, pero de aceleraciones del terreno altas sin revasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Sólo ha ocurrido un sismo significativo en la Ciudad de Xalapa en toda su historia de fundada (desde la época prehispánica), que afectó gran parte de la ciudad y fue en el año de 1920. De la fecha antes mencionada al presente, no ha ocurrido otra catástrofe ocasionada por sismos.

3.7. ASPECTOS A CONSIDERAR DE LA GEOLOGÍA DEL LUGAR

Los aspectos a considerar que se derivan de lo dicho en este capítulo son las siguientes:

- El magma que suministra a los volcanes situados en la parte occidental y central del Eje Neovolcánico proviene de la Falla de Cocos, es decir, de la presión ocasionada por el choque de la Placa de Cocos y la plataforma Continental Mexicana. En la zona de subducción (trincheras que van paralelas a las costas de los Estados de Nayarit, Guerrero y Oaxaca) se generan las máximas presiones que hacen que el magma sea expulsado a la superficie de la capa Continental Mexicana.
- El Cinturón Volcánico Mexicano es la porción fisiográfica que más tiene actividad volcánica con respecto al resto del país, de hecho, en la actualidad sigue dicha actividad.
- El tipo de estructura volcánica que predominan en el Eje Neovolcánico (ver tabla 3.1) es del tipo estratovolcan y en menor medida como cónicos o conos de cenizas.
- La antigüedad de los materiales volcánicos del Cinturón Volcánico Mexicano o Transmexicano se remonta al Oligoceno (manifestaciones volcánicas más antiguas) hasta el reciente. La litología predominante está representada por basaltos, andesitas, dacitas y riodacitas.
- Desde el punto de vista químico, la parte oriental del Eje neovolcánico está compuesta por rocas alcalinas, emitidas principalmente por el Volcán San Martín y el resto de la provincia fisiográfica, está compuesta por rocas básicas.
- La morfología de la Cuenca de Xalapa se debe a una fuerte actividad volcánica en el Cuaternario, y el principal edificio volcánico que modeló la morfología reciente y le dio las características de buen drenaje fue el Volcán Macuiltepec y en menor medida los volcanes de Coatepec y el cofre de Perote.
- La morfología actual de la región de Xalapa cuenta con laderas que van de pendientes suaves a muy fuertes. Estas laderas están constituidas por arcillas volcánicas que son muy susceptibles a los cambios climáticos y arenas pumíticas. Se infiere que las partículas de las arcillas volcánicas y las arenas pumíticas se encuentran soldadas desde su deposición inicial (cuaternario reciente), explicando este hecho, la rigidez

de las arcillas y las altas compacidades de las arenas, que permiten grandes alturas en cortes a 90° con respecto a la horizontal.

- Las arcillas volcánicas (cenizas volcánicas) se presentan muy fisuradas y el tipo de falla que manifiestan en laderas y taludes son por pío de talud o por cara de talud y las superficies de fallas que desarrollan (ver figura 3.5) son planas. Desde el punto de vista geotécnico, estos suelos son los que más problemas ocasionan en el medio urbano.
- La litología predominante de la región de Xalapa está compuesta por arcillas volcánicas, arenas, lavas y escorias volcánicas y basalto-andesítico.
- El clima de la Cuenca de Xalapa es del tipo semicálido-húmedo a cálido-húmedo, esta última denominación está condicionada por la provincia fisiográfica de Planicie Costera del Golfo de México.
- La Cuenca de Xalapa, según el Servicio Sismológico Nacional (2003), está considerada de mediana sismicidad, con temblores poco frecuentes, pero con aceleraciones del terreno altas, sin que sobrepasen el 70% de la aceleración de la gravedad. En 1920, ocurrió un sismo que afectó a gran parte de la Ciudad de Xalapa y hasta el presente, no ha ocurrido otro sismo que afecte parcial o totalmente a la ciudad; esto indica que en los últimos años no han ocurrido eventos sísmicos que afecten a la Ciudad de Xalapa, lo cual no quiere decir que no puedan ocurrir temblores a futuro. De las cuatro zonas sísmicas en que han clasificado a la República Mexicana (A, B, C, D), la B es la que comprende a la Región de Xalapa. La zona A es asísmica, es decir, no se han registrado en estos últimos 80 años sismos; las zonas B y C son de mediana sismicidad y la D corresponde a grandes sismos y ocurrencia de sismos frecuentes, con aceleraciones del terreno mayores que el 70% de la aceleración de la gravedad.

4. Metodología de investigación

4.1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los objetivos enumerados en el capítulo 1, se considera la revisión de los estudios geotécnicos existentes que se realizaron en la zona de interés, cuya subvención estuvo a cargo de varias instituciones oficiales del estado. Todos estos estudios, en su mayoría, se realizaron en la pasada década de los noventa. De la revisión-estudio de la información disponible, sólo se seleccionaron dos sondeos profundos (Geocimentaciones, S. A., 1990, 1993) que describen y representan la estratigrafía del lugar; dichos sondeos se efectuaron dentro de la zona de mayor número de deslizamientos que se han reportado en estos últimos dieciséis años. En la figura 4.1 se indica la zona de deslizamientos y la localización de los sondeos estudiados, así como también, los sondeos efectuados para este estudio. En la siguiente tabla 4.1 se indican los estudios existentes, el año en que se hicieron y los tipos de sondeos que realizaron.

TABLA 4.1. Estudios geotécnicos revisados y que se consideraron para establecer la estratigrafía del lugar

Proyecto	Zona	Año	Nº sondeos con máquina perforadora	Nº sondeos con pozos a cielo abierto	Profundidad explorada mt	Tipo de muestras obtenidas
Desarrollo urbano Nueva. Xalapa.	Sur	IV/90	8	3	13.50	Alteradas/inalterada
1' y 2' Etapa Nueva Xalapa	Sur	IX/90	□	8	2.0	inalteradas
3' Etapa Nueva. Xalapa	Sur	III/93	□	2	2.5	Alteradas/inalteradas
Torre Ánimas	sur	VI/91	2	3	10	Alteradas/inalteradas
Estacionamiento IPE	Sur	I/92	1		9.50	Alteradas/inalteradas
Estacionamiento Veracruz	Sur	II/92	2	6	18	Alteradas/inalteradas

Nota: para el desarrollo de este trabajo sólo se consideraron los tres primeros trabajos.

En este mismo capítulo, mas adelante, se presenta la estratigrafía de estos dos sondeos. Es oportuno indicar, que los estudios revisados se realizaron en la zona sur del área

metropolitana de la Ciudad de Xalapa (ver figura 4.1) Estos estudios son de carácter rutinario que sólo persiguen describir la estratigrafía del lugar, determinar la carga de hundimiento y estimar los asentamientos (inmediatos y deferidos) de las estructuras a desplantar. Ante el pragmatismo de estos estudios, que no responden al cuestionamiento a fondo del comportamiento de estos depósitos de cenizas y ante la necesidad de caracterizar a estos suelos de origen volcánico de una manera más amplia, tanto a su microfábrica y comportamiento geotécnico, se programó ampliar la prospección del lugar de interés con calicatas que permitieran obtener muestras, tanto inalterado como alterado, para aplicarles ensayos más refinados y poder caracterizar a detalle el suelo.

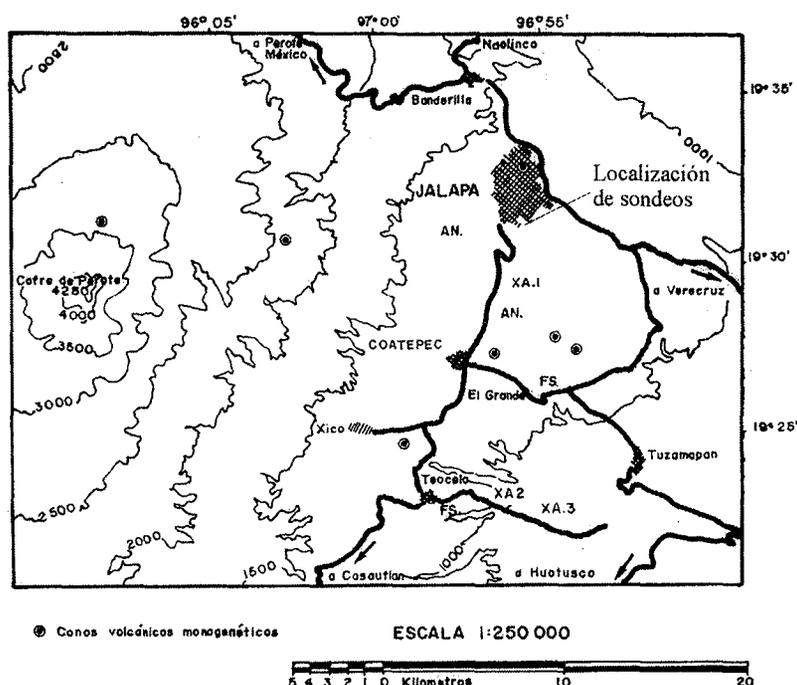


FIGURA 4.1. Localización de los sondeos aportados por los estudios geotécnicos y sondeos efectuados

De acuerdo con la problemática conocida que presentan estas arcillas volcánicas, a la literatura técnica revisada y la información geotécnica disponible del lugar, se pudo establecer la metodología de trabajo para caracterizar al suelo, familiarizándose con las técnicas de laboratorio que permitieran identificar sus características físico-químicas, estudio de la microfábrica del suelo e identificación de las propiedades geotécnicas, incluyendo la identificación de las variables tensionales como las la succión inicial del suelo, ciclos de histéresis succión-humedad y la deformabilidad del suelo bajo succión controlada.

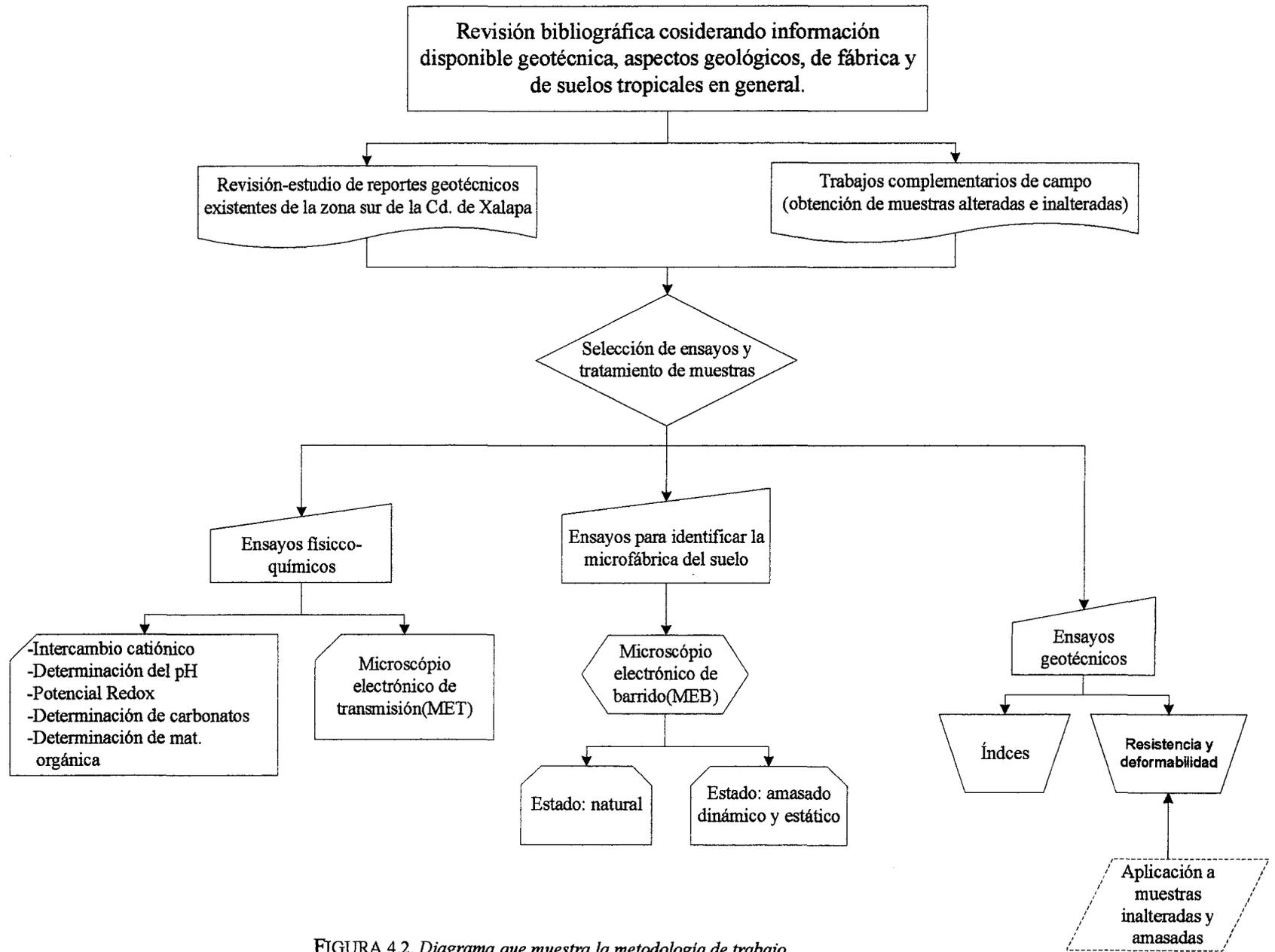


FIGURA 4.2. Diagrama que muestra la metodología de trabajo

En la figura 4.2 se muestra un diagrama que presenta, de una manera sucinta, la metodología de trabajo que se utilizó y que aquí, en este capítulo, se detalla. En la misma figura mencionada, se puede observar que esta metodología logró identificar la microfábrica del suelo para interpretar mejor la influencia en el comportamiento mecánico de la arcilla volcánica.

Por otra parte, y con el objeto de otorgarle cierto rigor a los trabajos de prospección presentados por los estudios geotécnicos revisados, en el apartado siguiente, se retoma la descripción de los trabajos de campo que presentan estos estudios geotécnicos, de los cuales, el que suscribe tuvo la oportunidad de supervisar y coordinar.

4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE CAMPO

Los trabajos de campo consistieron en realizar sondeos con equipo de perforación y pozos a cielo abierto o calicatas. En ambos tipos de sondeos se extrajeron muestra del tipo alterado e inalterado; en los primeros, además de extraer muestras a gran profundidad, se realizaban pruebas de resistencia a la penetración estándar (ensayos SPT¹) a cada medio metro de profundidad. Toda vez que se extraía el tomamuestras SPT, se repasaba las paredes del pozo correspondiente al tramo sondeado por el tomamuestra SPT con broca tricónica de 4 plg e inyectando lodo bentonítico (mezcla de agua con bentonita), y después se perforaba el fondo del sondeo un espesor de 5 a 10 cms, dependiendo de la secuencia estratigráfica, hasta eliminar del pozo los residuos producto del corte de la broca tricónica. Concluida esta operación se volvía a introducir el varillaje, acoplado con el tomamuestras SPT, hasta la profundidad de avance. En todo momento se cuidó la limpieza del fondo del sondeo y para evitar que las muestras extraídas no se contaminaran con lodo de bentonita, los tomamuestras SPT estaban dotados, en su cabeza de acoplamiento, con una válvula de bola de acero que evitaba el fluido del lodo del varillaje hacia la muestra. Lo anterior vale para la obtención de muestras alteradas con tomamuestras SPT.

Para la obtención de muestras inalteradas de arcilla dura (cenizas volcánicas), con buena calidad de recuperación y "mínima perturbación", se utilizó tomamuestra de tubo shelby dentado². Acoplándose dicho tomamuestras al varillaje se introducía al fondo del sondeo, de tal suerte que con la rotación y la carga estática inducida por la máquina perfo-

¹Se define a la resistencia a la penetración estándar, como al número de golpes correspondientes a una penetración de 30 cms de la cuchara muestreadora, con una masa golpeadora 63.5 ($\pm 0,5$) kg con una caída de 76 (± 1) cms (UNE 103-800-92).

²Tubo de acero de pared delgada de alta resistencia, con cabeza de acoplamiento con válvula de bola.

radora al través del varillaje sobre el fondo de la perforación, se iba labrando la muestra de suelo hasta alcanzar una longitud de 1.0 mt y un diámetro de 3 15/16 de plg. Esta operación se efectuaba con presiones muy bajas de inyección de lodo y a bajo número de revoluciones por minuto (no más de 35 rev/min), esta providencia permitía obtener mejor calidad en las muestras (PEMEX, 1974).

Toda vez que se extraían las muestras inalteradas de la perforación, se observaba el tipo de suelo, se medía la longitud de la muestra, se sellaban su cabezal y su base con parafina y manta de cielo. A las muestras alteradas obtenidas con el tomamuestras SPT, se abría el tubo partido, se medía la longitud de la muestra, se ensayaba con un penetrómetro de bolsillo para identificar la consistencia de la muestra (qu) y después se le aplicaban pruebas manuales para su clasificación y se etiquetaban.

Para determinar la calidad del muestreo, de cada sondeo, se calculaba el índice de recuperación con la siguiente expresión (PEMEX, 1974):

$$\text{I.R. (\%)} = \text{L.M.} / \text{L.H.}(100)$$

siendo L.M. la longitud de la muestra y L.H. la longitud de hincado del tomamuestra.

En la tabla 4.2 se indica la calidad del muestreo, según las normas de PEMEX:

TABLA 4.2. Calidad del muestreo en muestras alteradas e inalteradas

% DE RECUPERACIÓN	CALIDAD DEL MUESTREO
< 40	Mala
50 a 70	Media
> 70	Buena

En la obtención y confección de muestras superficiales de suelo arcilloso de tipo inalterado, procedentes de pozos a cielo abierto, se cuidaba que la muestra no se insolara y toda vez que alguna cara de la muestra quedaba afinada se sellaba con parafina para evitar la evaporación del agua del suelo (pérdida de humedad del suelo), luego se cubría con manta de cielo (o vendas) y parafina hasta quedar una cubierta con espesor de poco más de 3 mm.

Sobre las paredes del pozo a cielo abierto se determinaba a cada 50 cm la resistencia a la compresión simple con penetrómetro de bolsillo, para identificar la consistencia de la arcilla. Al suelo se le aplicaban pruebas manuales para su clasificación preliminar.

En todo momento que duraba la campaña de prospección, se cuidaba los siguientes aspectos: protección de las muestras en campo ante la insolación, guardar el sentido de las muestras inalteradas tal como se extraían, es decir, se indicaba en campo la cabeza y base de la muestra inalterada, con esto se cuidaba la posición de la muestra *in situ* y el sentido de aplicación de las presiones geoestáticas sobre el suelo en cuestión y un tercer aspecto, pero no menos importante, era el del embalaje y cuidado de las muestras a la hora del traslado al laboratorio.

La coordinación de los trabajos de prospección y criterio de elección de muestreo estaban bajo la dirección de un geólogo o ingeniero civil con experiencia en procedimientos geotécnicos de campo. También la descripción de la secuencia estratigráfica y la clasificación manual de las muestras de suelo estaban bajo la responsabilidad del geólogo o ingeniero en turno.

Todo la metodología que aquí se presenta, esta basada en la norma de "Especificaciones Generales para el Proyecto de Obras", norma 2.214.05, PEMEX; equivalente a las Normas Españolas UNE-103800:1992 y UNE-7371:1975.

Los ensayos de laboratorio que reportaron estos estudios fueron los siguientes: contenido de humedad, análisis granulométrico por tamizados, límite líquido, límite plástico, densidad relativa de las partículas del suelo, densidad natural, densidad seca, densidad máxima y humedad óptima (Proctor estándar), ensayos de rotura a compresión simple, determinación de los parámetros de resistencia en prueba rápida no drenada y consolidación unidimensional. Todos estos ensayos, según se señala, estuvieron realizados bajo la normativa establecida por el Manual de Mecánica de suelos (instructivo para ensayos de suelos) de la Secretaria de Recursos Hidráulicos (1976).

Se presenta, a manera de resumen, en la tabla 4.3 los rangos en los que varían las propiedades índice y mecánicas que reportan estos estudios.

Con la finalidad de visualizar lo revisado hasta ahora, se muestra en la figura 4.3 el perfil estratigráfico de los depósitos arcillosos volcánicos con la variación de sus propiedades índice, a todo lo largo de la profundidad de prospección.

TABLA 4.3. Rango de las propiedades índice y mecánicas que reportan los estudios revisados

Estudio	Índice						Compresibilidad		Resistencia		Clasificación
	w %	LL %	LP %	ρ_{nat} gr/cm ³	G -	F %	e -	P_c kPa	q_u kPa	C_{un} kPa	Sucs
D.N. X.	44-50	84-93	24-50	1.79-1.85	2.58-2.68	96-97	1.0-99	41-49	186-196	21	OH-CH
1 ^a y 2 ^a Etapa	38-51	78-92	30-40	1.51-1.74	2.54-2.56	97-98	1.0-1.5	76		69.6-96.1	OH-CH

4.2.1. Ampliación de los trabajos campo

La distribución y localización de los sondeos que forman parte de la ampliación de este trabajo (sondeos efectuados en el verano del año 2001) y como se dijo al principio de este apartado, estuvieron condicionados a la ocurrencia frecuente de "grandes" deslizamientos de taludes en la periferia del área urbana de la Ciudad de Xalapa (ver figura 4.1), puntualmente al sur de la mancha urbana y sólo se ha registrado, en estos últimos dieciséis años, un deslizamiento significativo en la zona norte de la ciudad. Se ejecutaron dos sondeos, un pozo a cielo abierto y otro con pala cavadora, los cuales se ubicaron en la zona sur del área urbana.

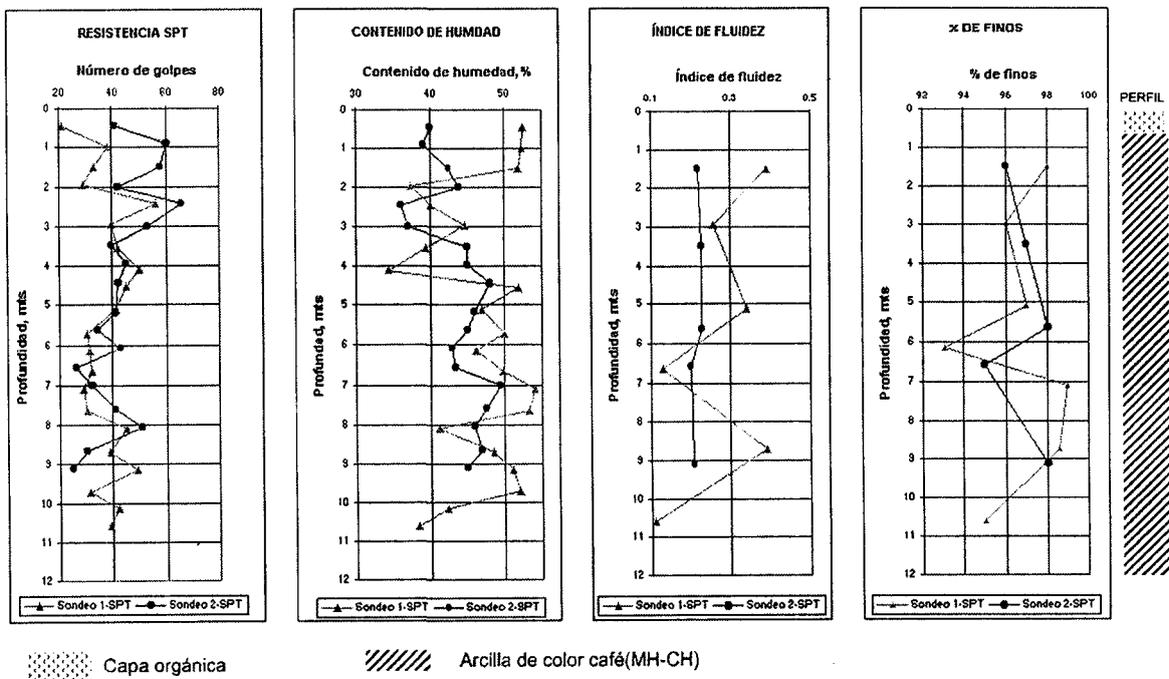


FIGURA 4.3. Estratigrafía presentada por los estudios revisados que corresponden a la zona sur de la Cd. de Xalapa

Del pozo a cielo abierto se extrajo 30 kg de material alterado y una muestra inalterada a la profundidad de 2.8 mts; y del sondeo con pala cavadora se extrajeron muestras alteradas a la profundidad promedio de 1.0 mt. La muestra inalterada presentó fisuras y dicha condición del estado del suelo dificultó el labrado de la muestra cúbica. En la figura 4.4 se muestra este hecho y se puede observar como los terrones desprendidos de la muestra se encuentran al pie de la misma, por el desprendimiento ocasionado ante el cambio inducido por la excavación, dicho de otra manera, la eliminación de la presión geostática por la excavación y el contacto de la muestra con el medio ambiente, hizo que las fisuras se convirtieran en grietas en la muestra. Es necesario indicar, que el sondeo efectuado con pala posteadora es de carácter verificadorio y se detectó el mismo material que en el sondeo con pozo a cielo abierto.

Los trabajos de campo se llevaron a cabo con la misma metodología descrita en el apartado anterior, y por ende, con las mismas especificaciones indicadas.

Después de la recolección de las muestras, se procedió a la clasificación visual y al tacto de la arcilla volcánica en estudio. En la tabla 4.4. se vierte la descripción correspondiente.

4.2.2. Estratigrafía identificada en los trabajos de ampliación

La estratigrafía registrada está constituida, en la parte superficial, por una pequeña capa vegetal y luego subyacían las cenizas volcánicas, objeto de nuestro estudio. Hasta la profundidad excavada, no se registro el nivel de aguas freáticas(NAF) y puede decirse, que

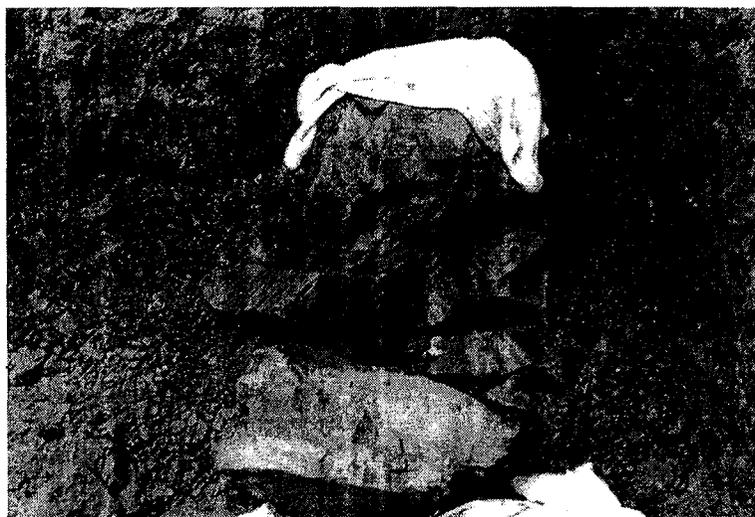


FIGURA 4.4. *Labrado de muestra cúbica muy fisurada*

a lo largo de la profundidad de prospección, la estratigrafía no cambia y la descripción visual y al tacto de la arcilla corresponde a la mostrada en la tabla 4.4. Se efectuaron ensayos con penetrómetro de bolsillo (sobre las paredes del pozo) a la profundidad de 2.80 mts, obteniéndose lecturas de 34.3 kPa a 38 kPa, valores que corresponden a suelos finos de consistencia firme a muy firme. La estratigrafía del punto donde se efectuó el sondeo con pozo a cielo abierto (19° 30' N y 96° 54' O) se muestra en la siguiente figura 4.5.

TABLA 4.4. Descripción visual y al tacto de la arcilla volcánica

Estado	Descripción	Observaciones
Inalterado	<ul style="list-style-type: none"> - color café rojizo - consistencia inicial muy firme - resistencia inicial muy alta - tipo de falla frágil - reacción al agitado nula - pegajosidad nula 	La arcilla presenta fisuras en estado natural y los planos de las fisuras no muestran una orientación definida.
Amasado	<ul style="list-style-type: none"> - tenacidad en el límite plástico alta - reacción al agitado nula - pegajosidad nula - consistencia firme - resistencia en estado seco muy alta 	<p>Difícilmente se pueden aglutinar los grumos y por ende amasar.</p> <p>En estado seco es imposible romper los cubitos de suelo (secados al sol).</p> <p>Clasificación preliminar SUCS: CH-OH</p>

4.3. INSTITUCIONES DONDE SE LLEVARON A CABO LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Son varias las instituciones en la que se llevaron a cabo los ensayos de laboratorio. Los trabajos de experimentación se iniciaron en el Laboratorio de Mecánica de suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Veracruzana (FIUV) del Puerto de Veracruz (México) y se continuo el trabajo de investigación en el Laboratorio del Transporte y Mecánica de suelos "José Luis Escario", del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de fomento, el trabajo de microscopía electrónica de transmisión (MET) se llevó a cabo en el Centro de Microscopía Electrónica de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y por último, se terminó de trabajar en el Laboratorio de Microscopía del Instituto de Ecología, A.C. (IEAC) de Xalapa (México).

De los sondeos realizados complementarios se recolectaron 25 kg de suelo (además de una muestra inalterada), de los cuales 7 kg se remitieron al Laboratorio de la FIUV y 18 kg de suelo alterado (más pequeñas muestras prismáticas inalteradas para ensayos en edómetro) se remitieron vía aérea al Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Del suelo remitido al Laboratorio de Mecánica de suelos de la FIUV, se tomó 1 kg para remitirse al Laboratorio de Microscopía del IEAC. Del suelo remitido al Laboratorio de geotecnia de CEDEX se seleccionó 500 gr de suelo, para ensayar en el Centro de Microscopía electrónica de la UCM.

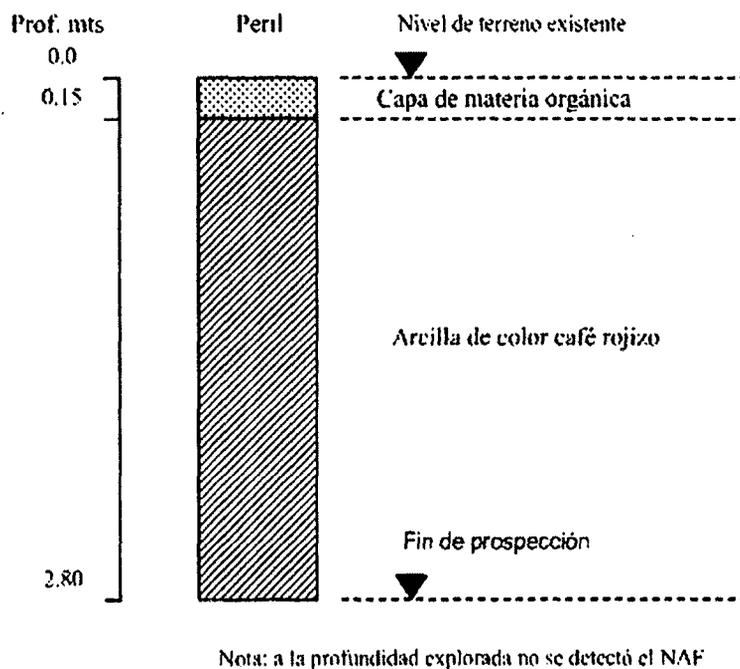


FIGURA 4.5. Perfil estratigráfico del punto donde se efectuó el muestreo

En la tabla 4.5 se indica los ensayos efectuados en cada institución y los periodos de trabajo. Cabe indicar que en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la FIUV, se comenzaron a labrar pequeñas muestras prismáticas en el cuarto húmedo, luego se sellaron con parafina y se embalaron para remitirlas al Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Estas muestras se labraron con la precaución de montarlas, en momentos posteriores, a los anillos de consolidación.

Como se puede apreciar en la tabla 4.5, el tiempo requerido para caracterizar al suelo, objeto de este estudio, ha sido de casi 2 años de trabajo experimental.

4.4. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

4.4.1. Determinación del contenido de sulfatos

La determinación del contenido de sulfatos, se realizó por el método de cromatografía para la identificación de aniones y cationes mono y divalentes en el suelo. La técnica permite identificar simultáneamente Cl^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , NO_3^- , SO_4^{2-} , Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . El análisis se efectúa con un cromatógrafo iónico 761Compact IC, equipado con un cargador de muestra 766 IC Simple Processor. La metodología de este ensayo se describe en el trabajo recientemente presentado por Hervás y Rodríguez (2003) del Laboratorio de geotecnia del CEDEX y se ha hecho de acuerdo a la norma UNE 103201:1996.

TABLA 4.5. Instituciones donde se realizaron los ensayos y periodos de duración

Institución	Ensayo que se realizaron	Períodos de trabajo
Laboratorio de Mecánica de suelos De la FIUV	Índices, ensayo de compactación Proctor normal, determinación de la densidad máxima en equipo Harvard miniatura y pruebas triaxial tipo UU en suelo amasado.	25/VI/01 al 10/VIII/01
Laboratorio de Geotecnia del CEDEX	Físico-químicos, índices, ensayo de compactación Proctor normal y modificado, triaxiales tipo UU, CD y CU* en suelos amasados, permeabilidad, deformabilidad con succión controlada tanto a muestras inalteradas como amasadas, ciclo de histéresis succión-humedad y succión inicial.	8/XI/01 al X/03 (se tiene en proceso un ensayo de succión-humedad, que se prevé terminar en noviembre del año en curso)
Centro de Microscopía Electrónica de la UCM	Microscopía electrónica de transmisión y estudio mediante difracción de rayos-X	26/II/02 al 6/III/02
Centro de Microscopía del IEAC	Microscopía electrónica de barrido	23/I/03 al 26/II/03
Centro de Química Orgánica del CSIC	Determinación de la superficie específica de las partículas	8/X/03 al 30/X/03

* UU:Triaxial rápido no drenada; CD: consolidada drenada; CU: consolidada no drenada.

4.4.2. Determinación del contenido de materia orgánica

Con el deseo de saber si la materia orgánica influye en el intercambio catiónico del suelo y en los procesos de meteorización (la meteorización aumenta con el contenido en cationes alcalinos), se determinó el contenido de materia orgánica y húmica del suelo, con ácido crómico, con el método modificado de Walkley-Black con valoración potenciomé-

trica, con un equipo Tritino 751GPD Metrohm y un Electrodo de Platino Metrohm, modelo 6.0451.100, con rango de trabajo de -5 a 80° C del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. En el Estudio Comparativo realizado por Hervás y Rodríguez, del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, presentan la descripción del método utilizado para este ensayo, tomando como referencia la norma UNE 103204:1993.

4.4.3. Determinación del pH

La determinación del pH se realizó bajo el criterio propuesto por la norma D 4972-95^a ASTM.

4.4.4. Determinación del contenido de carbonatos

En la estimación del contenido de carbonatos se realizó bajo la metodología propuesta por la norma UNE 103200:1993.

4.4.5. Agua adsorbida e inter-lámina

Determinación de la cantidad de agua inter-laminar de minerales de arcilla. Se procedió a seleccionar tres muestras de suelo y se secaron en la estufa a una temperatura de 60° C. Y se determinó su contenido de humedad. Luego se metieron al horno de alta temperatura a una temperatura de 400° C y a cada tres horas se sacaba del horno y se metían las muestras en un recipiente hermético e isotérmico, para que la muestra no se humectara, hasta su total enfriamiento y luego se pesaban en una balanza de alta precisión. Así se procedió hasta obtener una peso constante de las muestras. Con tal procedimiento se consideró que al no variar los pesos de las muestras se había determinado la humedad higroscópica.

4.5. TÉCNICAS UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS MINERALÓGICO Y DE FÁBRICA

4.5.1. Difracción de rayos-X

Difractograma de polvo. Con la finalidad de identificar los minerales del suelo arcilloso, de una manera total(muestra total), se procedió a determinar un difractograma de polvo

con un aparato de rayos-X de difracción, marca Philips, modelo PW 1130/90, propiedad del Departamento de Microscopía electrónica de la UPM.

El tratamiento de las muestras para identificar los minerales constituyentes, se sujetó a lo siguiente:

- Se seleccionó una porción de 50 gramos y luego, se metió a la estufa a una temperatura menor de 60° C, durante un periodo de 24 horas.
- Secado el suelo, se depositó en un mortero de ágata para disgregarlo, siempre procurando evitar romper las partículas.
- Disgregadas las partículas de suelo, se cuarteaba el material y se seleccionaban unos 4 gramos para luego cribarlos por el tamiz 400 ASTM (tamaño de partícula < 63 mm –0.0063 mm–). A esta porción de suelo se le determinó el difractograma de polvo.

4.5.2. Microscopía electrónica de transmisión

Con la finalidad de observar las partículas aisladas y apreciar su morfología, se procedió a utilizar un microscopio electrónico de transmisión marca JEOL, modelo JEM 2000 FX. Las muestras observadas no requirieron de un tratamiento especial para su observación, prácticamente se les dio un tratamiento como en el descrito en el apartado anterior, a diferencia que al polvo de suelo, se le dio un tratamiento de bañado con oro en el aparato metalizador marca Balzers SCD 004, del Departamento de Microscopía electrónica de la UCM.

4.5.3. Microscopía electrónica de barrido

Con el objeto de identificar la fábrica del suelo en estado inalterado y alterado, bajo sus dos modalidades: amasado estático y dinámico, se llevó a cabo con un microscopio marca JEOL, modelo JSM6400 del Instituto de Ecología A. C. De Xalapa (México). La rutina de trabajo a seguir en la selección y preparación de muestras inalteradas y alteradas, fueron los siguientes:

1. **Preparación de la solución de agar**³. En un baso de precipitado se vierten 200 ml de agua bidestilada y se coloca en una plancha térmica, hasta alcanzar una temperatura

³El agar se extrae de las algas procedentes del océanos Atlántico, del Pacífico y del Índico. Es común que se utilice en bacteriología como medio de cultivo.

de 60° C. Toda vez que el agua ha alcanzado la temperatura deseada, se traslada el vaso de precipitado a un agitador magnético con temperatura controlada y se vierten 200 gr de agar (solución al 2%) gradualmente para lograr una mezcla homogénea agua bidestilada-agar. Es conveniente que la solución de agar se deje unos 45 minutos en el agitador electromagnético (siempre controlando la temperatura de 60° C), para que alcance la viscosidad necesaria que evite la penetración de la solución en el medio poroso del suelo y quede cómo una película superficial, cuya función es la de evitar que el suelo se colapse cuando se sumerja en alcohol etílico.

2. ***Selección de la muestra.*** De una muestra cúbica inalterada o del espécimen amasado se extrajo una porción de suelo que presenten superficies frescas. Esto se logra fracturando dicha porción de suelo hasta obtener una superficie de aproximadamente 1 cm², se excluye de la superficie los fragmentos producto de la fractura, con una pequeña brocha de cerdas sintéticas o con una cinta adhesiva se recogen de la superficie los granos (*peeling*) a observar.
3. ***Inclusión de la muestra en la solución de agar.*** El terrón seleccionado se incluye en la solución de agar, hasta su completa impregnación. Luego se extrae cuidando que la cara seleccionada quede hacia arriba y se coloca en una superficie limpia, hasta que se enfríe la solución de agar, quedando una película porosa que evita que el suelo se distorsione o colapse su estructura y además, permite que los fluidos de la matriz arcillosa pasen a través de ella.
4. ***Sustitución del agua de la muestra por alcohol.*** Toda vez que se enfría la solución de agar que cubrió al terrón de suelo, se introduce la muestra de suelo en baño de alcohol etílico, en concentraciones crecientes de alcohol, por ejemplo: 10, 25, 50, 75, 90, 96 y 100 %. Los baños por cada concentración han de durar por lo menos una hora como mínimo. Saturada al 100 % en alcohol etílico la muestra, se deja una noche reposar para alcanzar el equilibrio sistema suelo-alcohol.
5. ***Introducción de la muestra en el aparato de punto crítico.*** Seguidamente, se introduce la muestra en el aparato de punto crítico, induciéndose la expulsión del alcohol para dar lugar a la entrada del dióxido de carbono en la muestra, aplicando una temperatura de 31° C y una presión de 73 bars(74.46 kgf/cm²), como máximo. La aplicación de la presión y temperatura se incrementaron lentamente, para evitar la distorsión de la microestructura del suelo. Al llevar al punto crítico a la fase líquida de

la muestra, ésta tendrá las mismas propiedades que las del vapor y la superficie entre ambas fases desaparece y por ende, la tensión superficial.

6. ***Sombreado de la muestra con oro-paladio.*** Extraída la muestra del aparato de punto crítico se procede a montarla en el portamuestra cilíndrico; colocando una gota de resina en una de las bases del portamuestra para fijar la muestra y posteriormente colocar el portamuestra-muestra en el aparato de sombreado tipo JEOL (serie JFC-1100) o similar. Sombreada la muestra con la película de oro-paladio se retira del aparato. Esta fina capa de oro-paladio tiene la ventaja de que se carguen eléctricamente las partículas que componen la muestra, ya que estas no son conductoras. La capa metálica de oro-paladio hace las funciones de elemento conductor de los electrones emitidos por el microscopio, mejorando la imagen y prolongando los tiempos de observación en el microscopio electrónico de barrido.

Los comentarios que se derivan de la metodología para preparar muestras de suelo para observarlas en el microscopio electrónico de barrido, son los siguientes:

- Si la muestra se introduce en la solución de agar, sin antes dejar que dicha solución se mantenga la temperatura de 60° C durante un periodo mínimo de 40 minutos, se corre el riesgo que la solución no adquiera la suficiente viscosidad y penetre en el medio poroso de la muestra, este hecho imposibilita la observación de la fábrica del suelo.
- El aplicar una presión súbita a la muestra de suelo, cuando ésta se encuentra en el aparato de punto crítico, se induce una distorsión de la micríoestructuras del suelo que se manifiestan en microfisuras. dando como resultado la alteración de la fábrica original que se pretende observar.
- La falta de la aplicación uniforme de la película de oro-paladio sobre la muestra, da una imagen deficiente a la hora de observar en el microscopio, es decir, disminuye el contraste.

4.6. ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN

4.6.1. Normativa que se utilizó

Para la identificación y clasificación de los suelos se acudió a las normas de la asociación Española de normalización y certificación(AENOR) de la parte correspondiente a Geotecnia: ensayos de campo y de laboratorio, así como también, los ensayos geotécnicos. Los ensayos que no están enmarcados en esta normativa, se describirán mas adelante mencionando los aspectos más relevantes del ensayo, como es el caso de los ensayos para determinar la succión inicial, deformabilidad con succión controlada y determinación de las curvas características succión-humedad.

4.6.2. Contenido de humedad

La humedad del suelo, tanto en estado natural como amasado, se determinó de acuerdo con la norma UNE 103300:1993.

4.6.3. Límite líquido, plástico y de retracción

El límite líquido y el plástico se determinó con el criterio propuesto por las normas UNE 103103:1994 y UNE 103104:1993. En la ejecución del límite líquido y plástico se optó por determinar dichos límites de consistencia bajo dos condiciones: primero se secó el suelo a la temperatura ambiente y se aplicó el ensayo a muestra de suelo sin previo secado en la estufa, es decir, los ensayos se realizaron con la humedad natural(más del 96% de suelo pasa el tamiz 200 ASTM) y partir de esa humedad se les aplicaba agua destilada, como es el caso del límite líquido, hasta establecer la curva de fluidez en el aparato de Casagrande; para el caso del límite plástico se amasaban con agua destilada hasta homogenizar el suelo con el agua y se llevaba a su límite. Esta providencia, permito comparar los resultados entre los ensayos con secados a la temperatura ambiente y los ejecutados con la humedad natural, pues se ha observado que el secado previo al ensayo, en este tipo de arcillas volcánicas, se manifiesta en una disminución del límite líquido (Bowles 1980; González de Vallejo; 1979; Terzagui, 1958). Toda vez concluidos los ensayos, se procedía a meter los testigos de suelo a la estufa, cuidando que la temperatura no sobrepasara de los 100° C.

El límite de retracción se efectuó de acuerdo a la norma UNE 103108:1996.

4.6.4. Análisis granulométrico

Primero se determinó la granulometría por el método de tamizado, bajo la guía de la norma UNE 103101:1995, y posteriormente por sedimentación, de acuerdo con la norma 103102: 1995.

4.6.5. Densidad relativa de las partículas

La densidad relativa de las partículas del suelo se determinó de acuerdo a la norma UNE-103302:1994.

4.6.6. Densidad del suelo

La relación de la masa de suelo y su volumen se determinó de acuerdo con la especificación UNE 103301:1994

4.7. ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

4.7.1. Procedimiento de compactación utilizados

Para la determinación de la densidad seca máxima y humedad óptima con el equipo Proctor estándar, se procedió a secar el suelo a la temperatura ambiente, después se disgregaba el suelo con un mazo de goma de caucho (siempre evitando romper las partículas de suelo) y posteriormente, se cribaba por la malla 40 ASTM y luego se hidrataba con un contenido de humedad menor que la humedad óptima y se guardaba el suelo en bolsas de plástico para almacenarlas en el cuarto húmedo, por un periodo de doce días. Cumplido el periodo estipulado, se procedía a realizar el ensayo para determinar la densidad máxima y la óptima en ensayo Proctor normal y se utilizaba la metodología indicada por la norma UNE 103500: 1994. Para la ejecución del ensayo de compactación Proctor modificado se seguía el criterio propuesto por la norma 103501: 1994.

Con la finalidad de tener probetas amasadas estáticamente y formar la curva densidad seca-humedad se recurrió al equipo Harvard miniatura, hidratando las muestras de suelo previamente (humedad por debajo de la óptima) al ensayo y utilizando la metodología propuesta por el libro de Jiménez Salas (1975), en la cual se describe con detalle el equipo utilizado. Cabe destacar, que en la elaboración del ensayo con el equipo Harvard miniatura se

realizó con la energía de compactación del ensayo Proctor normal. La ventaja del equipo Harvard miniatura es que está diseñado para que el compactador se ajuste (ajuste del resorte previamente calibrado) y se juegue con el número de capas de la probeta y el número de apisonadas del compactador, hasta tener una energía de compactación igual al del ensayo Proctor normal o modificado, según se necesite reproducir las condiciones de compactación. En este ensayo se realizaban 5 probetas hasta completar la curva densidad seca-humedad.

4.7.2. Ensayos con la máquina de corte directo y anular

Con el objeto de identificar los parámetros de resistencia del suelo (τ , ϕ) se procedió a realizar el ensayo de corte directo como lo indica la norma UNE 103401: 1998. Los ensayos se realizaron con probetas amasadas estáticamente, con la densidad máxima y la humedad óptima del ensayo Proctor normal. El ensayo de corte se llevaba a cabo bajo dos condiciones de drenaje: no drenado y drenado. Para la primera condición se consolidaba la probeta aplicándole una presión vertical y después se aplicaba alta velocidad de corte (0.48 mm/min) para no permitir el drenaje del agua hacia fuera de la muestra (prueba CU) y la segunda modalidad, consistía en aplicar a la muestra baja velocidad de corte (0.144 mm/min) para permitir en la probeta el flujo de agua hacia fuera de la misma (CD). En la tabla 4.6 se presenta un resumen de las condiciones en las que se efectuaron los ensayos. Para definir la envolvente de falla de cada ensayo, se procedía a formar tres probetas (con las mismas condiciones de densidad seca y humedad) que se les aplicaba 1 kp/cm², 2 kp/cm² y 3 kp/cm², respectivamente. Con el interés de investigar la resistencia después de fallada la probeta, se aprovechaba cada probeta y se volvía a correr la caja superior de corte a su posición original, se dejaba reposar al sistema unos 30 minutos, y después se volvía a realizar otra pasada de la caja superior de corte para registrar dicha resistencia. También se llevó a cabo un ensayo de corte directo rápido (UU) sin inundar. Posteriormente se investigó la **resistencia residual** en el aparato de corte anular, utilizando probetas amasadas con densidades secas y humedades Proctor normal. El procedimiento que se empleó para ejecutar este ensayo fue el mismo que se ha descrito en este apartado.

TABLA 4.6. Condiciones bajo las que se realizaron los ensayos de corte directo y anular

Tipo de ensayo	Condiciones de llenado recipiente	Velocidad de corte	Tipo de rotura	Parámetros obtenidos
UU(corte directo)	Sin inundar	Alta	Rápida	τ_u, ϕ_u
CD(corte directo)	Inundado	Baja	Lenta	τ, ϕ
CU(corte directo)	Inundado	Alta	Rápida	τ_u, ϕ_u
CD(corte anular)	Inundado	Baja	Lenta	τ_R, ϕ_R

4.7.3. Ensayos con el aparato triaxial

Para efectuar los ensayos a compresión triaxial rápidos-no drenados (UU), consolidados-no drenados (CU) y consolidados-drenados (CD), se procedió a llevar a cabo conforme a la norma UNE-103402:1998. Las probetas que se utilizaron fueron premoldeadas con densidad seca y humedad óptima del ensayo de compactación Proctor normal (amasado dinámico). En la obtención de parámetros de resistencia en prueba UU, se prepararon dos tipos de muestras: amasado dinámico y estático, con densidades secas y humedades como las que se indicó anteriormente. Las presiones laterales efectivas aplicadas a las probetas fueron de 49.0, 147.1 y 294.2 kPa.

4.7.4. Permeabilidad

Con el objeto de determinar la velocidad de flujo en probetas amasadas dinámicamente, se prepararon muestras con las condiciones Proctor estándar, elaboradas para los ensayos de compresión triaxial en prueba consolidada y drenada. La muestra se dejó saturar por un periodo de 24 horas. El gradiente hidráulico empleado fue de 20.1.

4.7.5. Ensayos de deformabilidad en el edómetro estándar y célula edométrica

La campaña de ensayos en edómetro consistió en realizar pruebas en probetas inalteradas, amasadas dinámicamente y estáticamente. Por una parte, las muestras amasadas dinámica y estáticamente se confeccionaron con la densidad seca y humedad de las condiciones Proctor normal. También se fabricaron muestras con la densidad seca y humedad natural, compactadas estáticamente y dinámicamente. Se ejecutaron ensayos de deforma-

bilidad en célula edométrica con succión controlada de 6 kp/cm^2 a probetas con amasado estático y dinámico. Para los ensayos estándar de rutina, aplicados al suelo inalterado y amasado bajo las condiciones antes comentadas, se siguió la rutina de trabajo indicada por la norma UNE 103405: 1994. En el caso de los ensayos de deformabilidad en el edómetro con succión controlada (Escario y Sáez, 1973), se seguía el mismo procedimiento por la norma comentada en este párrafo, con la salvedad que se aplicaba la presión de célula de 6 kp/cm^2 poniendo un contrapeso en el marco de consolidación, para mantener el equilibrio en el sistema y se daba un tiempo para permitir la estabilización de la muestra, después se procedía a aplicar cargas en el marco de consolidación equivalentes a las presiones de 9.8, 19.61, 39.22, 78.5, 147.1, 294.2, 588.4 y 980 kPa. Para cada incremento de presión se esperaba el tiempo necesario, hasta que las deformaciones registradas en dial indicador no registrarán deformación alguna, al no registrar deformación alguna se procedía a aplicar otro incremento de presión. En todo momento que duraba el ensayo de deformabilidad, se mantenía constante la presión de la célula edométrica y la temperatura ambiente. En la misma célula se realizaron ensayos de expansión y colapsibilidad. Los equipos están ampliamente descritos en los trabajos de Escario y Sáez (1967, 1974) y Pousada (1984)

4.7.6. Ensayos de succión

Los ensayos para determinar la succión mátrica se realizaron en las células de membrana de presión. En dichos instrumento se determinó la succión inicial y las curvas características succión-humedad en suelo inalterado (estado natural) y en suelo compactado estáticamente. El procedimiento de los ensayos consistía, para el caso de suelo inalterado, en seleccionar cuatro porciones de suelo que se labraban en forma prismática y se colocaban sobre las membranas de los aparatos de células de membranas de presión, con diferentes presiones de succión, de tal suerte que las muestras de suelo cuyas células de presión estaban por debajo de la presión de succión, ganaban agua, y lo contrario para aquellas muestras de suelo cuyas células de presión estaban por arriba de la presión de la succión inicial, pues perdían agua, hasta que cada pastilla de suelo llegaba a la humedad de equilibrio. Este es un método en la que se procede por aproximaciones sucesivas, es decir, se puede probar con otro juego de muestras y diferentes presiones de células, hasta encontrar la succión inicial del suelo. Para conocer la humedad de equilibrio, se procede a sacar la muestra de la célula y se tara en una balanza de alta presión (con aproximación de milésimas) reiteradas veces hasta obtener una humedad constante. El tiempo requerido para

alcanzar la humedad de equilibrio dependerá de la naturaleza del suelo y del espesor de las pastillas de suelo.

4.7.7. Ensayo de hinchamiento libre y presión de hinchamiento

La ejecución de estos ensayos se sujetó de acuerdo a lo indicado en normas UNE 103601:1996 y UNE 103602:1996. Para llevar a efecto estos ensayos, se prepararon cuatro probetas amasadas estáticamente, con la densidad seca y la humedad de las condiciones Proctor estándar, de las cuales dos de las probetas no se hidrataron previamente al ensayo, y las dos restantes se dejaron hidratar con la humedad óptima durante un periodo de 12 días, cumplido el periodo estipulado se procedía a montar las muestras en los anillos de los edómetros con sus respectivas casuelas de consolidación, después se instalaban en las bancadas de los edómetros y se procedía a iniciar el ensayo de acuerdo a las normas.

5. Identificación de la arcilla volcánica

5.1. CONSTITUYENTES MINERALÓGICOS

5.1.1. 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 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 5.1 se muestra el difractograma de polvo correspondiente al suelo analizado, en dicha figura se puede inferir, basándose en las intensidades, que predomina la Halloysita. La alofana presenta dos composiciones: $\text{Al Si O H}_2\text{O}$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Quizás esta doble identificación del componente químico de la alofana se deba a que los cristales no estén definidos por su pobre cristalización (Mitchell, 1993).

5.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

5.2.1. 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 5.2, los elementos que predominan en los minerales son: aluminio, silicio, oxígeno, magnesio, potasio, titanio (en menor medida) y hierro.

En la figura 5.3 se muestra la morfología típica que presentan las partículas constituyentes del suelo en estudio, observadas en el MET.

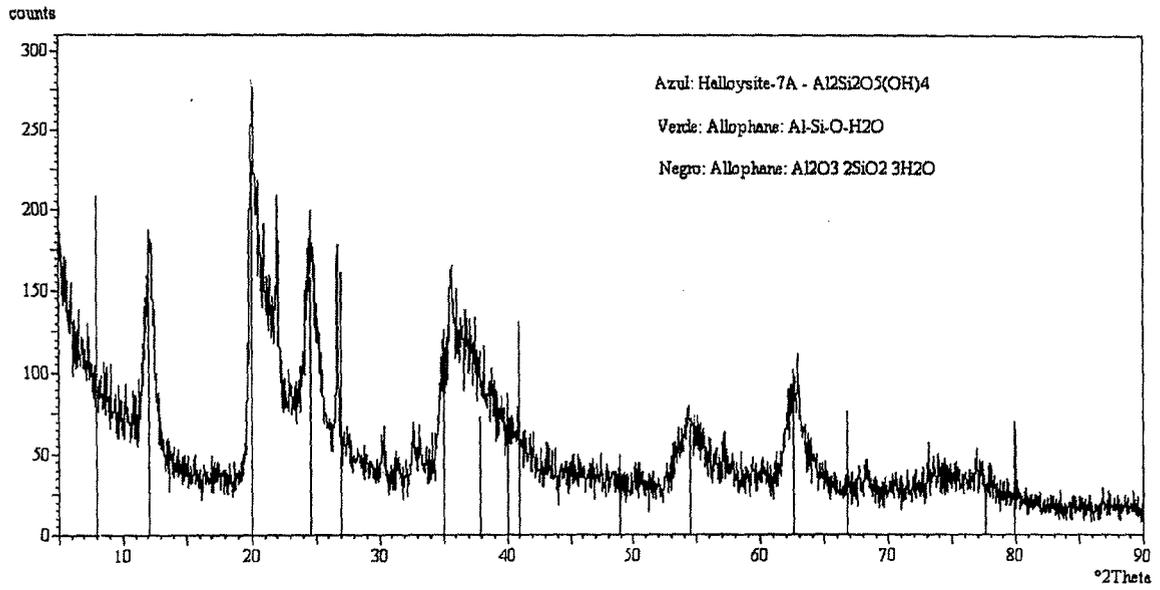


FIGURA 5.1. Difractograma de rayos-X de polvo en fracción arcillosa

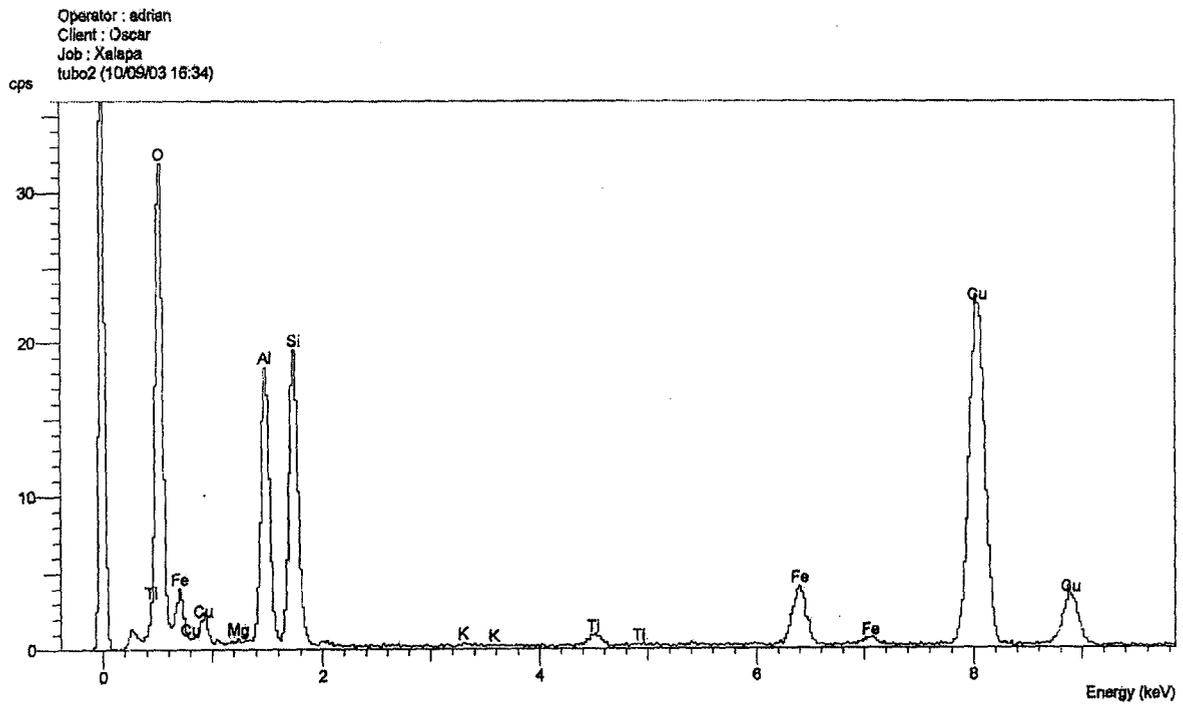


FIGURA 5.2. Espectrómetro que indica la composición química de las partículas.

5.2.2. Intercambio catiónico

La capacidad total de intercambio catiónico (CTIC), determinada por el método de cromatografía iónica, es de 1.84 miliequivalentes por cada 100 gr de muestra seca. Dado que el suelo tiene un bajo contenido de materia orgánica se omiten, para este cálculo del CTIC, los nitritos y nitratos (aniones) y sólo se consideran los sulfatos y el cloro; los cationes considerados son: sodio, potasio y calcio.

Si consideramos los valores de capacidad de intercambio catiónico presentados por Jiménez Salas y De Justo (1975) de minerales de arcilla de halloysita y alofana, este valor está por debajo de los rangos indicados por estos autores. En la figura 5.4 se muestra los cromatogramas de cationes y aniones aplicados a 800 mg de masa de suelo, que sirvieron de base para calcular la CTIC.

La cromatografía detectó los siguientes cationes de cambio que se indican en la tabla 5.1, en la misma tabla se puede apreciar que en los ensayos realizados al suelo por cromatografía iónica (ver figura 5.4a) no se detectaron cationes solubles de magnesio, ni de litio.

TABLA 5.1. Cationes de cambio

Cationes de cambio	Meq/ 100gr
Na ⁺	1.25
K ⁺	0.29
Ca ²⁺	0.71
Mg	-
Litio	-

5.2.3. Contenido de materia orgánica

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 depende del PH del suelo. Además, la

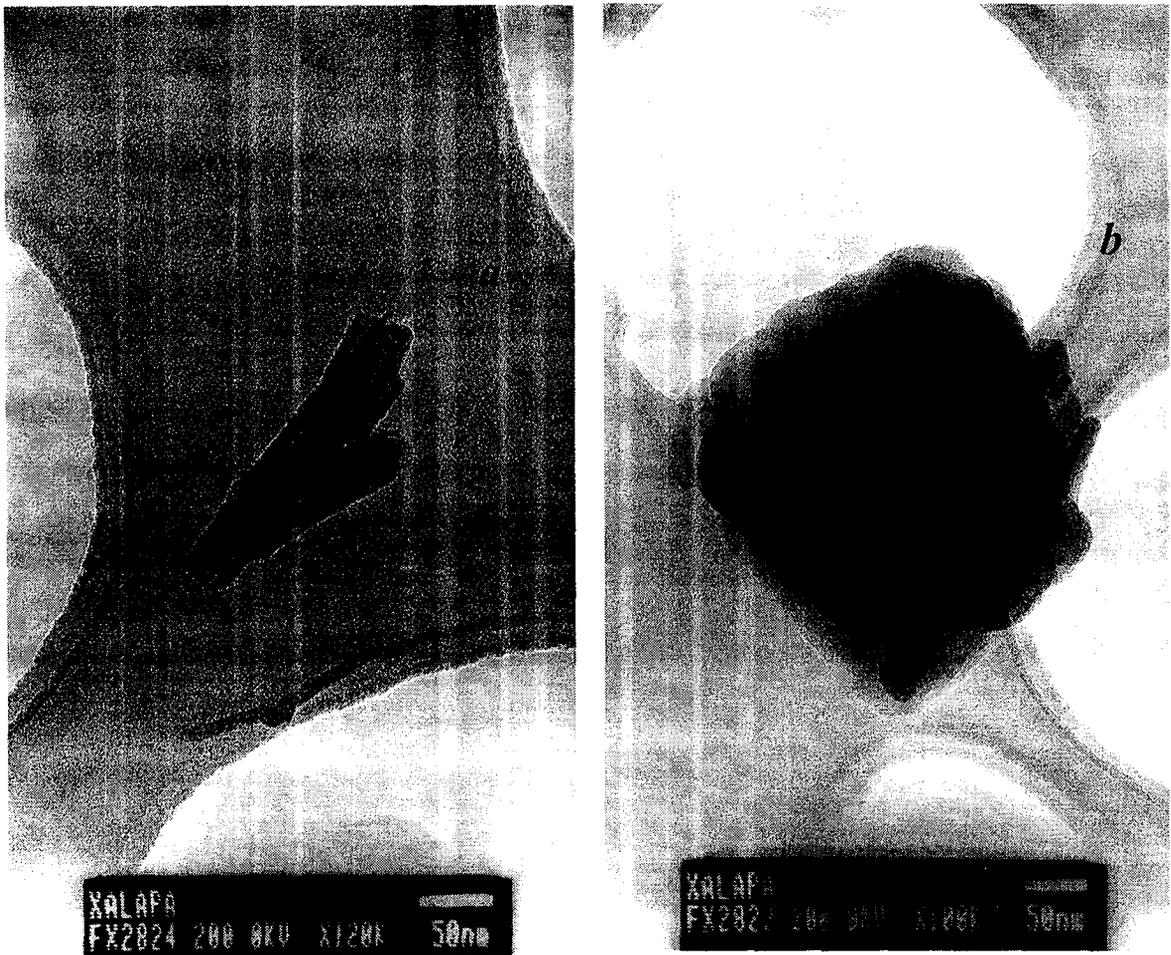


FIGURA 5.3. Partículas de cenizas volcánicas estudiadas en el MET.
 a) Halloysita en forma típica tubular y b) Láminas de alofana

presencia de materia orgánica, influye en los límites líquido y plástico. En la tabla 5.2 se presentan los contenidos de materia orgánica total y húmica, obtenidos en laboratorio con el método modificado de Walkley-Black con valoración potenciométrica.

TABLA 5.2. Contenido de materia orgánica y carbono orgánico total

Modalidad de la materia orgánica	Contenido, %
Materia orgánica total media(M:O)	0.13
Materia orgánica húmica(M.O. total \times 0.77)	0.10
Carbono orgánico total(M.O.total \times 0.444)	0.06

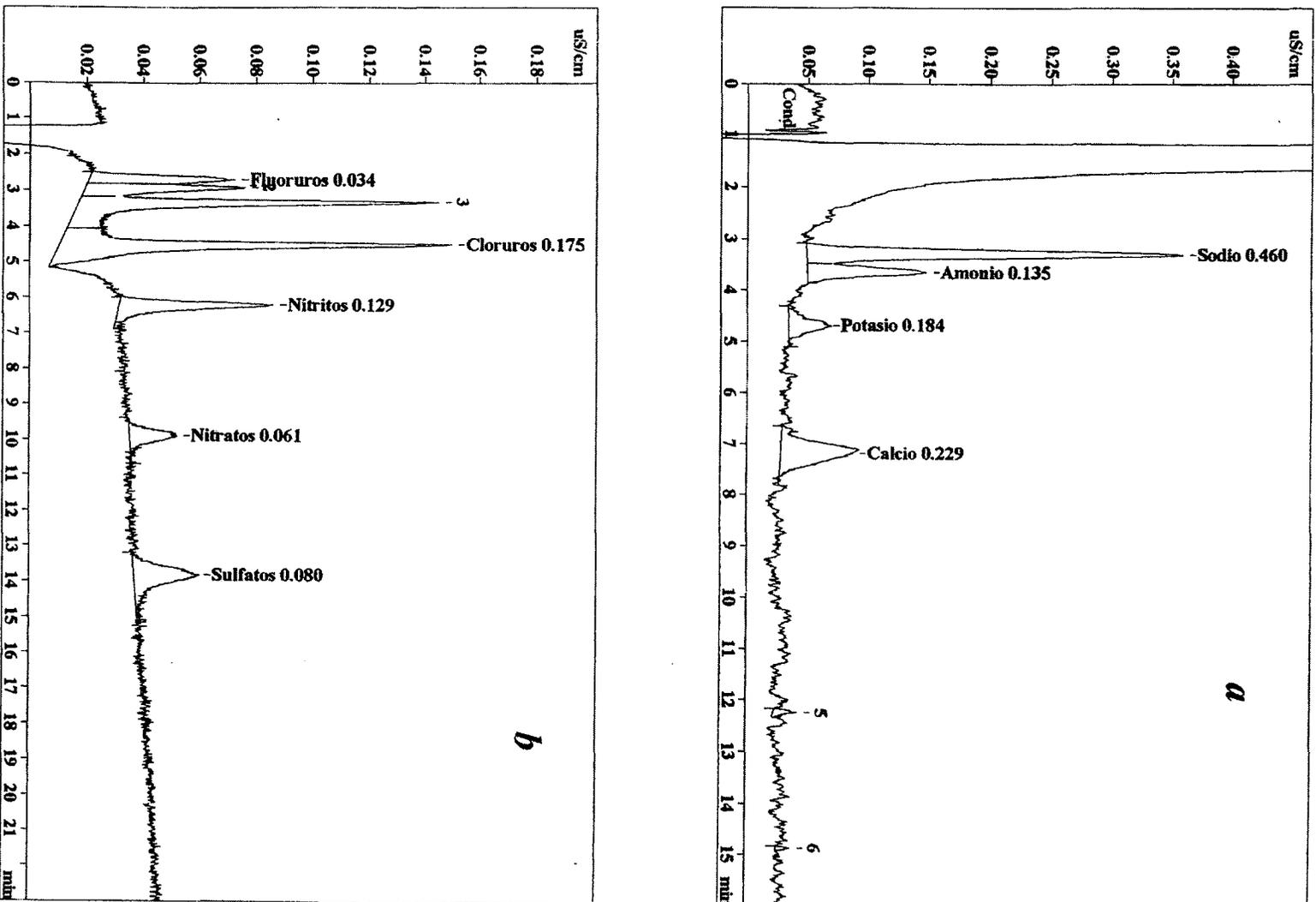


FIGURA 5.4. Cromatogramas a) de cationes solubles y b) aniones solubles

Se maneja aquí, a la materia orgánica no humificada (materia orgánica total media) como a la biomasa vegetal, animal y microbiana; a la materia orgánica húmica, como a las sustancias orgánicas que resultan de la humificación: descomposición orgánica, degradación y síntesis de la materia orgánica no humificada y por último, al carbono orgánico como la medición del carbono (CO_2) en por ciento en el ensayo (Doménech, 1994).

5.2.4. pH en el suelo

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.

5.2.5. Contenidos de carbonato

Se estimó el contenido de carbonatos expresado en carbonatos cálcico ($\text{CO}_3 \text{Ca}$) y carbonatos expresados en anhídrido carbónico (CO_2) en 0.0 % para ambos casos. Lo anterior indica que no hay cementación entre partículas por presencia de carbonatos.

5.2.6. Superficie específica de las partículas de arcilla

La superficie específica determinada por adsorción de N_2 se determinó en un aparato marca Micromeritics (propiedad Consejo Superior de Investigación Científica) y por el método de BET (propuesto por Brunauer, Emmett y Teller en año de 1938). La superficie específica de las partículas de arcilla, estimada con una presión de saturación de 718.38 mm de Hg, se estimó en 92.7 m^2 por cada gramo de muestra seca. Sobre la base de lo anterior, se ha estimado el volumen total en muestra de los microporos, resultando un valor de $0.058 \text{ cm}^3/\text{gr}$. Si consideramos los datos de superficie específica emitidos por Mitchell (1993) de 35 a $70 \text{ m}^2/\text{gr}$, son valores que se encuentran por debajo del valor estimado en

este estudio. Cabe comentar que la estimación de la superficie específica se determinó en tres muestras ensayadas bajo las mismas condiciones, de modo que el valor presentado anteriormente representa el promedio.

5.3. PROPIEDADES ÍNDICE

5.3.1. Granulometría

Los resultados del análisis granulométrico se exponen en el gráfico de la figura 5.5, en donde el eje de las abscisas se indica el diámetro de las partículas, en escala logarítmica, y en 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 que se utilizó 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 agregados y el resultado del análisis granulométrico presentó menor porcentaje de arcilla. Mas sin embargo, los resultados obtenidos, para ambos casos, arrojan fracción arcillosa mayor del 60%, característica ésta que coincide con el tamaño típico de las partículas arcillosas observadas en el microscopio electrónico de transmisión. Por otra parte, las determinaciones llevadas a cabo mediante difracción de rayos-X indican que el suelo en estudio, presenta una gran cantidad de minerales de arcilla, principalmente halloysita y alofana.

Según Mitchell (1993), las partículas de diámetro menor que 0.002 mm (2 μm) son minerales de arcilla.

En la figura 5.3 se muestran microfotografías obtenidas con microscopio electrónico de transmisión (MET) y en ellas puede verificarse los diámetros de las partículas, que por lo general son menores que 2 μm , confirmando que el suelo que analizamos predomina la fracción arcillosa.

Para completar el análisis granulométrico del suelo, objeto de este estudio, se presenta en la tabla 5.3 la composición y distribución de las partículas de las dos muestras analizadas.

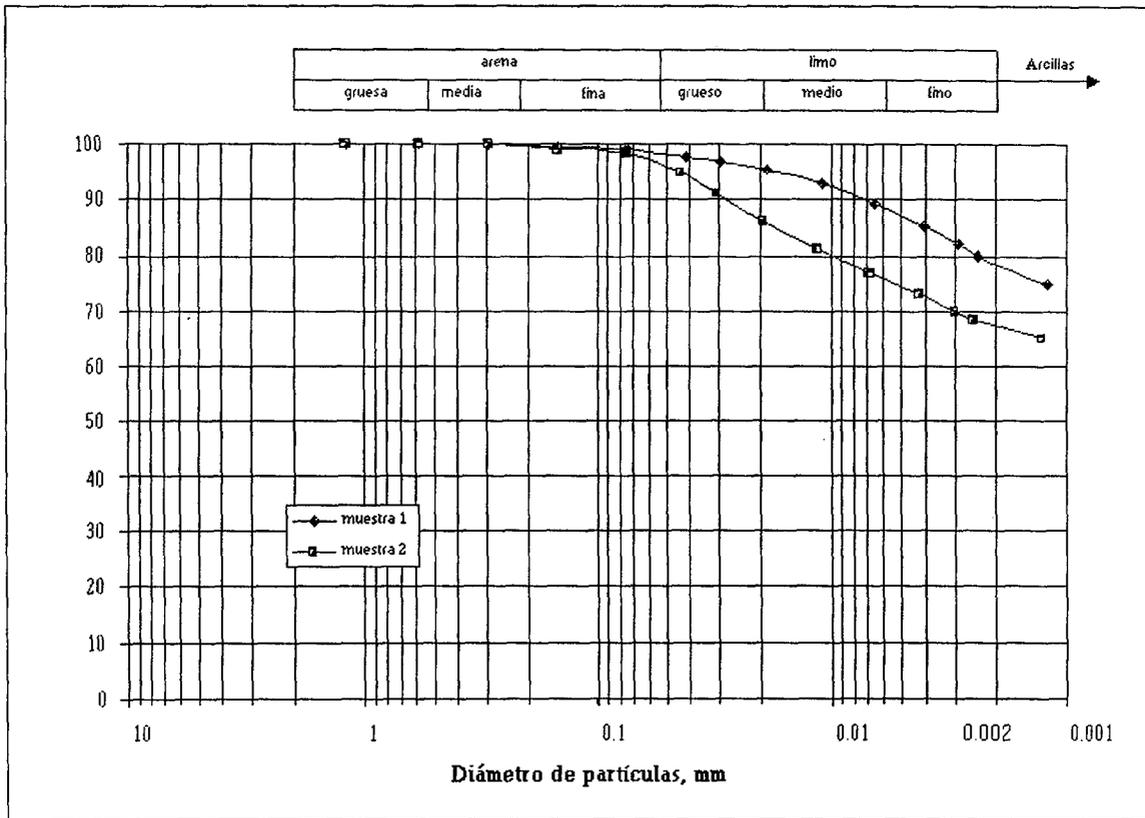


FIGURA 5.5. Curvas granulométricas de dos muestras que se trataron con diferentes energías de dispersión

TABLA 5.3. Análisis granulométrico de las arcillas volcánicas

Suelo	Rangos de diámetros de partículas		% de suelo		Observaciones
	mm	µm	muestra 1	muestra 2	
Arena fina	0.2 a 0.6	200 a 60	1	1	Sin presencia de arena
Limo grueso	0.6 a 0.02	60 a 20	3	13	Diferencia significativa
Limo medio	0.02 a 0.006	20 a 6	7	9	Sin diferencia apreciable
Limo fino	0.006 a 0.002	6 a 2	10	9	Sin diferencia apreciable
Arcilla	< 0.002	< 2	79	68	Notable diferencia en arcilla

Llama la atención las discrepancias que se observan en la figura 5.5, pues las muestras corresponden al mismo suelo. 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 Kenia, 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, para ambos suelos estudiados. Las diferencias entre estas dos condiciones de ensayo en el contenido de partículas arcillosas (<2 µm), que reporta Newill es del 68.1% para el suelo de la presa de Sasumua y para el suelo de Kabete es 20.5%. Lo anterior sugirió a Newill, que el secado en estufa causó el apilamiento de las partículas de arcilla en agregados (clusters) y que el método de dispersión, parcialmente disgregó los agregados de las partículas. También observó el mismo autor, que la presencia de óxido de hierro libre era la causa de la formación de agregados¹.

En un estudio comparativo de las arcillas rojas de África y las margas de Keuper, que realizó Sherwood (1967), encontró también, que el agente cementante en los agregados de las arcillas rojas de África era óxido de hierro y que en la marga de Keuper era probablemente el silicio. Sherwood pudo observar, en el transcurso de su investigación, que los ensayos realizados con las normas British Standard (B.S.) arrojaban menor porcentaje de partículas arcillosas que los reportados en estudios con rayos-X, incluso rompiendo los agregados arcillosos de la marga por medios mecánicos, los porcentajes de contenidos de arcilla obtenidos por el método de las normas B.S. siempre dieron más bajos que los observados por análisis de rayos-X.

Con lo comentado en las líneas de arriba, se quiere poner énfasis en la importancia del método que se utilice para seleccionar 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 de 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 de arcillosa.

¹Agregado es el apilamiento o agrupación de partículas de minerales de arcilla. La misma acepción la da Terzaghi.

5.3.2. Límites de consistencia y humedad natural

Para la determinación del límite líquido y plástico se optaron por dos procedimientos: el primero consistió en secar la muestra en estufa a 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 influyo en los valores del límite líquido y plástico, el secado previo al ensayo. En la figura 5.6 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: que la halosita 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 halosita, 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 suelo, 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".

Otro factor que influye a los resultados en la determinación del límite líquido y plástico es el tiempo de mezclado suelo-agua (González de Vallejo, 1979), a medida que se incrementa el tiempo de mezclado, crecen los límites líquido y plástico. En el trabajo de González de vallejo, que estudia suelos de la misma formación geológica que los de la Cuenca de Xalapa, llama la atención la fuerte tendencia de los puntos hacia la línea "A", dentro de la carta de plasticidad, pero también existe una marcada concentración de los puntos hacia la recta vertical que pasa por el límite líquido del 50%. En el caso específico de los suelos volcánicos de la Cuenca de Xalapa, pasa lo mismo en cuanto a la proximidad de la recta "A", pero los puntos que representan los ensayos determinados con el contenido de humedad natural se alejan de la recta vertical que pasa por el límite líquido del 50%, en el caso de los puntos que representan los ensayos con previo secado del suelo, se aproximan hacia dicha recta vertical, pero pasan a estar por debajo de la línea "A" (ver figura 5.6); dicho de otra forma: los suelos ensayados con el contenido natural de agua se clasifi-

can, en el gráfico de Casagrande, como arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH), pero en el caso de los suelos que se ensayaron con previo secado, pasan a ser limos o arcillas orgánicas de alta plasticidad y/o limos inorgánicos de alta plasticidad.

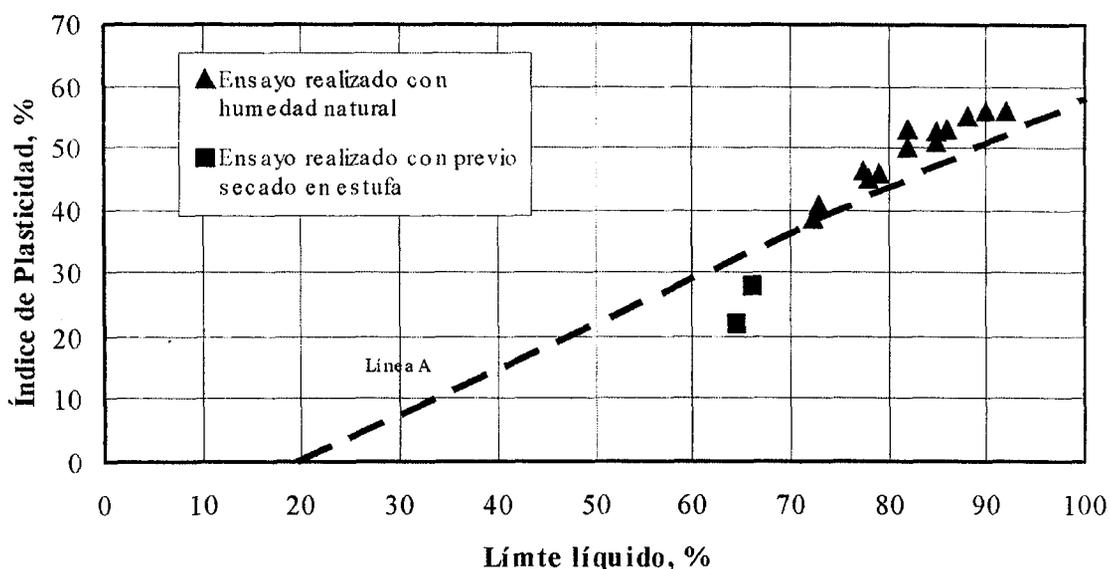


FIGURA 5.6. Característica de plasticidad de la arcilla volcánica

En la tabla 5.4 se muestran las diferencias obtenidas en los ensayos para determinar los límites líquido y plástico.

TABLA 5.4. Comparación de resultados en límites de consistencia, según condición de ensayo

Condición del ensayo	Valor máximo y mínimo		Clasificación Sucs	Observaciones
	Límite Líquido %	Índice Plástico %		
Realizado con humedad natural	93-73	56-36	CH	El secado previo en la muestra, influye en los límites de consistencia de estos suelos halosícticos
Realizado con previo secado en estufa	67-65	28-23	MH-OH	

Límite de retracción. Se ha establecido que en el límite del contenido de humedad en que el suelo deja de cambiar de volumen o retraerse, a pesar de su disminución del contenido de humedad, ése límite es el de retracción. Al irse secando el suelo disminuye el volumen por las fuerzas capilares que van aumentando conforme disminuyen el volumen de los huecos de la red porosa del suelo, llegando a equilibrarse con los contactos interpartículas, hasta que el volumen del suelo se hace constante, a pesar de la disminución del contenido de agua.

Como es sabido, el límite de retracción depende, principalmente, del tamaño de los poros del suelo, del tamaño de las partículas y por ende a la superficie específica de las mismas.

Con la finalidad de observar la variación volumétrica del suelo por pérdida de agua se graficaron las observaciones de laboratorio (del mismo ensayo para determinar el límite de retracción) en la figura 5.7, en la misma figura se puede apreciar que en el punto de mayor curvatura de la curva, variación volumétrica (relación de huecos “e”) contra pérdida de humedad, se encuentra el punto, precisamente, en que el suelo deja de disminuir su volumen, ése punto representa el límite de retracción. El límite de retracción que presenta la

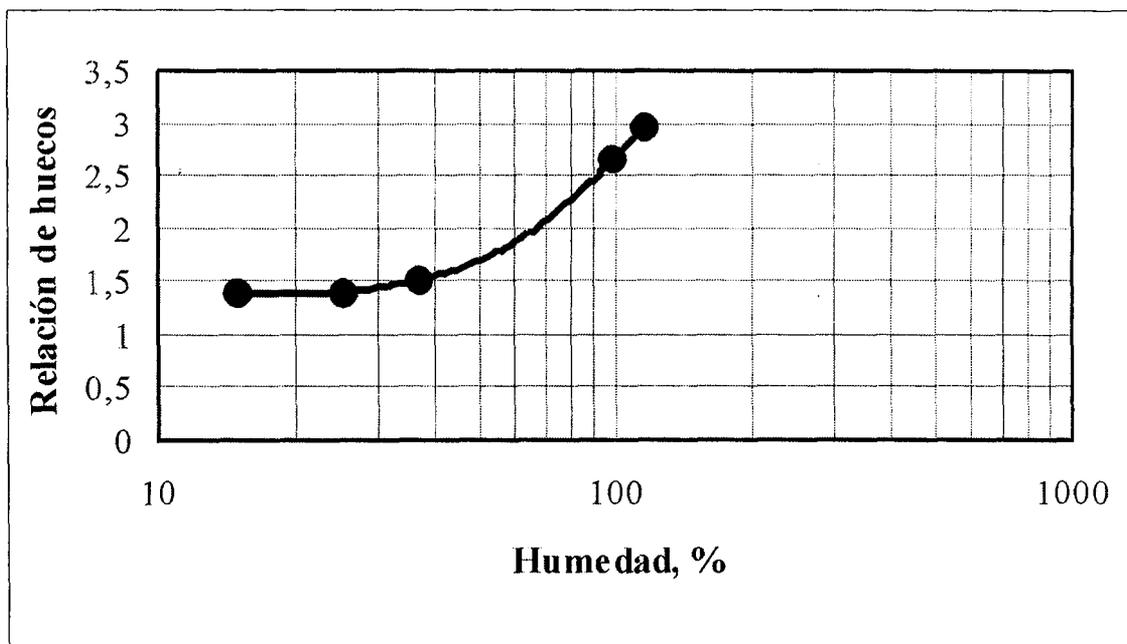


FIGURA 5.7. Límite de retracción y variación volumétrica del suelo ante pérdida de agua

figura 5.7 equivale al 25.14 %. En otro ensayo, en que no se observó la variación volumétrica del suelo por pérdida de agua, se registró un valor del límite de retracción de 18.52 %.

Contenido de humedad. Los contenidos de humedad registrados en este trabajo y los reportados por los estudios revisados se compilan en la tabla 5.5, y considerando los límites de consistencia y los contenidos de humedad se incluye, en la misma tabla, los índices de fluidez.

TABLA 5.5. Contenidos de humedad e índices de fluidez

Fuente	Contenido de humedad %		Índice de fluidez		Observaciones
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	
Valores obtenidos en este trabajo	50	44	0.34	0.14	Para ambas fuentes, los valores del I_L corresponden a una arcilla de consistencia dura
Datos aportados por otros estudios	54	38	0.24	0.11	

Sabemos que la halloysita pierde su agua inter-lámina a una temperatura de 60° C, y también sabemos que a una temperatura de 105 a 110° C se pierde el agua libre en los poros del suelo, pero la capa adsorbida de agua en las partículas no la pierde y requiere aplicar mayor temperatura para eliminarla. Para investigar cual es el porcentaje de agua adsorbida en las partículas, se sometió al suelo a temperaturas de 800° C, partiendo del hecho que a esa temperatura las partículas no se calcinan y sólo tiene pérdida del agua adsorbida y cambios en su estructura por influencia de alta temperatura y por tanto, no hay pérdida de peso por calcinación, se procedió a determinar dicho porcentaje de agua adsorbida. Se seleccionó una muestra de suelo que se dejó secar en el medio ambiente y después se introdujo a la estufa a una temperatura de 110° C durante un periodo de 16 horas y después se efectuaron pesadas a las dos horas y cuatro horas, hasta obtener una masa constante del suelo. En la figura 5.8 se indica el procedimiento anterior. El contenido de humedad por capa adsorbida estimado fue del 13.84 %. Éste valor obtenido se antoja razonable, por la superficie específica tan elevada que tienen los minerales de arcilla.

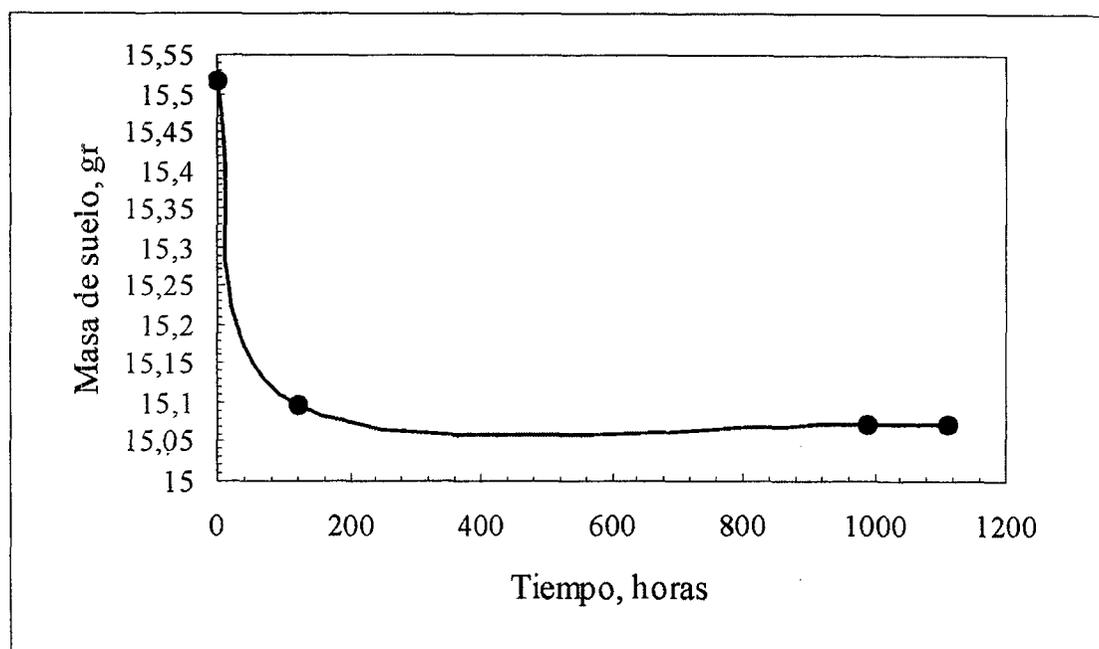


FIGURA 5.8. Pérdida de agua adsorbida de las partículas

5.3.3. Actividad coloidal

En virtud de que el suelo en estudio está compuesto, principalmente, por arcillas (ver figura 5.5), se llevó a efecto 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 las 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 del mismo (ver figura 5.6). En la tabla 5.6 se vierten los resultados obtenidos y a manera de comparación, se incluyen casos de arcillas analizadas por Skempton, en la que sus constituyentes mineralógicos prevalecen el kaolín y la halosita.

5.3.4. Densidad real y peso específico

Se llevaron a cabo en laboratorio dos determinaciones de la densidad natural del suelo, con la finalidad de tener pares de comparación. Por otro parte, también se determinó el peso específico de las partículas de suelo con el método del picnómetro. En la tabla 5.7 se indican los parámetros determinados y datos aportados por los estudios revisados.

TABLA 5.6. Actividad de las arcillas en estudio, considerando dos condiciones en la determinación de los límites de consistencia

Condición del ensayo (LL y LP)	Lugar de origen	Origen geológico	Actividad	Mineral predominante	Observaciones
Realizado con la humedad natural	Xalapa, México	Volcánico, cuaternario	0.58	Halloysita y alofana	Arcillas inactivas
Realizado con previo secado	Xalapa, México	Volcánico, cuaternario	0.48	Halloysita y alofana	Arcillas inactivas
No se especifica	Weald, England*	Lacustre, cretácico	0.63	Kaolinita, ilita	Arcilla inactiva
No se especifica	Gosport, England*	Marino, post-glacial	0.88	Ilita, halloysita	Arcillas normales

Información extraída del artículo: "The colloidal activity of clay".

5.4. CLASIFICACIÓN

A partir de lo establecido en este capítulo se puede clasificar las cenizas volcánicas de la cuenca de Xalapa. Por una parte, se ha investigado en ensayos granulométricos el porcentaje de arcilla que contiene el suelo y por otro lado, se tiene identificado las propiedades de plasticidad, según en la condición que se haya realizado el ensayo para determinar los límites líquido y plástico. Queda aquí la cuestión: según el gráfico de plasticidad de Casagrande que se muestra en la figura 5.6, si clasificamos al suelo con los puntos que están por arriba de la línea "A" o los que están por debajo de la misma. Se sabe, por las observaciones del Difractograma de rayos-X que el suelo está compuesto por minerales de Halloysita hidratada y que dicho mineral de arcilla, al perder su lámina de agua entre sus capas octaédrica y tetraédrica a una temperatura de 60° C (ensayo con previo secado en estufa del suelo) cambia su espacio basal de 10 Å a 7 Å y ése hecho influye en los resultados en la obtención del límite líquido y plástico. El que suscribe, considera que es la razón de mayor peso que influye en los resultados para identificar la plasticidad de las cenizas volcánicas que se estudian.

Para la clasificación del suelo se consideró las propiedades granulométricas que presentó el suelo que se trató con mayor energía de dispersión (ver tabla 5.3 y figura 5.5), las características de plasticidad que presentó el suelo en ensayos realizados con humedad natural (puntos localizados por arriba de la línea "A" en el gráfico de Casagrande) y de

TABLA 5.7. Densidad natural y peso específico de las partículas

Fuente	Densidad natural* gr/cm ³		Peso específico de las partículas	
	máximo	mínimo	máximo	mínimo
Parámetros obtenidos en este estudio	1.74	1.64	2.64	2.58
Parámetros presentados por otros estudios	1.84	1.76	2.61	2.53

* Considera al volumen de todas las partículas y poros.

acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS). De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 5.3, en la que predominó la fracción arcillosa (79 %) con respecto a la limosa (20 %), a las características de plasticidad mostradas en la figura 5.6 (puntos localizados arriba de la línea “A”), a la carencia de materia orgánica (ver tabla 5.2) y a las características descritas en la tabla 4.4, la ceniza volcánica se clasifica de acuerdo al SUCS como arcilla limosa de color café rojizo de alta plasticidad “CH”.

6. Microfábrica

6.1. ANTECEDENTES

6.1.1. Factores que determinan la fábrica de un sedimento arcilloso

Son dos los factores que determinan la fábrica de un suelo: factores sedimentarios (primarios) y los postsedimentarios. Los primeros, son aquellos factores que intervienen en el proceso de decantación y acomodo de las partículas: como tipo de mineral y sus propiedades físico-químicas, tamaño y forma de las partículas; interacciones físico-químicas en el medio: salinidad, presencia de materia orgánica (enlaces entre partículas) y pH (acidez y alcalinidad del medio) y por último, influencia de esfuerzos en el proceso de sedimentación: condiciones de deposición isótropa, dará una fábrica isótropa con partículas orientadas al azar y las condiciones de deposición anisótropa, dará una fábrica anisótropa con orientación preferente de las partículas (Yong y Sheeran, 1973; Yong y Warkentin, 1975).

Básicamente, los factores primarios quedaron enumerados en el capítulo 2, en donde se estableció que la salinidad del medio influye en la orientación de las partículas, que la presencia de materia orgánica determina las conexiones entre las partículas y el pH del medio condiciona el espesor de la doble capa eléctrica difusa de las partículas.

Los factores postsedimentarios comprenden: la consolidación de los sedimentos: el efecto de enterramiento implica el incremento de las presiones verticales ocasionado por la deposición de los materiales suprayacentes y el sedimento enterrado inicia su proceso de consolidación, modificándose el índice de huecos inicial y por ende la porosidad se reduce y por otra parte, la densidad aumenta. Las partículas se reorientan para formar una nueva fábrica orientada, en donde las partículas dada su morfología laminar-alargada tienden a colocarse perpendicular a la dirección de las presiones verticales; también la meteorización in situ modifica la fábrica del sedimento enterrado, mediante un proceso de descomposición y rompimientos de los minerales, debido a agentes externos, como la presencia del agua, presiones externas y cambios de temperatura. La meteorización química ocurre con

la presencia del agua de lluvias que se filtran a través de la red porosa del suelo y a la acción de sustancias disueltas en dicha agua, se inicia el proceso de lixiviación y con ello el proceso de transformación química del medio, destruyendo los enlaces entre las partículas de arcilla o bien, creando otros nuevos enlaces. La meteorización física implica la rotura mecánica de los sedimentos debida a los cambios bruscos de temperatura que ocasionan la dilatación o contracción de los materiales, ciclos de hidratación y desecación y el crecimiento de cristales; la meteorización biológica que implica la descomposición de los sedimentos por agentes orgánica y por último, las deformaciones mecánicas producidas por los movimientos tectónicos y por expansiones. Todos estos procesos obedecen a leyes de cambio por unidad de tiempo, es decir, el factor tiempo juega un papel muy importante en los procesos antes comentados.

Basándose en lo anterior, se ha formulado la figura 6.1, que presenta de una manera sucinta los factores que determinan la fábrica de un suelo arcilloso.

6.1.2. Niveles de fábrica y tipos de poros

El comportamiento de los suelos arcillosos es a través de las interacciones de las unidades básicas¹ y a través de varios mecanismos de unión entre las unidades básicas.

Las unidades básicas las constituye un "aglomerado" de partículas, que a su vez tienen interacciones mutuas (Yong y Sheeran, 1973; Yong y Warkentin, 1974; Yong *et al*, 1975; Collins, 1985). En función de lo antes expuesto y la necesidad de distinguir un cierto nivel de sofisticación de asociaciones entre las unidades básicas, Yong y Sheeran (1973) proponen tres niveles² de fábrica (tamaños observables) para describir la fábrica de los suelos arcillosos:

- a) *Nivel macroscópico*. La unidad básica, como ped o los grupos de peds, se puede observar a simple vista sin ayuda de alguna lente o similar. El ped equivale a las unidades básicas, es decir, a un aglomerado de partículas. Aquí la unidad pequeña distinguible es el ped.

¹Yong y Sheeran (1973) han acuñado la palabra unidades de fábrica (fabric units), que en este texto se traduce a "unidad básica". La unidad básica aglomera a las partículas.

²Collins (1985) también propone tres niveles de fábrica, a saber: nivel elemental, ensamblaje y compuesto. En este texto se maneja los niveles de fábrica propuestos por Yong y Sheeran (1973) por su rigor.

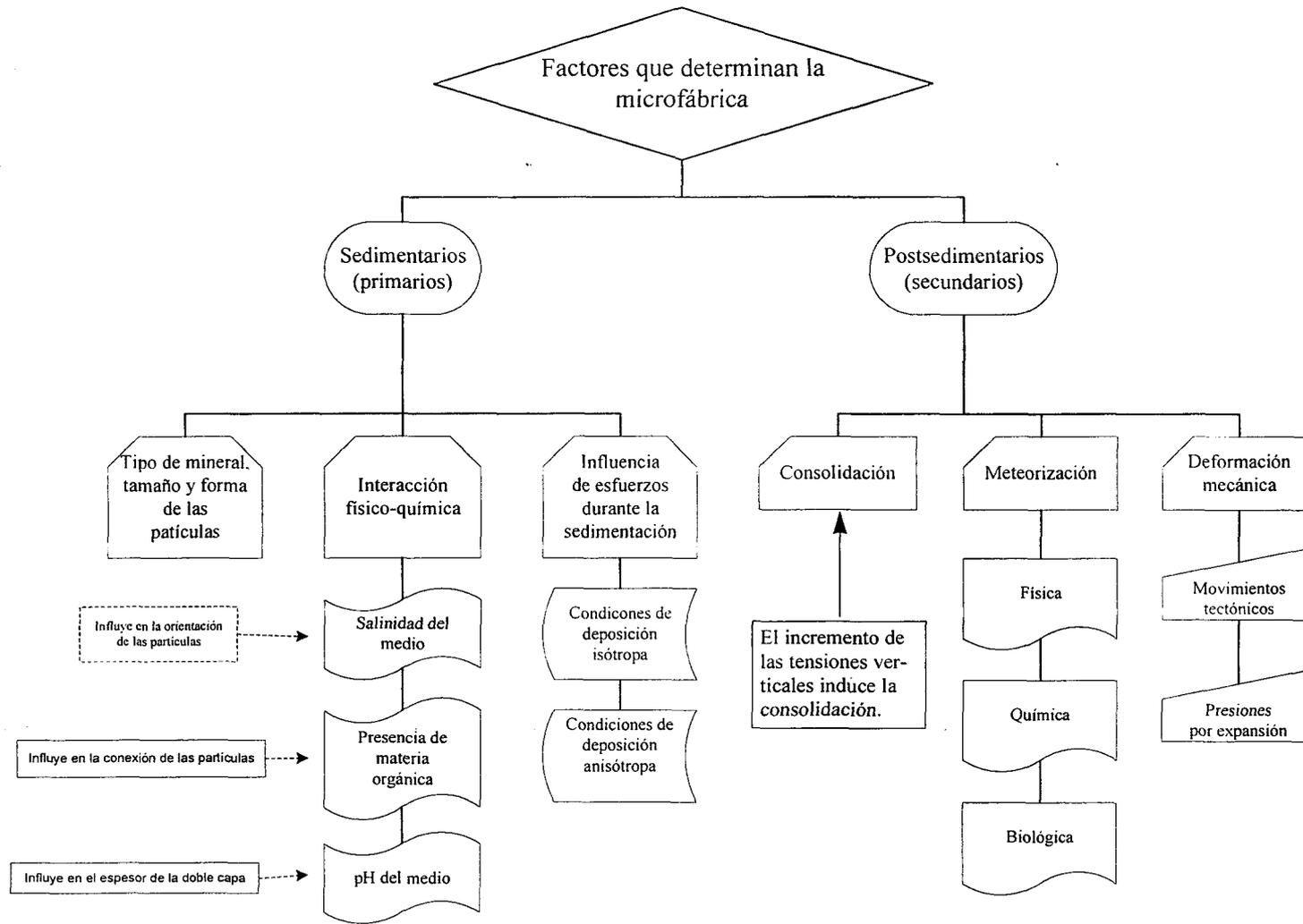


FIGURA 6.1. Factores que determinan la microfábrica de un suelo arcilloso.

- b) *Nivel microscópico*. Para observar las unidades básicas se requiere del microscopio de luz polarizada. Las unidades básicas son agregados (clusters) o grupos de agregados dentro de los ped. Aquí la unidad pequeña visible con el microscopio de luz polarizada es el agregado.
- c) *Nivel submicroscópico*. Para observar las unidades básicas se requiere del microscopio electrónico de barrido o de transmisión. La unidad básica son los dominios³ o grupos de partículas dentro de los ped. Aquí la unidad pequeña observable con el microscopio electrónico de barrido o de transmisión es la partícula individual.

Basándose en los niveles de fábrica y en las interacciones observadas entre los ped, Yong y Sheeran (1973) proponen dos tipos de “espacios de poros” o tamaño de poros:

- 1) Macroporos. Son los que están entre las unidades básicas o ped.
- 2) Microporos. Son los que se están dentro de la unidad básica o ped.

Lo Anterior se ilustra en la figura 6.2, en donde se hace la distinción entre los microporos y macroporos.

El tamaño de poros o vacíos de poros, permite apreciar el grado de empaquetamiento que presentan las unidades básicas como los ped. También permite reconocerlas áreas de contacto que existen entre los ped y según Yong y Sheeran (1973), estos contactos son una función de la historia de tensiones que el sistema ha recibido. Si al sistema (conjunto de ped y microporos-macroporos con agua) le inducimos una tensión, producirá el movimiento total entre las interfaces ped-ped, así como la deformación de los ped individuales, de tal manera que el flujo de agua que se establece en los microporos y macroporos "no es igual". Lo anterior plantea un problema en las "relaciones de difusión" utilizadas en el modelo teórico de consolidación (Yong y Sheeran, 1973; Yong y Warkentin, 1974). Por otro lado, la permeabilidad estimada en el suelo, refleja dos componentes: una representada por el flujo que se presenta en los microporos y la otra, por el flujo en los macroporos. Dos flujos separados que representan la permeabilidad total del sistema. La reorganización entre los ped, ocasionada por la aplicación de la tensión, reducirá el volumen de los macroporos y por otro lado, las partículas dentro de los ped se reorientarán y acomodarán produciendo la disminución del volumen de los microporos. El cambio total de volu-

³Los dominios los constituyen dos o más partículas y en general se presentan ordenados en paralelo, varios dominios se combinan para formar agregados (Yong y Warkentin, 1975).

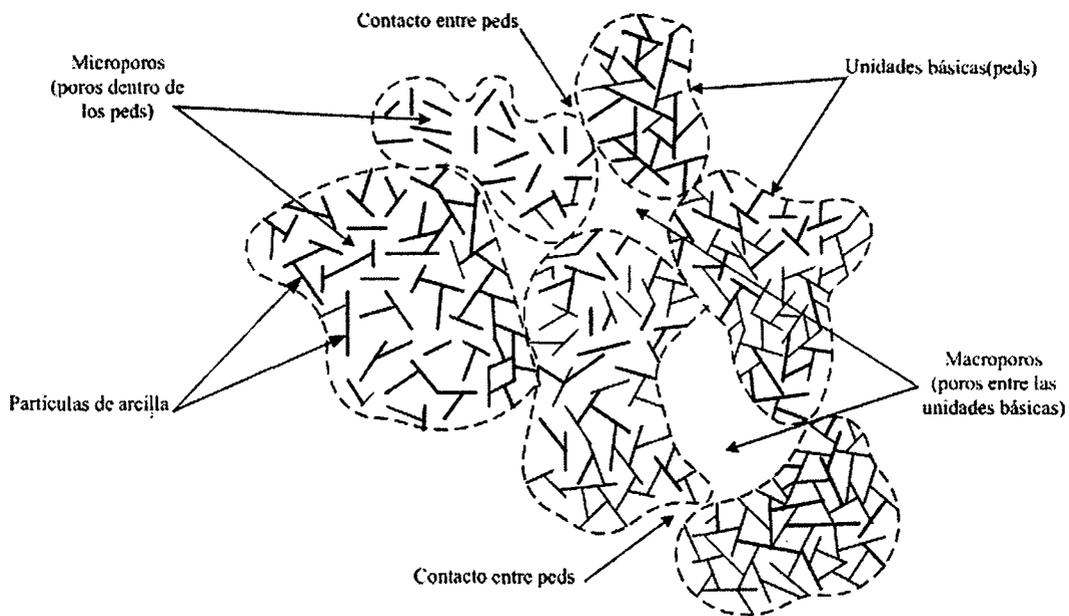


FIGURA 6.2. *Tamaños de poros y contactos entre unidades básicas (Yong y Warkentin, 1973).*

men del suelo viene a presentarse cuando termina la expulsión del agua en los microporos. Este flujo presente en los microporos, inicia en la etapa de consolidación primaria y aumenta, ante tensión constante, hasta la etapa de consolidación secundaria. A intervalos pequeños de tiempo, es relativamente más rápido el flujo en los macroporos, lo cual indica que la mayor cantidad de flujo en los macroporos se presenta en la etapa de consolidación primaria (Yong y Sheeran, 1973).

Las reflexiones anteriores, justifican la afirmación de que la fábrica es una propiedad importante del suelo y como ésta, influye en el comportamiento geotécnico del mismo. Mas adelante (capítulo 7), podrá apreciarse como influye la fábrica del suelo tanto en la deformabilidad como en la resistencia.

6.1.3. Caracterización de la fábrica

De acuerdo a los niveles de fábrica antes mencionados y los factores que determinan la fábrica del suelo, puede caracterizarse el suelo en los siguientes arreglos de sus peds (Yong y Warkentin, 1975; Yong y Sheeran, 1973):

1. Fábrica isótropa general. Arreglo al azar o disperso de las partículas que conforman las unidades básicas y disposición al azar de los pedos. Bajo este arreglo el sistema es isótropo.
2. Unidad básica isótropa. Arreglo orientado de partículas dentro de los pedos y disposición de los pedos al azar. Bajo estas condiciones el sistema es isótropo.
3. Unidad básica anisótropa. Arreglo al azar de las partículas en los pedos y disposición orientada de los pedos. Bajo estas condiciones el sistema es anisótropo.
4. Fábrica total anisótropa. Arreglo orientado de las partículas en los pedos y disposición orientada de los pedos. Bajo estas condiciones el sistema es anisótropo.

6.1.4. Manifestación de la estructura

Con lo expuesto en los apartados precedentes, puede establecerse la manifestación de la microestructura del suelo, la cual está relacionada con la fábrica y las fuerzas interpartícula (ver el capítulo 2). La manifestación de la estructura considera la roca u organismo de origen, el proceso de formación (factores sedimentarios y postsedimentarios) y la historia previa de cargas, que implica la reorientación de las partículas y disminución de volumen del sedimento, dando como resultado la fábrica final del sedimento. La manifestación de la microestructura o también nombrada, por brevedad, estructura del suelo, está en función de los factores antes mencionados. En la figura 6.3 se esquematiza la manifestación de la estructura y se maneja el término de empaquetamiento aplicado a suelos granulares o gruesos, tal como lo emplea Mitchell (1993) y Yong y Warkentin (1975).

En los suelos finos, su estructura se manifiesta en su consistencia y grado de preconsolidación, en los gruesos o granulares en su compacidad relativa o acomodo de sus granos.

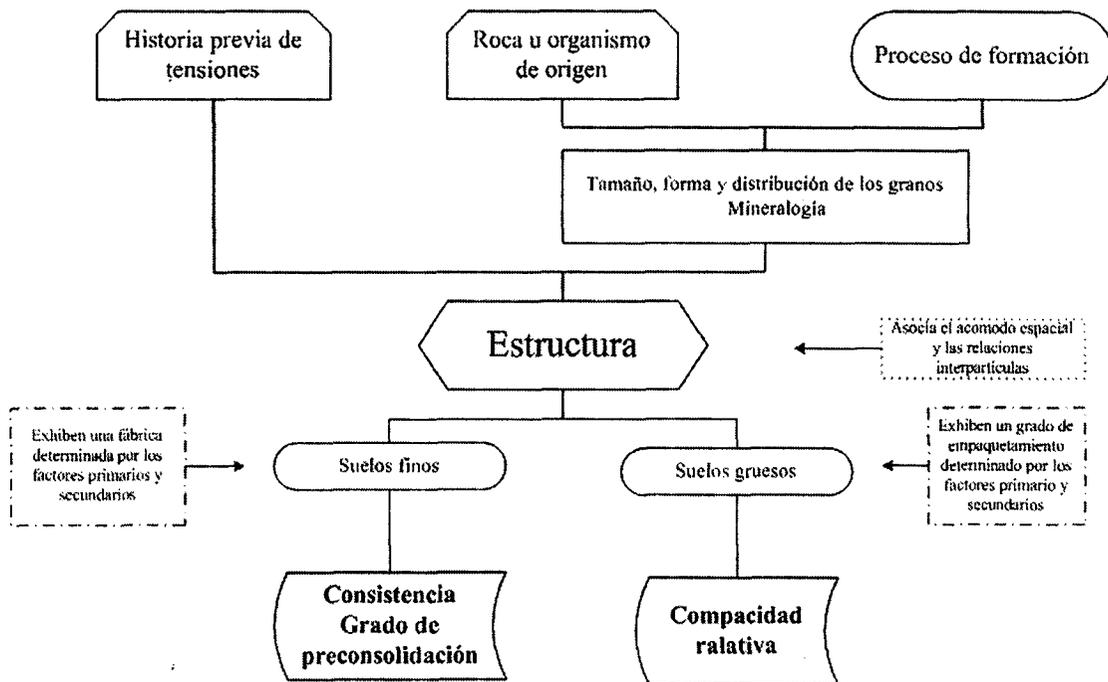


FIGURA 6.3. Manifestación de la estructura en los suelos

6.1.5. Factores que gobiernan la resistencia y deformabilidad de los suelos

La roca u organismo de origen, que es la materia prima para que los suelos se formen, el proceso de formación y la historia previa de tensiones que el sedimento ha recibido in situ, en el transcurso del tiempo, son los factores que influyen en la resistencia y deformabilidad de los suelos. La forma, tamaño y distribución de las partículas, interacciones físico-químicas interpartículas, influencia de esfuerzos durante la sedimentación (condiciones de deposición isótropa o anisótropa), consolidación del sedimento, meteorización e influencia en el sedimento por deformaciones mecánicas (influencia de movimientos tectónicos y expansiones adyacentes), son factores que interviene en la estructura final del suelo, característica ésta que incide directamente en la respuesta del suelo cuando se le somete a tensiones, dependiendo de las condiciones de flujo, si éste se encuentra bajo condiciones drenadas o no drenadas. En la figura 6.4 se ilustra lo comentado en este apartado.

Los factores antes enumerados y las características de la estructura del suelo gobiernan las relaciones tensión-deformación, los cambios volumétricos y por tanto, la variación de las presiones de poro. Dependiendo de la consistencia (si éste es un suelo fino) o compacidad relativa (si éste es un suelo grueso) del suelo, éste tendrá una respuesta bajo aplicación de tensiones: contráctil o dilatante. Si el suelo es fino, podemos saber el estado que

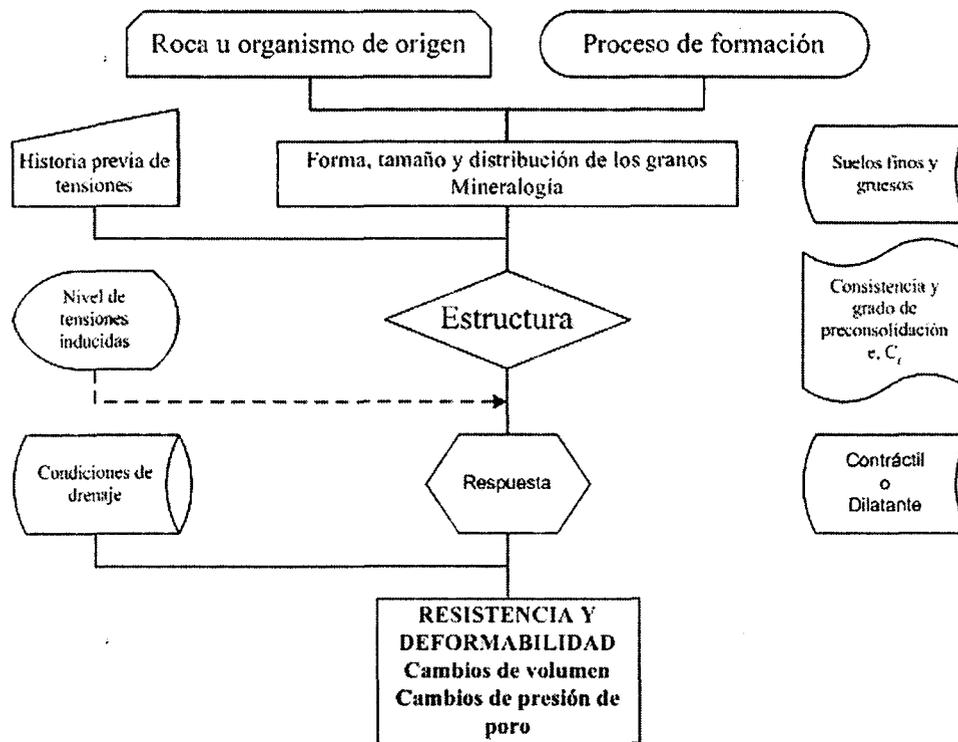


FIGURA 6.4. Factores que gobiernan la resistencia y deformabilidad de los suelos

guarda su estructura a través de su consistencia y grado de preconsolidación y si se trata de un suelo granular, puede identificarse por su compacidad y su relación de vacíos natural, parámetros cualitativos que ayudan a formar una idea sobre el grado de acomodo de los granos.

Cabe aclarar, que las figuras 6.3 y 6.4 son la síntesis de las reflexiones del profesor Arthur Casagrande (Casagrande, 1932, 1972 y notas de clases⁴) presentadas por su discípulo Franklin Rendón (último discípulo de Casagrande), en el Aula Magna de la Facultad de Ingeniería del Puerto de Veracruz, en el año de 1976 y adecuadas, para los fines de este trabajo, por el que suscribe.

6.2. MORFOLOGÍA DE LAS PARTÍCULAS

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 identificó la composición química de las mencionadas partículas.

⁴Las notas de clases impartidas por Casagrande en la Universidad de Harvard, están traducidas al castellano por Eulalio Juárez Badillo en el libro de "Mecánica de suelos", editado por Editorial Limusa, México.

TABLA 6.1. Componentes químicos de los minerales constituyentes de la arcilla volcánica

Mineral	Elemento	Presencia, %	Comentarios
Halloysita	Al	21.22	Los iones predominantes en ambos minerales son: Al, Si y O. Los porcentajes correspondientes a cada elemento se obtuvieron con espectroscopía de dispersión de rayos-X en microscopio de transmisión
	Si	21.64	
	Ti	0.71	
	Fe	8.70	
	O	47.73	
	Sumatoria	100	
Alofana	Al	21.1	
	Si	24.6	
	Ti	0.45	
	Fe	4.61	
	O	49.16	
	Sumatoria	100	

En la figura 5.2 se presentó un espectrómetro que identifica los componentes químicos de las partículas de halloysita. También en la figura 5.1 se mostró un difractograma de rayos-X de polvo (muestra total) que identifica los mismos componentes químicos de la halloysita: silicio y aluminio principalmente, pero también se indica los componentes de la alofana. En una segunda campaña de observaciones en el MET (noviembre del 2003) se analizaron por separado las partículas de halloysita y alofana, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.1, en la misma tabla puede apreciarse que los componentes químicos son los mismos que los identificados en las figuras 5.1 y 5.2 (primera campaña). La segunda campaña de observaciones con el MET ha permitido preparar la figura 6.5 con tres microfotografías, en la que muestran varios detalles de las partículas de halloysita. En la figura 6.5a puede apreciarse una partícula aislada de halloysita en forma típica tubular, en la figura 6.5b se muestra un conjunto de tubos de halloysita acostados sobre la superficie del portamuestra y una terna de ellos (detalles A, B y C) se encuentran parados, mostrando una sección casi perfecta circular. Bates (1955) reporta, de los depósitos de Maria Elizabeth, de Guinea Británica, minerales de arcilla de caolinita y halloysita, esta última con sección atípica hexagonal con respecto a la forma típica tubular que siempre presenta en la naturaleza la halloysita. En la figura 6.5c se puede apreciar secciones transversales de los

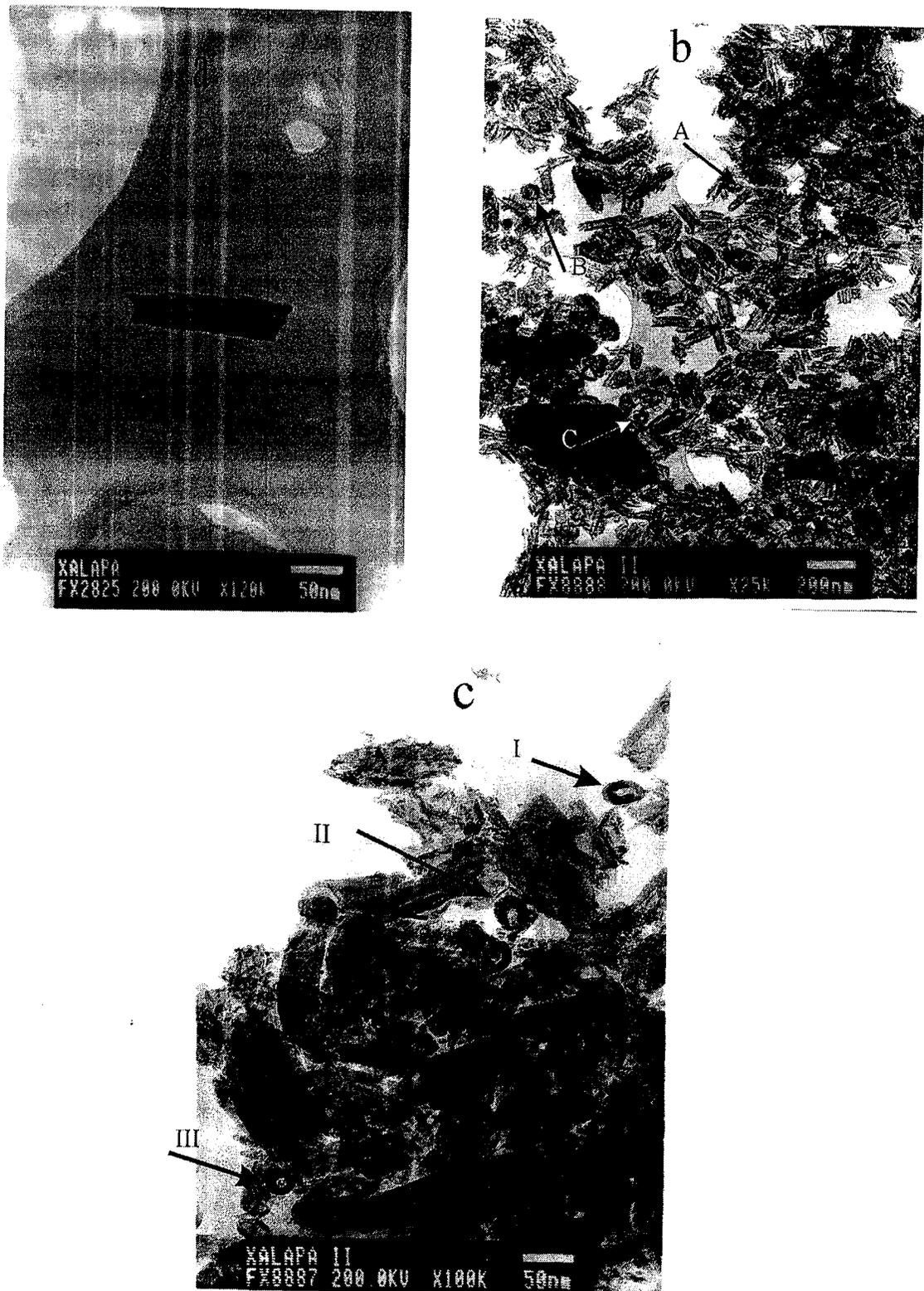


FIGURA 6.5. a) Cristal de halloysita aislado. b) Conjunto de cristales de halloysita de diversos tamaños y c) Secciones transversales de tubos de halloysita.

tubos de halloysita (indicado con I, II y III); los tubos de halloysita están perfectamente enrollados mostrando una sección casi circular. 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 inadapabilidad de las capas tetraédricas y octaédricas y a la presencia de uniones débiles de inter-capas.

Considerando las microfotografías de la figura 6.5, las longitudes representativas de los tubos de halloysita varían entre 60 a 156 nm (600 a 1,560 Å) y sus diámetros entre 24 a 51 nm (240 a 510 Å).

En la figura 6.6 se muestran microfotografías de cristales de alofana, con los bordes rotos que forman aristas subangulosas a angulosas y de forma irregular.

La lámina superior de alofana de la figura 6.6a presenta estrías en paralelo y la figura 6.6b muestra los bordes alterados. Basándose en las microfotografías obtenidas de láminas de alofana de la primera y segunda campaña, las partículas tienen un tamaño que varía

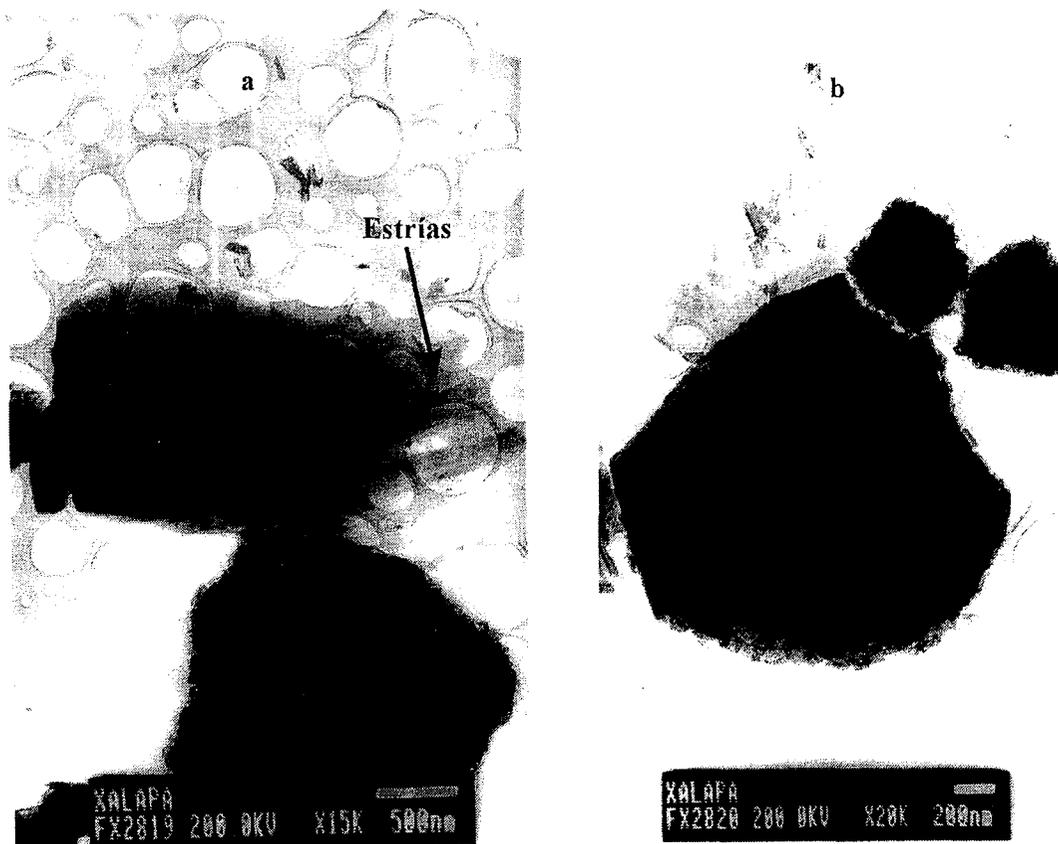


FIGURA 6.6. Cristales de alofana, a) Cristal con estrías y b) Detalle de cristal con bordes alterados.

entre 610 a 2079 nm. Los bordes de las láminas alteradas son debido a la meteorización que han sufrido en el transcurso de su deposición al presente, este aspecto se podrá confirmar en las microfotografías del apartado 6.3.2, que exhiben la alteración del conjunto de partículas por acción de la meteorización.

6.3. FÁBRICA DE LA ARCILLA VOLCÁNICA

6.3.1. Fábrica en estado natural y en el límite de retracción

El capítulo 2 y el apartado 6.1 sirvieron de base para describir y comprender la fábrica de la arcilla volcánica en estado natural, que en este apartado toca tratar y se han obtenido microfotografías en el microscopio electrónico de barrido (MEB), con muestras tratadas como se describe en el capítulo 4. Se prepararon muestras con contenidos de humedad natural y en el límite de retracción; en esta última condición del suelo, en la que se dejó secar el material a temperatura ambiente hasta alcanzar la humedad en el límite de retracción, se partió del hecho de que la arcilla sólo iba a tener retracción sin ocasionar distorsión o giro de sus partículas, es decir, que la retracción no cambiaría drásticamente la fábrica natural. Por otro lado, se cuidó el sentido de las muestras para analizar en el MEB, tal como recibieron las presiones geostáticas en campo.

La figura 6.7a presenta una microfotografía que muestra una panorámica de la arcilla volcánica en estado inalterado, en ella puede observarse como se disponen los agregados y las partículas de arcilla dentro de los agregados para formar la fábrica total del suelo. Las partículas se disponen en arreglos orientados dentro de los agregados (peds), en contactos cara-cara. Los conectores también tienen uniones cara-cara, como puede apreciarse en la figura 6.7b y se observa que el resto de los agregados muestran el mismo arreglo de sus partículas: arreglos de sus dominios orientados.

De acuerdo con Mitchel (1993), la disposición o arreglo de los sedimentos ya sea ocasionado por un agente transportador como el agua o el aire, obedecen a las mismas leyes de transportación. La arcilla volcánica fue transportada por aire al lugar de deposición y dado el tipo de fuerzas repulsivas que predominan entre las partículas que constituyen estos depósitos (ver tabla 2.3), forman estructuras dispersas, muy cerradas y con poros pequeños, como puede apreciarse en las microfotografías de la figura 6.7b y 6.7c, en ésta última se aprecia la superficie de las partículas y como están dispuestas. De acuerdo a lo comentado anteriormente y con la caracterización presentada en el apartado 6.1.3, la fábrica de la arci-

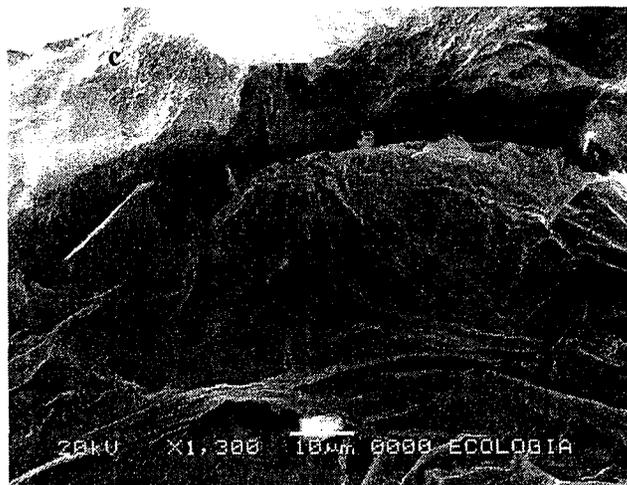
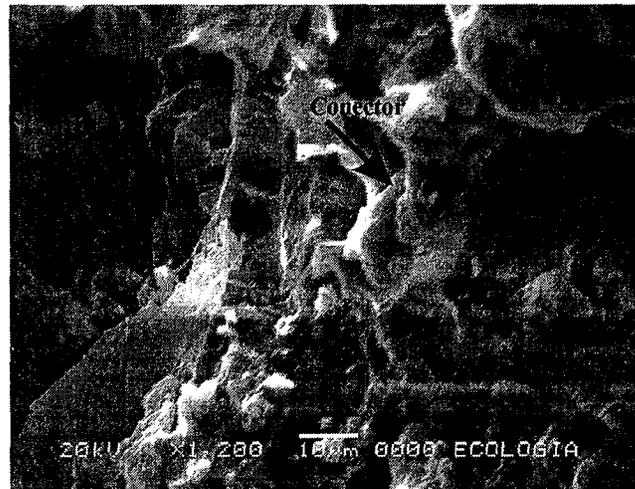
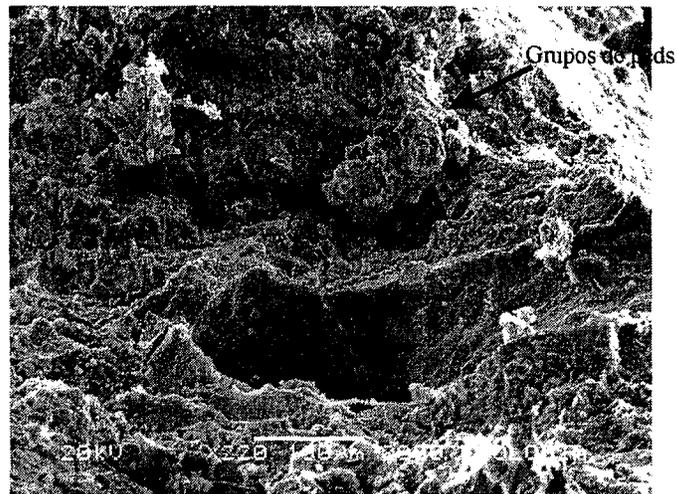


FIGURA 6.7. Fábrica de la arcilla volcánica en estado natural.

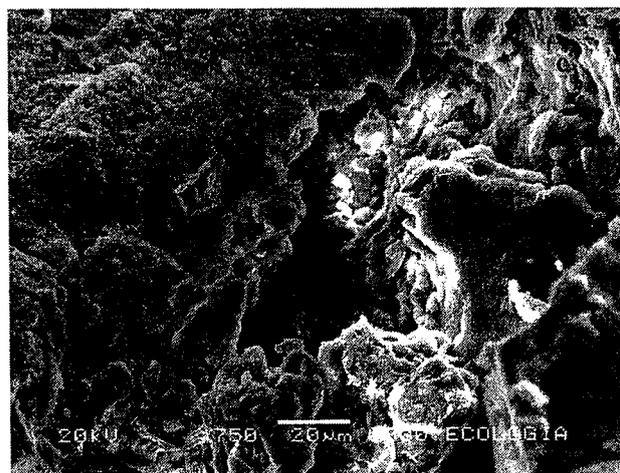
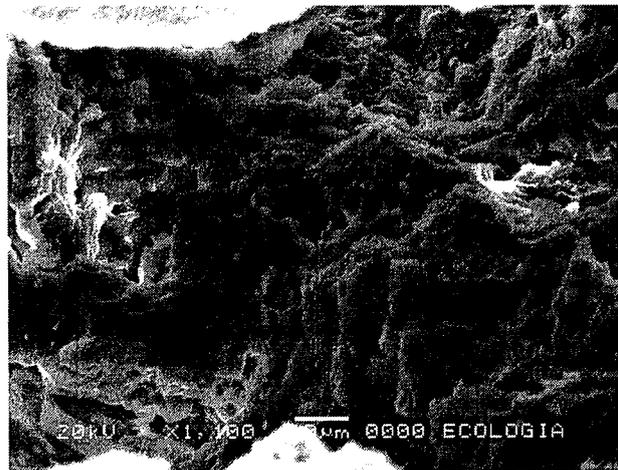
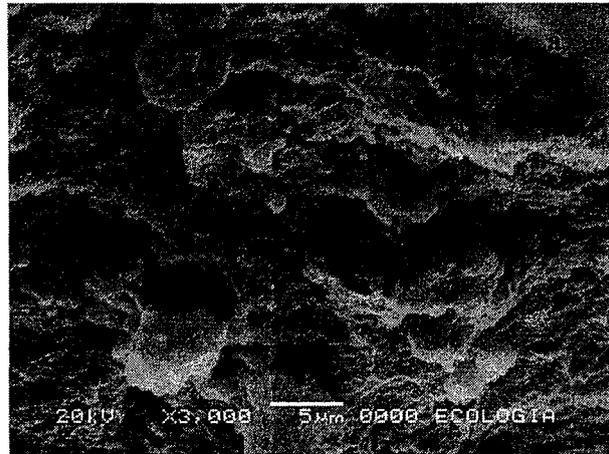


FIGURA 6.8. *Fábrica de la arcilla volcánica con la humedad en el límite de retracción*

lla volcánica corresponde a una "fábrica total anisótropa"; en donde las partículas tienen un arreglo orientado dentro de los agregados y disposición orientada de los agregados, bajo estas condiciones el sistema es anisótropo (Yong y warkentin, 1975). Puede apreciarse en la figura 7.6a, como los agregados están constituidos por varios dominios formados por partículas dispuestas en paralelo (cara-cara), que a su vez forman agregados en forma de oolitos.

En la figura 6.8 se muestran microfotografías de la arcilla volcánica con la humedad en el límite de retracción ($\omega = 25.14\%$) La figura 6.8a ilustra la fábrica oolítica⁵, típica de estos suelos continentales. Las figuras 6.8b y 6.8c ilustran el arreglo orientado de las partículas, es decir, contactos cara-cara de las partículas.

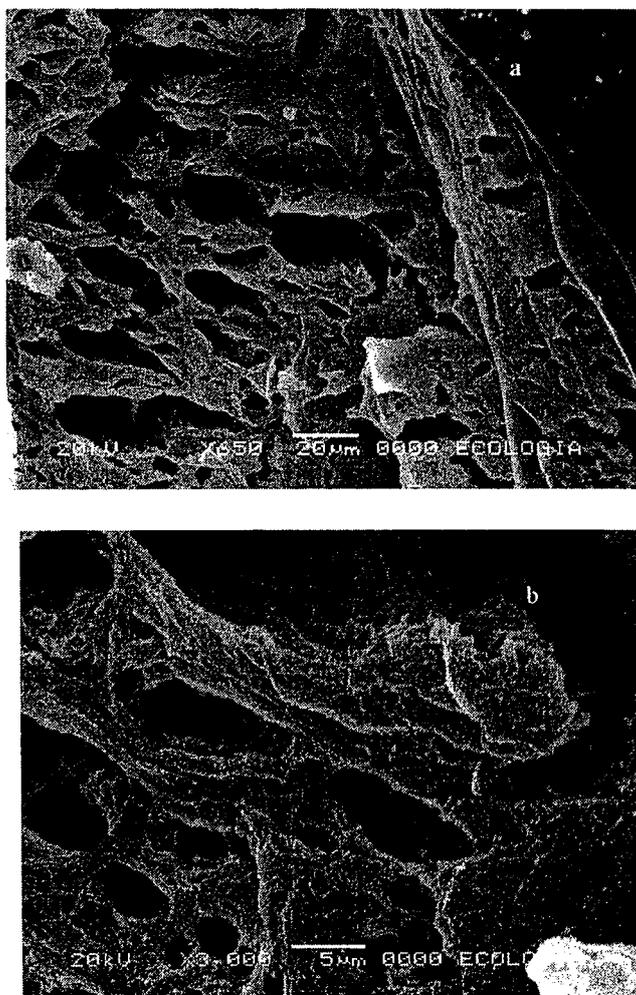


FIGURA 6.9. Arcilla volcánica en estado natural en proceso de meteorización

⁵Se respeta la clasificación propuesta por González de Vallejo *et al* (2002), para asignarle nombre al tipo de fábrica que presenta la arcilla volcánica que se estudia.

6.3.2. Aspectos de la fábrica de la arcilla meteorizada

La meteorización es un factor secundario que influye en la fábrica de un suelo (ver figura 6.1). Bajo el efecto de la meteorización los poros aumentan de volumen. Por otra parte, la superficie específica de las partículas y sus bordes se ven afectados por la actividad de la meteorización, mas no el arreglo orientado de las partículas (disposición cara-cara de las láminas). Al aumentar los tamaños de los poros, las propiedades de permeabilidad del suelo cambian con respecto a su fábrica primaria.

Las microfotografías de la figura 6.9, ilustran el proceso de meteorización de la arcilla volcánica en estado natural. Por la evidencia mostrada, es indudable que los agentes externos, como el agua y los cambios extremos de temperatura, modifica la fábrica inicial del

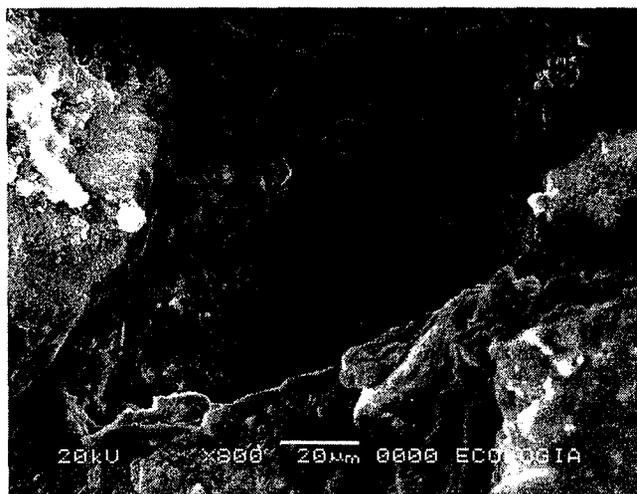
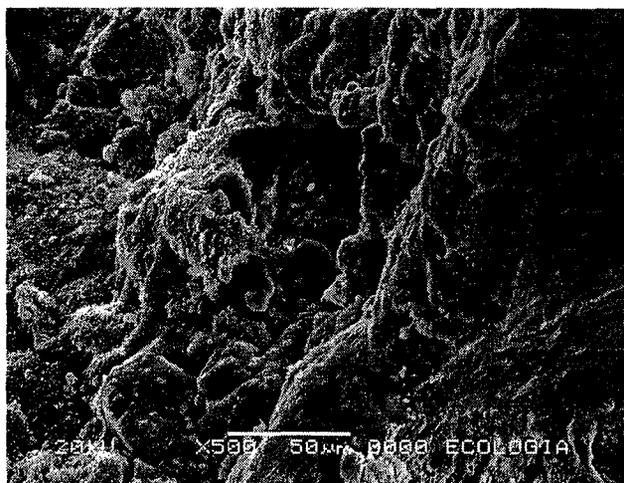


FIGURA 6.10. *Fábrica de la arcilla volcánica compactada por amasado*

sedimento. Puede observarse en la figura 6.9b, como las láminas de arcilla presentan arreglos cara-cara, a pesar de la influencia del proceso de meteorización.

6.4. FÁBRICA DE LA ARCILLA COMPACTADA

La figura 6.10a expone una microfotografía de una muestra compactada por amasado (Harvard miniatura), con la humedad óptima ($\omega_{op} = 40.0\%$). 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. En la figura 6.10b puede observarse los macroporos que se alojan entre los agregados y la disposición de las láminas de arcilla cara-cara.

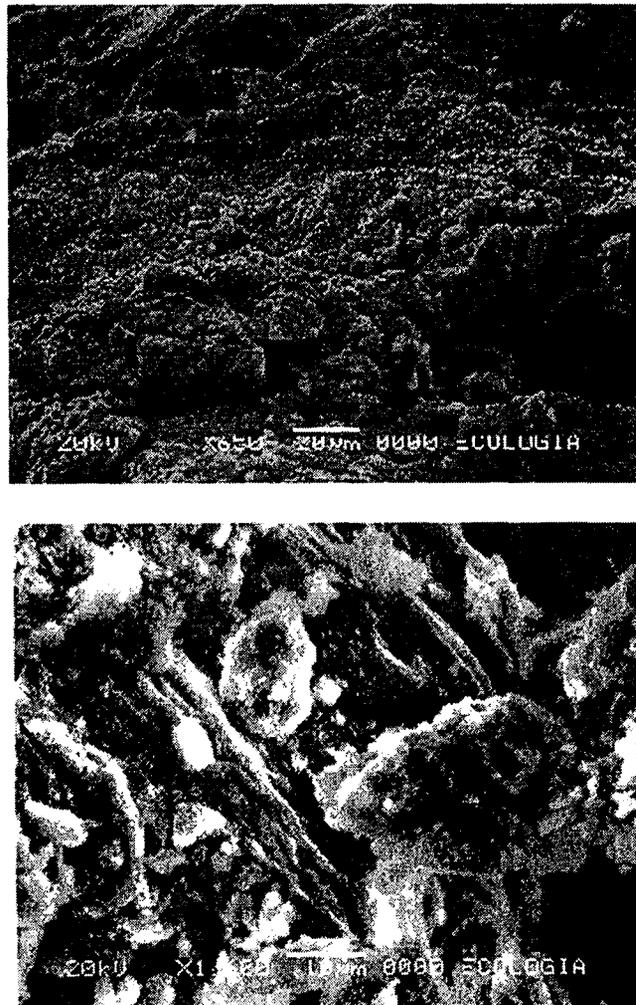


FIGURA 6.11. Fábrica de la arcilla volcánica compactada por impactos

De acuerdo a las microfotografías, la fábrica de la arcilla compactada por amasado que se observa es anisótropa.

En la imagen de la figura 6.11, 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 compactado es isótropa. Persiste la asociación de las partículas cara-cara en los agregados, pero estos no se encuentran orientados, sino tiene un arreglo al azar. De acuerdo con la caracterización propuesta por Yong y Warkentin (1975), la fábrica de la arcilla bajo estas condiciones, corresponde al arreglo de "unidad básica isótropa", con arreglo orientado de partículas dentro de los agregados (ver figura 6.11b) y disposición espacial de los agregados al azar, bajo estas circunstancias la fábrica del suelo es isótropa.

Comparando las imágenes de las figuras 6.10 y 6.11, 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 pequeños que los formados por el método de impactos. La diferencia de las densidades máximas obtenidas por ambos métodos es mínima, como se podrá comprobar más adelante en la figura 7.3, del apartado 7.1.2.2.

7 • Comportamiento Geotécnico

7.1. COMPACTACIÓN

En los laboratorios de mecánica de suelos se acostumbra, por práctica de rutina, determinar la densidad máxima de un suelo determinado por tres métodos, a saber:

- Compactación por impactos.
- Compactación por amasado.
- Compactación por carga estática.

Todos estos métodos se realizan con un molde cilíndrico de paredes rígidas, en donde se coloca el suelo para su correspondiente compactación. Los tamaños y las características de los moldes (Proctor, 1933; Wilson, 1958 y Normas AENOR, 2001) dependerán del método que se utilice. La energía de compactación se puede variar en los tres casos, según lo impongan las necesidades de campo o el interés de estudio. Los dos primeros métodos de compactación tienen un interés de uso aquí, por la representatividad en laboratorio de las condiciones de compactación de campo. El tercer método, por carga estática, de ningún modo representa las condiciones de los procedimientos de compactación de campo (Marsal y Reséndiz, 1975), pero tiene un interés para nuestra investigación: al formar probetas de suelo con este procedimiento, se crea una estructura floculada (Lambe, 1958, 1974; Romo, 1990), condición ésta que genera una estructura abierta en la fábrica del suelo y se han construido especímenes para analizar su deformabilidad en edómetro de succión controlada, para comparar con el estado natural del suelo, compactado por amasado y por impactos; como se verá más adelante. Por otra parte, se analiza con detalle la fábrica de las probetas (con sus densidades máximas y humedad óptima) en el microscopio electrónico de barrido para los dos primeros métodos de compactación, pues tiene un interés ingenieril, ya que estos dos métodos (como se dijo con anterioridad) representan las condiciones de compactación de campo.

Con el objeto de observar como influye en los ensayos la energía de compactación, el procedimiento de compactación y la preparación de las muestras en la densidad y la humedad, se prepararon muestras ensayadas con diferentes energías de compactación con un mismo equipo, se realizaron ensayos con diferentes equipos de compactación y se procedió a preparar muestras tratadas de diferentes maneras, pero bajo una misma metodología de compactación y con el mismo equipo. Con lo anterior, podremos averiguar como influye el procedimiento de compactación en la densidad máxima y humedad óptima de la arcilla, así como también, dilucidar con qué procedimiento de compactación puede obtenerse mejor orientación de las partículas (estructura dispersa) en el suelo.

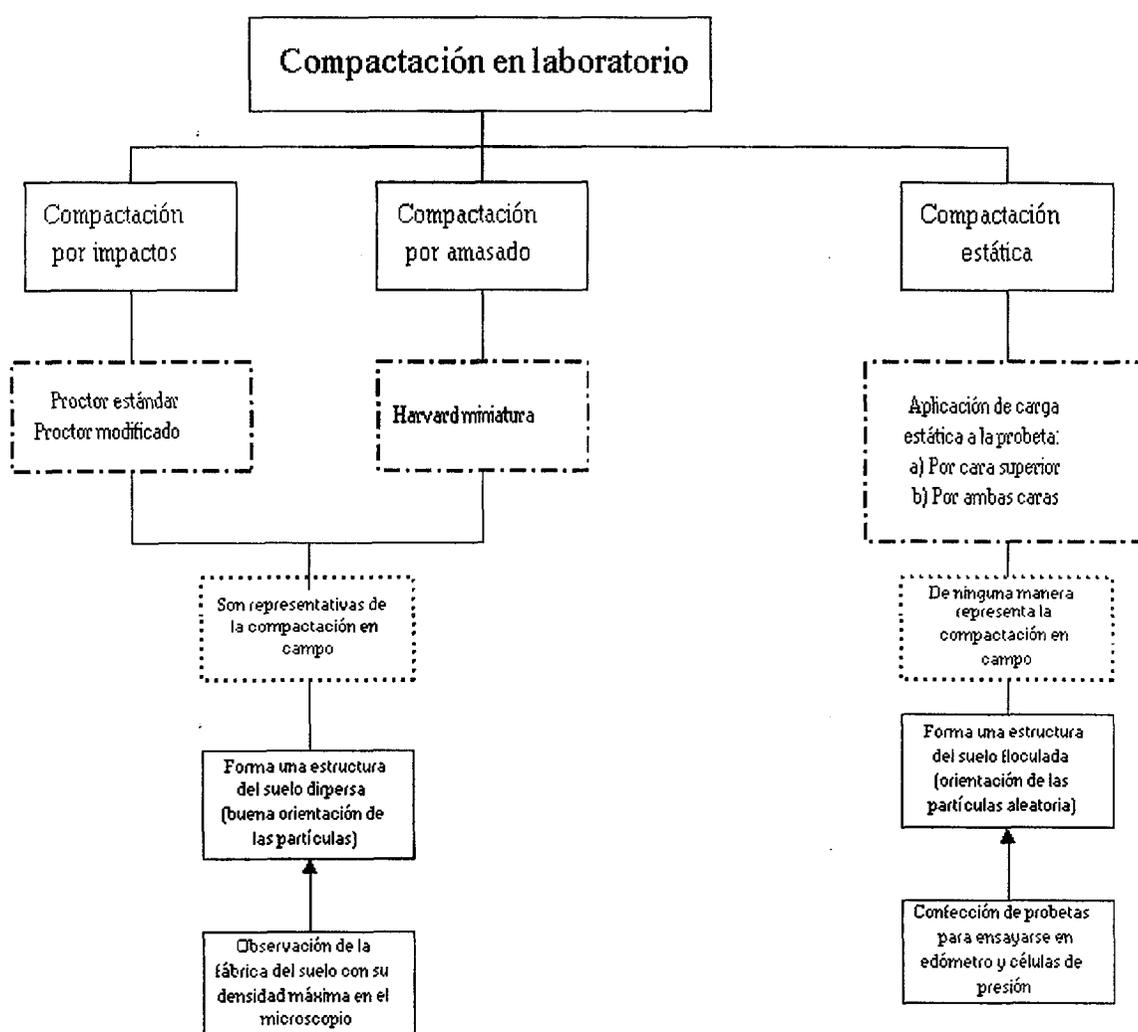


FIGURA 7.1. *Métodos de compactación más comunes en laboratorio*

En la figura 7.1 se muestra los métodos de compactación utilizados en el desarrollo de esta etapa experimental.

7.1.2. Compactación por impactos y por amasado

7.1.2.1. Influencia de la energía de compactación

Con el equipo para ensayos de compactación por impactos (equipo Proctor) se investigó como varía la densidad máxima y la humedad óptima, modificando la energía de compactación: energía de compactación Proctor normal (o estándar) y modificada.

En la figura 7.2, puede apreciarse, que tanto la curva de compactación formada con la energía de compactación Proctor estándar como modificada, sus lugares geométricos densidad máxima-humedad óptima se encuentran próximos a la curva de saturación del 100 % ($S_r = 100\%$), dicho en otras palabras, los lugares geométricos mencionados están alejados y por arriba de la curva de saturación del 90 %. Siguiendo a Lambe (1958, 1979) podemos interpretar, en la misma figura, que a mayor esfuerzo de compactación se logra una mejor orientación de las partículas del suelo, tanto en la rama seca de las curvas de compactación (humedades de compactación por debajo de la óptima) como (y aún más) en la rama húmeda de las mismas curvas de compactación (humedades por arriba de la óptima). Lo anterior se puede ver físicamente en la diferencia de las densidades entre ambas curvas de compactación, es decir, que a mayor densidad se obtiene una mejor orientación de las partículas o las partículas han sufrido una mayor deformación angular¹ por el incremento de la energía de compactación (Marsal y Reséndiz, 1975), apilándose mayor número de partículas por unidad de volumen. Para ambas curvas de compactación, en la rama seca, existe un apilamiento de partículas con orientación aleatoria (estructura floculada), que se debe a la poca agua que existe en el suelo. Al existir poca agua en el suelo, el espesor de la doble capa de las partículas disminuye (mayor concentración de electrolito) y las fuerzas de repulsión interpartícula disminuyen, creando una estructura floculada, es decir, con alto grado de orientación aleatoria (Lambe, 1958) y una baja densidad de suelo. Obsérvese en la figura 7.2, como aumenta la densidad (mayor orientación de las partículas) con el aumento de contenido de humedad de compactación, tanto para la curva Proctor estándar como para la modificada. Para diferentes energías de compactación, en la rama húmeda, el suelo adquiere una mayor organización de las partículas, pues a mayor cantidad de agua de compactación presente en el suelo, la capa doble de las partículas crece y por tanto las fuerzas de repulsión entre las partículas crecen, creándose así una mayor orientación de las

¹Entiéndase por deformación angular, al giro de las partículas de suelo ocasionado por un esfuerzo de compactación.

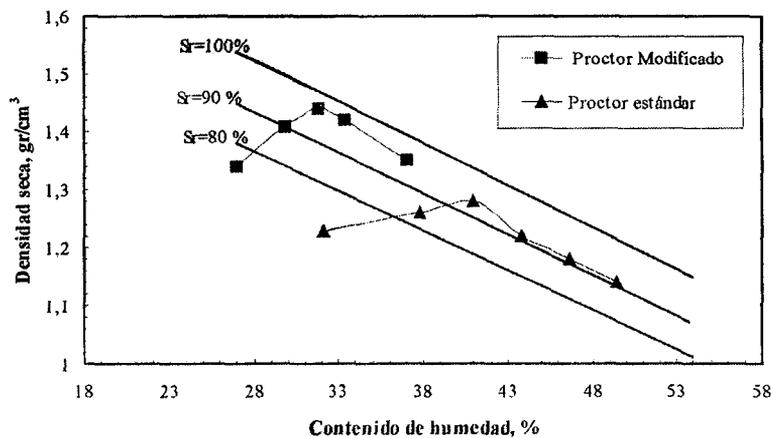


FIGURA 7.2. Curvas de compactación Proctor estándar y modificado

partículas, es decir, una estructura dispersa. La caída de la densidad en la rama húmeda, se debe al incremento de la presencia de agua que va desplazando a las partículas de suelo.

7.1.2.2. Influencia del procedimiento de 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. Como se comentó al principio del cuerpo de este capítulo, interesa observar como varía la densidad de la arcilla por diferentes métodos de compactación. En la figura 7.3 se muestra una curva de compactación que representa al suelo compactado por impactos (Proctor estándar), 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 apreciarse 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 compac-

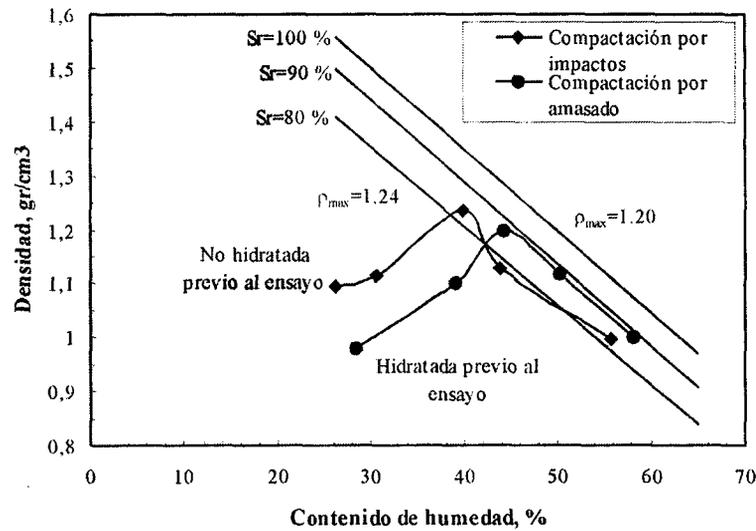


FIGURA 7.3. Influencia del método de compactación en la densidad y en la orientación de las partículas

tación por amasado estaban más próximas a la curva de saturación del 100 % que los de compactación por impactos.

7.1.2.3. Influencia del tratamiento de las muestras en la compactación

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. Como puede observarse en la figura 7.4 la muestra de suelo hidratado presenta una mejor orientación de las partículas que el suelo no hidratado, tanto en su rama seca como en su rama húmeda. Véase, en la misma figura, que a un contenido de humedad dado (en el rango de humedades de las curvas de compactación), la curva de compactación del suelo hidratado presenta densidades mayores con una misma energía de compactación que la curva de compactación del suelo no hidratado. La explicación a este fenómeno es debido a que la previa hidratación del suelo se les permitió a las partículas del suelo adsorber moléculas de agua para equilibrar su carga y de esta forma la doble capa eléctrica aumentó su espesor y por tanto, las fuerzas de repulsión aumentaron creando mayor grado de ordenamiento (incremento de la densidad) que las partículas de suelo no hidratado. Al parecer, a las partículas del suelo hidratado se le dio más tiempo para que sus

partículas adsorbieran moléculas de agua (lubricación) incrementándose la repulsión interpartícula, permitiéndose que las partículas deslizaran entre ellas logrando una mejor orientación (Lambe, 1958), además, el lugar geométrico densidad máxima-humedad óptima de la curva de compactación del suelo hidratado está más próximo a la curva de saturación del 100 % que el lugar geométrico del suelo no hidratada, ubicada entre las curvas de saturación del 90 % y 100 %.

En las ramas húmedas de las curvas de compactación, se ve que el suelo hidratado tiene un mayor grado de orientación de las partículas (estructura dispersa) que el suelo no hidratado, y esto se aprecia en la diferencia de las densidades que son mayores para la muestra hidratada que para la muestra no hidratada.

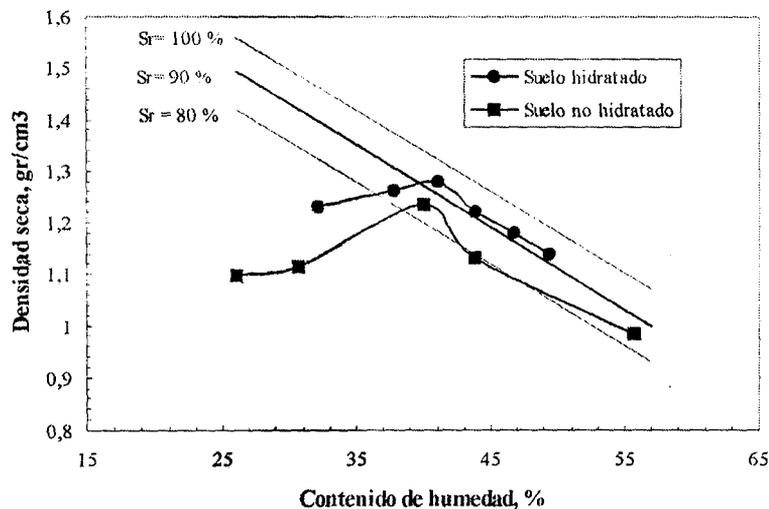


FIGURA 7.4. Comparación de curvas de compactación Proctor estándar con diferente tratamiento

7.2. RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN

7.2.1. Ensayos de corte directo

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 esta respuesta de las arcillas se estudia en este apartado a las arcillas volcánicas en estado compactado por carga estática, con la densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo, obtenidos en ensayos de compactación Proctor estándar, para determinarles 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 sobroconsolidación) fuera mayor que 1 y bajo esta circunstancia se representará las condiciones de preconsolidación que muestra en la naturaleza la arcilla volcánica en estudio. Como es bien sabido, la resistencia residual es un pequeño porcentaje de la resistencia máxima (de pico), y en este rango de tensiones (tensiones tangenciales constantes con grandes desplazamientos) representa la destrucción de los enlaces de las partículas de minerales arcillosos (Lambe, 1979; Lupini et al, 1981; Skempton, 1985) y, como se verá más adelante, la reorientación de las mismas en el sentido del corte.

El criterio de rotura aquí adoptado es el de Coulomb, criterio planteado en el año 1773, y asocia tensiones normales con tangenciales, éstas últimas aplicada en el sentido del plano de falla, a saber:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi$$

en la cual:

τ = resistencia al esfuerzo cortante

c = cohesión del suelo

σ_n = tensión normal aplicada al plano

ϕ = ángulo de rozamiento (pendiente de la línea de resistencia)

La ecuación de Coulomb, representa una recta en el plano $\sigma_n - \tau$, en donde para cada valor de la presión normal σ_n , le corresponde una resistencia al esfuerzo cortante τ en el plano de falla, de tal suerte que la resistencia de pico de un suelo depende de la historia de tensiones, de la microfábrica que adquirió en esa historia de tensiones, de las condiciones de drenaje, de la mineralogía (Kenney, 1967; More, 1991) y la cantidad de fracción arcillosa que el suelo contiene (Lupini et al, 1981).

Las modalidades de ensayos que se llevaron a cabo en la máquina de corte directo, fueron las siguientes:

1. Ensayo sin inundar las probetas de suelo, sin consolidar y rotura rápida.
2. Ensayo con inundado de probetas, consolidado y rotura rápida.
3. Ensayo con inundado de probetas, consolidado y rotura lenta.

A pesar de la limitación que el aparato de corte directo y anular tienen en el control de las presiones de poro (intersticiales), se controló el drenaje en el suelo aplicando con la máquina de corte, diferentes velocidades de desplazamiento horizontal: velocidades alta para evitar el drenaje en la muestra (rotura rápida) y velocidades bajas (rotura lenta) para permitir que se disiparan las presiones intersticiales en el suelo. Así por ejemplo, en la primera modalidad se aplicó a las probetas sin consolidar velocidades altas de desplazamiento horizontal, no permitiendo la disipación de las presiones intersticiales. En este tipo de ensayo los parámetros de resistencia quedan definidos en función de las tensiones totales. Para la tercera modalidad, las probetas se consolidaron y se llevaron a la falla a velocidades de desplazamiento horizontal muy bajas, permitiendo que las presiones intersticiales se disiparan totalmente. Aquí los parámetros de tensión quedan definidas por las tensiones efectivas, dado que se disiparon todas las presiones intersticiales, absorbiendo las tensiones externas la estructura (esqueleto mineral) del suelo.

Con la finalidad de investigar la resistencia residual del suelo, se ensayó en el aparato de corte anular, con la única modalidad de ensayo: en que la probeta se inundó, se consolidó y se llevó a la falla con velocidad de desplazamiento angular baja, para permitir la disipación de las presiones intersticiales. Esta metodología, permitió comparar los resultados obtenidos con los de la tercera modalidad de corte directo, es decir, con la resistencia de pico. La confiabilidad del ensayo de corte anular, en la obtención de los parámetros de resistencia residual, consiste en la característica de que la superficie de falla se mantiene constante en todo el proceso de ensayo, como sucede en la naturaleza. Por tal razón, se prefirió determinar la resistencia residual en el mencionado aparato de corte.

Con el objeto de conocer las propiedades índice del suelo en el momento de ser ensayado en la máquina de corte directo y anular, se presentan en la tabla 7.1 las condiciones de ensayo.

7.2.1.1. Corte directo con rotura rápida, sin inundar y sin consolidar

Las probetas ensayadas fueron compactadas con carga estática por una cara (compactación estática), adquiriendo el suelo una estructura floculada (abierta) con una orientación de partículas aleatoria. Como se indica en la tabla 7.1, la carga estática de compactación fue de 477 kPa, tensión de mayor valor que las tensiones normales verticales aplicadas a las probetas en el ensayo, que fue de 114.8 kPa, 229.6 kPa y 345.3 kPa. Las razones de

sobrec consolidación (OCR) son de 4.2, 2.1 y 1.4, respectivamente, circunstancia ésta que indica que el suelo está sobreconsolidado en el momento del ensayo.

TABLA 7.1. Condiciones del suelo y de ensayo

Tipo de ensayo	Condiciones de ensayo	Contenido de humedad %	Índice de huecos -	Densidad seca gr/cm ³	Presión de compactación kPa	Velocidad de desplazamiento mm/min
Corte directo	Sin inundar Sin consolidar Rotura rápida	39.4	1.1	1.29	477.0	0.48
Corte directo	Inundado Consolidado Rotura rápida	45.0	1.23	1.24	477.0	0.48
Corte directo	Inundado Consolidado Rotura lenta	39.83	1.1	1.29	477.0	0.14
Corte anular	Inundado Consolidado Rotura lenta	49.5	1.31	1.2	-	1.4

Nota: el término inundar se refiere a realizar el ensayo con el recipiente del equipo lleno de agua.

En la figura 7.5a puede apreciarse que las curvas tensión tangencial versus desplazamiento horizontal (tangenciales) describen un comportamiento parecido al de una arena floja o de un limo normalmente consolidado (Skempton, 1985) con bajo contenido de fracción arcillosa (< 20%). El índice de fluidez con el contenido de humedad de ensayo (ver tabla 7.1) es de 0.04, dicho valor describe a una arcilla de consistencia firme a muy firme, consistencias típicas de arcillas sobreconsolidadas. El comportamiento de la arcilla volcánica en estudio no corresponde a las razones de sobreconsolidación que están por arriba de la unidad, ni a la consistencia adquirida en el ensayo. Sé cree que este comportamiento se debe a que la estructura de la arcilla fabricada en las probetas es una estructura abierta, que la densificación del suelo no se incrementó, porque no se consolidó previo al corte y por otra parte, las probetas no se inundaron, al no estar inundadas (suelo parcialmente saturado) la concentración de electrolito es mayor en el medio poroso, circunstancia que hace que disminuya el espesor de la doble capa de las partículas (Lambe, 1958) y por ende, las

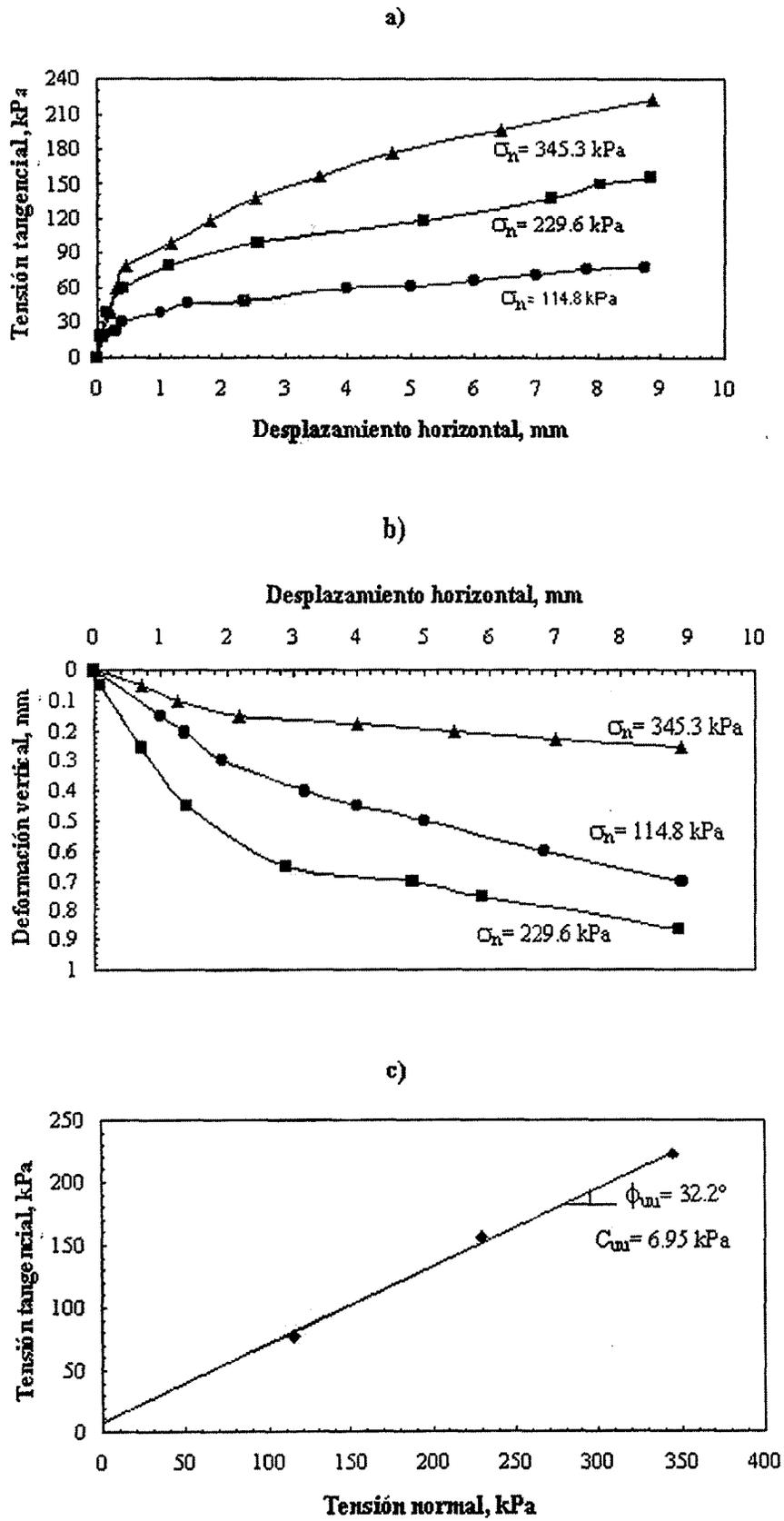
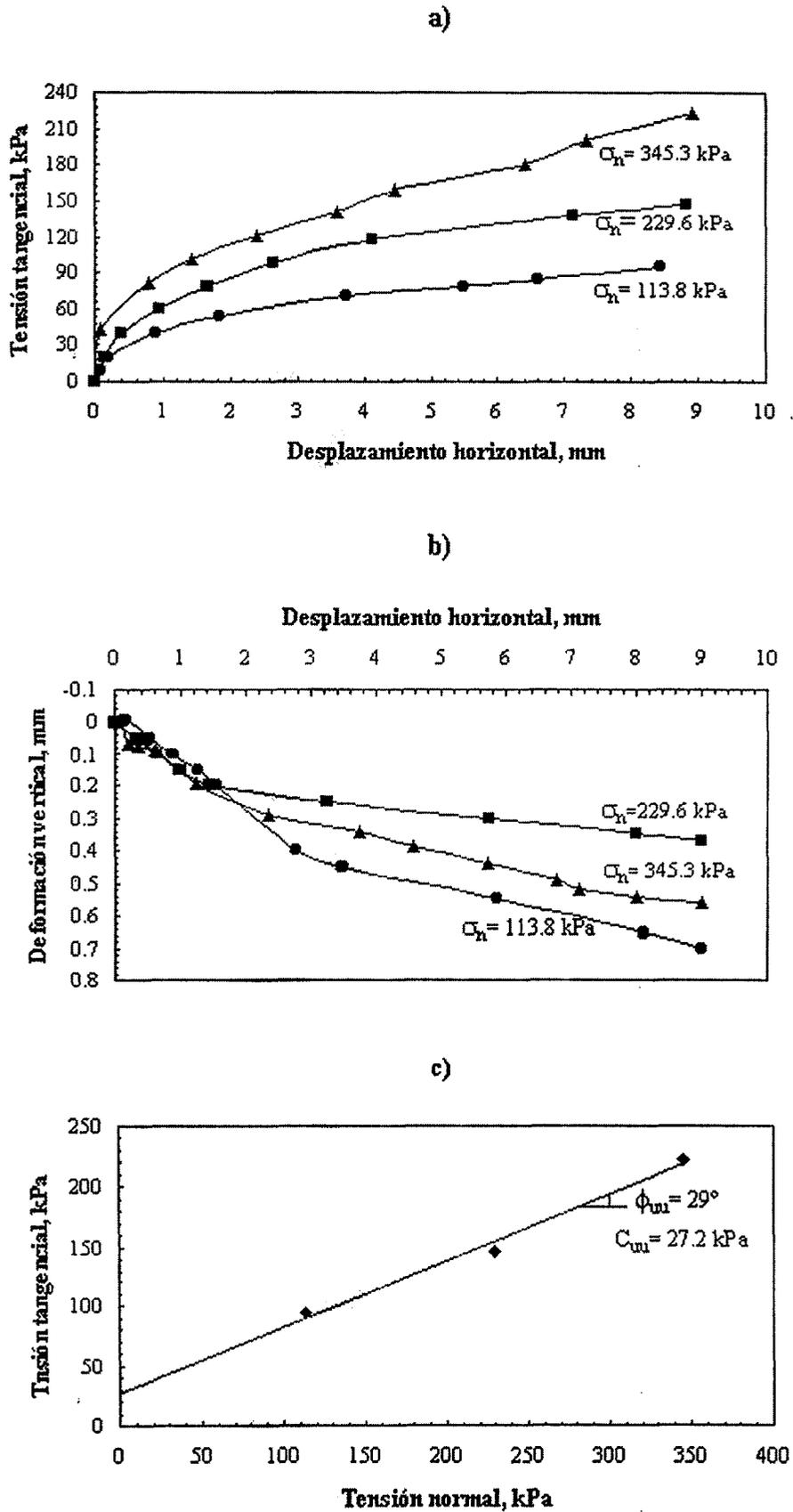


FIGURA 7.5. Ensayo de corte directo: sin inundar, sin consolidar y rotura rápida.

fuerzas de repulsión interpartícula sean menores: tendencia a una estructura floclada. Bajo estas condiciones la arcilla, que a pesar de tener características de un suelo preconsolidado, se comporta como una arena floja o un limo (con poco finos arcillosos) normalmente consolidado. En la etapa de rotura, las partículas encuentran dificultad para reorientarse en la dirección del corte y esto se ve reflejado en el ángulo de fricción interna (figura 7.5c) que es mayor que en condiciones de ensayo inundado (ver figura 7.6c). La resistencia bajo estas condiciones de ensayo, se ve afectada por las tensiones capilares. En la figura 7.5b, puede observarse que la arcilla no presenta una respuesta dilatante, sino una respuesta contráctil y a mayor tensión normal las deformaciones verticales son menores. Finalmente, en el proceso de falla se destruye toda la fábrica existente y las tensiones tangenciales obligan a las partículas que se reorientan en la dirección de las mismas en el plano de falla. Lo anterior puede observarse físicamente en las microfotografías de la figura 7.11.

7.2.1.2. Corte directo con rotura rápida, inundado y consolidado

En este ensayo las probetas se encuentran saturadas, pues se han inundado y después se dejaron consolidar y finalmente, se llevaron a la falla en rotura rápida, sin permitir el drenaje del agua; esto fue posible por la alta impermeabilidad de la arcilla. Al encontrarse inundado el suelo, la concentración del electrolito disminuye y por ende, el espesor de la doble capa de las partículas aumenta, al aumentar dicho espesor, las fuerzas de repulsión aumentan, formándose una estructura que tiende a la dispersa. Al someter a la probeta a una tensión normal vertical, las partículas se reorientan hasta alcanzar la consolidación, adquiriendo la arcilla una mayor rigidez. Lo anterior se puede observar en la figura 7.6b, a pequeños desplazamientos horizontales, la arcilla tiene una respuesta dilatante, casi imperceptible, para luego manifestar una respuesta contráctil. En la misma figura 7.6a se muestran las curvas desplazamiento horizontal versus tensión tangencial con forma semejante a las curvas mostradas en la figura 7.5a. Además, este par de juegos de curvas tiene algo en común, que a mayor tensión normal vertical la rigidez del suelo aumenta, lo cual era de esperarse. Pero hay algo más que predomina en el comportamiento tensión tangencial versus desplazamiento horizontal de las curvas presentadas en las figuras 7.5a y 7.6a, es que la microfábrica inicial que se ha creado en las probetas es una estructura floclada: orientación aleatoria de las partículas. Esa es la razón principal de por que el comportamiento tensión tangencial versus desplazamiento horizontal, en condiciones no inundadas, tiene un comportamiento similar al de condiciones inundadas. En la figura 7.6c puede observarse que la cohesión de la arcilla es mayor que en el ensayo no inundado, pero el ángulo de fric-



ción interna es menor. Esta disminución del ángulo de fricción interna de 32.2° (ver figura 7.5c) a 29° se debe a que la **doble capa** de las partículas sirvió de lubricante entre los contactos de las partículas y la **fricción** disminuyó entre ellas. Otro aspecto que también influyó en los parámetros de resistencia para esta condición (suelo inundado), es que al tener el suelo a una estructura dispersa (mayor grado de orientación de las partículas), las partículas arcillosas tuvieron **mejor** encajamiento y alineamiento en el plano de falla y en el sentido del corte. En este **ensayo**, la resistencia máxima no drenada, cuando las tensiones normales verticales son nulas, vale 27.2 kPa.

7.2.1.3. Corte directo con rotura lenta, inundado y consolidado

En este ensayo 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. En la figura 7.7a se observa que la curva tensión tangencial versus desplazamiento horizontal de tensión normal vertical (σ_n) igual a 101.0 kPa, muestra una pequeña caída post-pico y con el incremento de los desplazamientos horizontales, la tensión tangencial se mantiene constante. No ocurre lo mismo con las curvas de mayor tensión normal vertical: $\sigma_n = 230.5$ y 345.3 kPa. 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 (el suelo en estudio **contiene** cristales minerales en forma cilíndrica y láminas planas), 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. Mas sin embargo, se considera aquí en este **estudio**, que la fábrica del suelo juega un papel decisivo en la etapa de caída post-pico del suelo.

En la figura 7.7b se observa que a pequeños desplazamientos horizontales, la arcilla muestra una respuesta dilatante (como en la condición de rotura rápida e inundado y consolidado) y después, con el **incremento** del desplazamiento horizontal la arcilla tiene una respuesta contráctil. El grado de sobreconsolidación OCR que tiene las probetas influye en la etapa dilatante de la arcilla. Aquí, bajo estas condiciones de ensayo, la envolvente de falla pasa (figura 7.7c) por el origen y tiene un ángulo de fricción interna de 36° , que depende directamente de las tensiones **efectivas** y las presiones intersticiales valen cero.

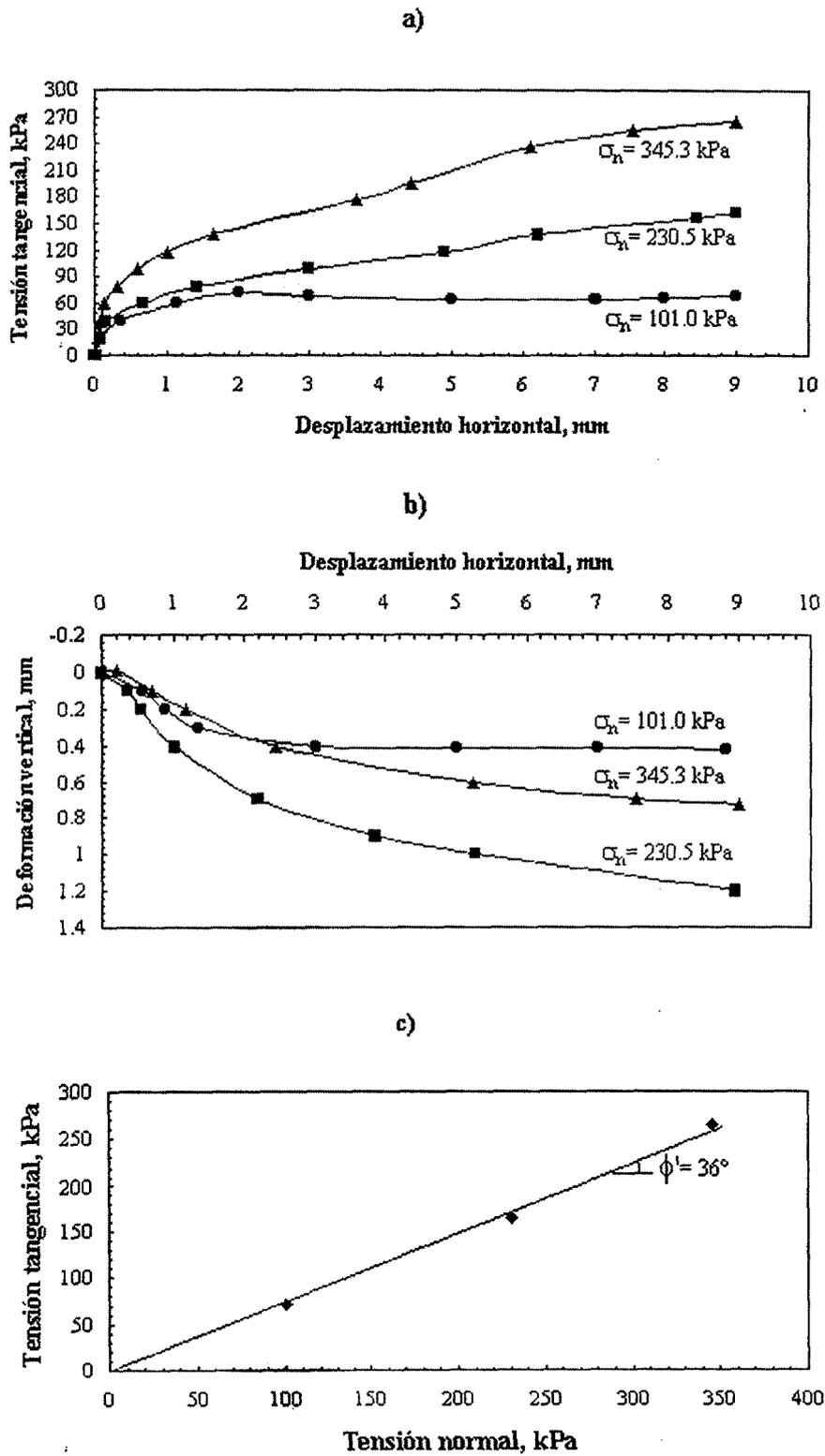


FIGURA 7.7. Ensayo de corte directo: inundado, consolidado y rotura lenta

7.2.1.4. Corte anular con rotura lenta, inundado y consolidado

Se observó el comportamiento del suelo después de la resistencia de pico, es decir, consolidada la muestra, se llevaba a la falla de pico y posteriormente se dio grandes desplazamientos tangenciales hasta alcanzar un desplazamiento de 270 mm. Se escogió la resistencia mínima de equilibrio de las curvas tensión tangencial-desplazamiento horizontal de la figura 7.8a, para formar la envolvente de falla presentada en la figura 7.8c. Volviendo a la figura 7.8a, aquí la resistencia residual depende del porcentaje de partículas arcillosas (Lupini *et al*, 1981) y de la composición mineralógica (Kenney, 1967) y no a las tensiones que haya sufrido el suelo en su historia geológica. Las curvas tensión tangencial-desplazamiento horizontal, describen el comportamiento después del estado crítico (ablandamiento total del suelo), en caída post-pico. Los enlaces interpartícula se han roto totalmente en esta etapa de falla, para que luego las partículas se reorienten en la dirección del corte. Cuando la reorientación de las partículas se concluye, a lo largo de grandes desplazamientos, la resistencia permanece constante en el valor residual (Skempton, 1985). Como las partículas arcillosas que componen la probeta han tenido deformaciones angulares tanto en consolidación, como en proceso de corte y aunado a la destrucción de los enlaces originales que tenía el suelo en la etapa de resistencia pico, no presenta comportamiento dilatante. En la figura 7.8b se muestran las curvas desplazamiento horizontal-deformación vertical. El ángulo de fricción interna en resistencia residual es de 21.6° (figura 7.8c).

En suelos arcillosos procedentes de Java, Indonesia, compuestos por minerales de arcilla de Haloisita y alofana y compactados en laboratorio, Wesley (1977) reporta en resistencia residual (en corte anular) ángulos de fricción interna (fr) de 24.5° en suelos con fracción arcillosa de 83%. La fracción arcillosa ($< 2 \mu\text{m}$) 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 (ver tabla 7.1). Lo expuesto arriba, verifica la afirmación de Lupini, Kenney y Skempton de que la resistencia residual depende del contenido de fracción arcillosa y la composición mineralógica de la arcilla.

7.2.1.5. Comparación de resultados

En la figura 7.9 se muestra las envolventes de falla de los ensayos de corte directo, con muestra inundada y consolidada, en rotura rápida y lenta. En rotura rápida del suelo se ve la influencia que tiene las presiones intersticiales en los parámetros de resistencia. En este ensayo, se somete al suelo a un estado de tensiones en que agua y esqueleto mineral del

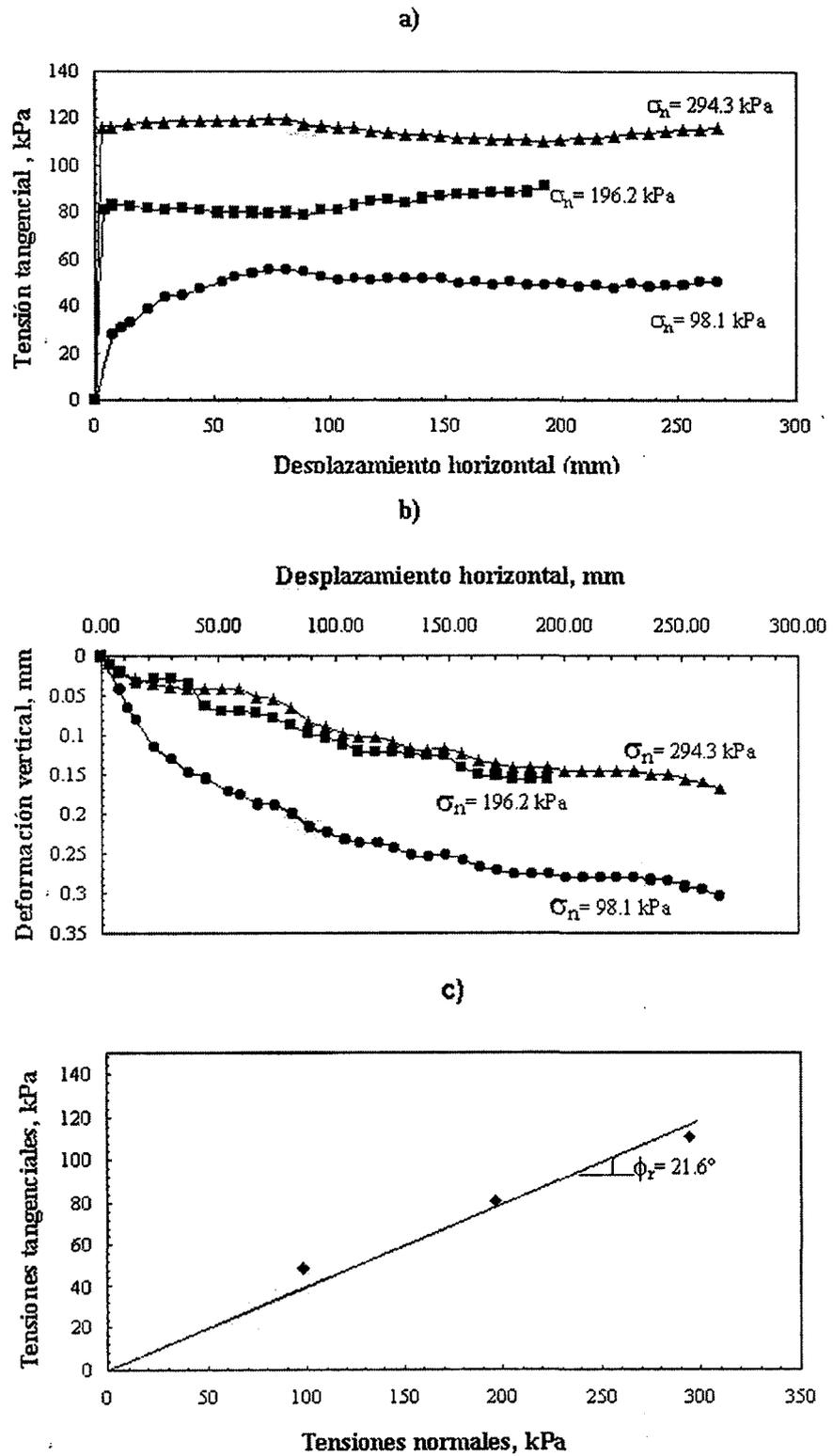


FIGURA 7.8. Ensayo de corte anular: inundado, consolidado y rotura lenta

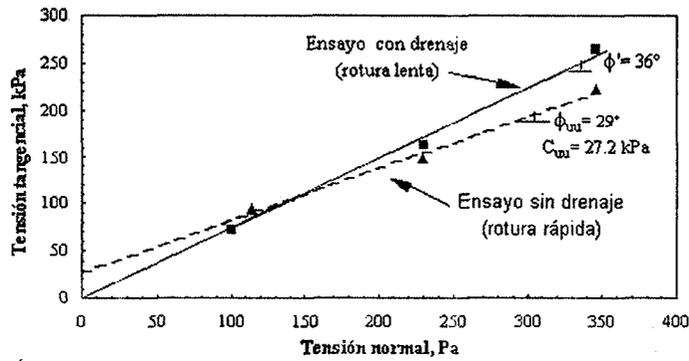


FIGURA 7.9. Comparación de envolventes de falla en corte directo.

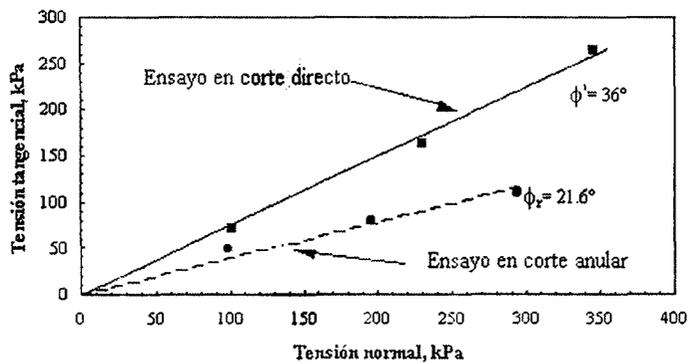


FIGURA 7.10. Envolvente de falla en resistencia de pico y residual.

suelo absorbe dicho estado de tensiones. La resistencia no drenada (C_{uu}) de la arcilla de alta plasticidad y saturada, no depende de la tensión normal vertical, pues como puede apreciarse en la mencionada figura, la máxima resistencia tangencial en el plano, es cuando la tensión efectiva normal vale cero, en otras palabras, es el valor representado por la ordenada en el origen. Para la condición de rotura lenta, la línea de resistencia pasa por el origen y la resistencia tangencial movilizada de la arcilla es gobernada por el esqueleto mineral del suelo, pues las presiones intersticiales, en apariencia, valen cero.

En la figura 7.10 se muestran las envolventes de falla del ensayo de corte directo con rotura lenta (inundado y consolidado) y la de corte anular.

En la figura 7.11 se muestra una microfotografía, tomada a superficies de falla de muestras ensayadas en el aparato de corte directo. Las superficies de falla de las probetas muestran un sistema de estrías y líneas en el sentido del corte, que representan la reorientación de las partículas en el proceso de falla.

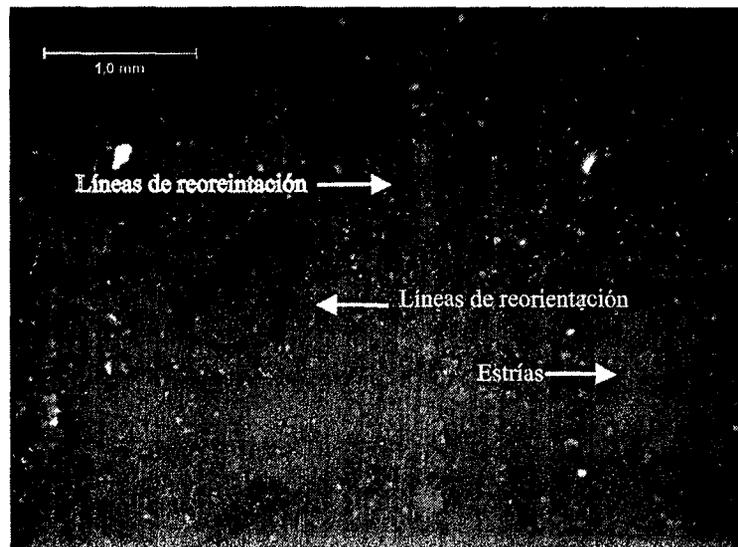


FIGURA 7.11. Superficie de falla en ensayo de corte directo.

7.3. COMPRESIÓN TRIAXIAL

7.3.1. Ensayos en la cámara triaxial

En este apartado se presentan los resultados de ensayos realizados en cámara triaxial, aplicados a suelo en estado inalterado y alterado. Con la ventaja que tiene el aparato triaxial de controlar el drenaje en las probetas de suelo cuando son sometidas a tensiones, se han ejecutado los siguientes tipos de ensayos, a saber:

- Triaxial no consolidado-no drenado (UU)
- Triaxial consolidado-no drenado (CU)
- Triaxial consolidado-drenado (CD)

Se efectuaron ensayos de compresión del tipo UU en suelo inalterado y compactado por impactos (Proctor normal) y por amasado, utilizando el equipo Harvard miniatura. Para poder efectuar comparaciones en cuanto a comportamiento tensión desviadora-deformación axial en condiciones de ensayo no consolidado y no drenado (ensayo UU), se calibró el equipo Harvard miniatura, para obtener la misma energía de compactación que el equipo Proctor normal y de esta forma observar la rigidez de cada probeta, según su procedimiento de compactación. Para los ensayos CU y CD sólo se aplicaron a suelos tratados con compactación por impactos en condiciones Proctor normal y además se determinó la per-

meabilidad bajo estas mismas condiciones. Las propiedades índice de cada probeta, utilizadas en cada ensayo, se muestran en la tabla 7.2.

TABLA 7.2. Condiciones del suelo y de ensayo en compresión triaxial

Tipo de ensayo	Estado de la arcilla	Contenido de humedad, %	Índice de huecos -	Densidad seca gr/cm ³	Tipo de compactación
UU	Inalterado	34.5	0.96	1.35	-
	Compactada	41.0	1.12	1.24	Por impacto
	Compactada	43.0	1.2	1.20	Por amasado
CD	Compactada	40.7	1.1	1.26	Por impacto
CU	Compactada	40.86	1.08	1.27	Por impactos

7.3.2. Resistencia al corte sin drenaje

7.3.2.1. Influencia de la humedad natural en la resistencia al corte sin drenaje

Se extrajeron parámetros de resistencia de los estudios geotécnicos (Geocimentaciones, 1990 a, b; 1993) realizados en la zona sur de la cuenca de Xalapa; zona, como se comentó en el apartado 3.3, donde ha ocurrido el mayor número de deslizamientos y fallas de terreno. Estos parámetros de resistencia se relacionaron con sus respectivas humedades

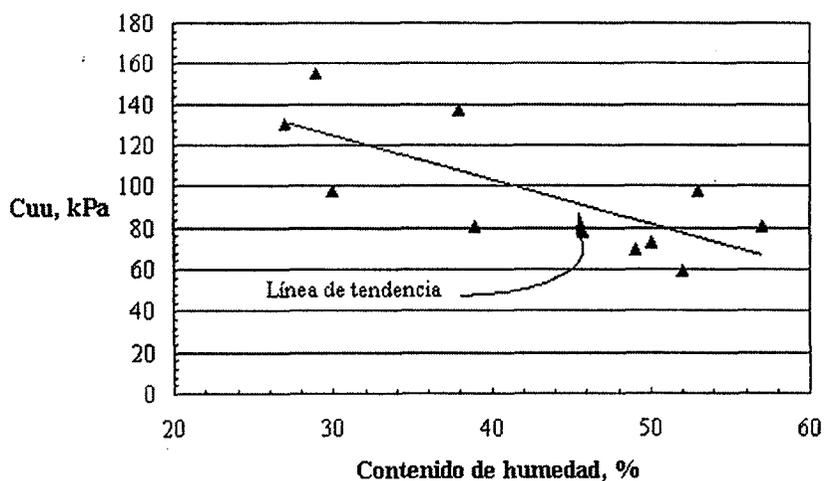


FIGURA 7.12. Tendencia de la resistencia al corte sin drenaje bajo influencia del contenido de humedad natural

para observar su tendencia. En la figura 7.12, se muestra la resistencia al corte sin drenaje influenciada por el contenido de humedad natural de la arcilla, y puede apreciarse que al aumentar el contenido de humedad en la arcilla, la resistencia tiende a disminuir.

7.3.2.2. Ensayo UU en arcilla inalterada

En la figura 7.13a se grafican curvas tensión desviadora-deformación con diferentes presiones de cámara (σ_c). Como era de esperarse, el esfuerzo desviador crece en valor absoluto al crecer la presión de cámara, así como también el módulo tangente. Este módulo, según Marsland (1971), se ve afectado por el tipo de muestreo y el grado de fisuración que tenga la arcilla. Marsland observó, con las arcillas de Londres, que la extracción de este tipo de arcilla con tomamuestra tubular se obtenían valores menores del módulo, que en probetas provenientes de muestras en bloque (cúbicas). En este trabajo (como se comentó en el capítulo 4, apartado 4.2.1) se efectuó la obtención de muestras en bloque, mas sin embargo, como se verá más adelante, la influencia de las fisuras en la arcilla determina la

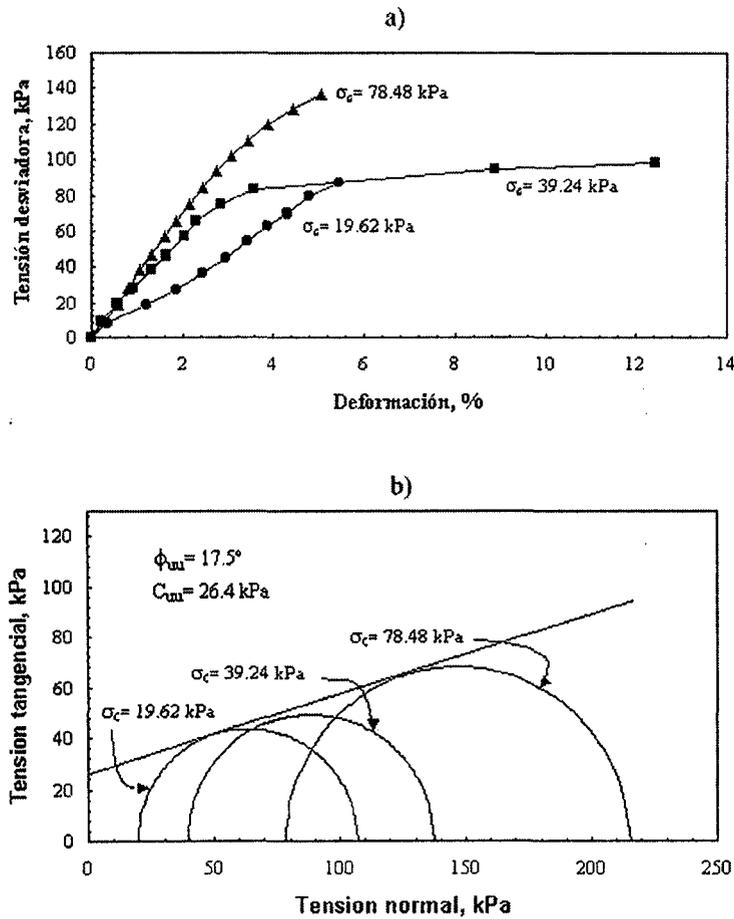


FIGURA 7.13. Ensayo de compresión triaxial UU en arcilla inalterada

respuesta tensión desviadora-deformación, sobre todo con bajas presiones de cámara. En la figura 7.13b puede observarse los círculos de Mohr para cada estado de tensiones. La envolvente de falla no es horizontal como en el caso de los suelos saturados, en donde las tensiones efectivas se mantienen constantes, aunque se incrementen o disminuyan las presiones de cámara. Ahora bien, al aliviar las muestras de suelo de las presiones geostáticas que soportaban *in situ*, ese alivio de presiones permitió que el aire del medio penetrara en las fisuras del suelo y en los poros desocupados de agua, llevando con ello la presencia del aire en las probetas de ensayo. En general, los suelos parcialmente saturados su envolvente de falla no es rectilínea a bajos niveles de presiones de cámara, hasta que bajo la influencia de altas presiones de cámara se comprime totalmente el aire y pasa a disolverse con el agua, hasta que las tensiones efectivas del suelo llegan a ser grandes, es cuando el ángulo de la envolvente (ϕ_{uu}) adquiere el valor de cero. Dado que los diámetros de los círculos no son constantes por la razón expuesta antes, se consideró el criterio propuesto por Jiménez Salas y De Justo (1975) para graficar la envolvente de falla y así definir los parámetros de resistencia no drenados.

Para nuestra arcilla, que se encuentra muy fisurada y que está fuertemente preconsolidada, influye en la envolvente de falla el aire presente que se encuentra entre las fisuras y en los poros desocupados de agua, y al aumentar las presiones de cámara en las probetas de ensayo, éste se comprime y crecen las tensiones efectivas con el incremento de la presión de cámara. Bajo estas condiciones de ensayo y de acuerdo a las características del suelo en estudio, los parámetros de resistencia no drenados son: $C_{uu} = 26.4$ kPa y $\phi_{uu} = 17.5^\circ$, en tensiones totales.

7.3.2.3. *Ensayo UU en arcilla compactada por impactos*

Las curvas de rotura de la arcilla compactada por impactos (condiciones Proctor normal) de tres probetas preparadas con la densidad máxima y la humedad óptima, se muestran en la figura 7.14a. La arcilla, bajo estas condiciones de compactación, presenta un comportamiento plástico y se consideró el valor de rotura al valor de la tensión desviadora cuando las probetas alcanzaban una deformación del 20 %. En la figura 7.14b muestran los círculos de Mohr y la envolvente de falla. La envolvente le corresponde un ángulo de inclinación $\phi_{uu} = 10^\circ$ y la cohesión $C_{uu} = 33.1$ kPa.

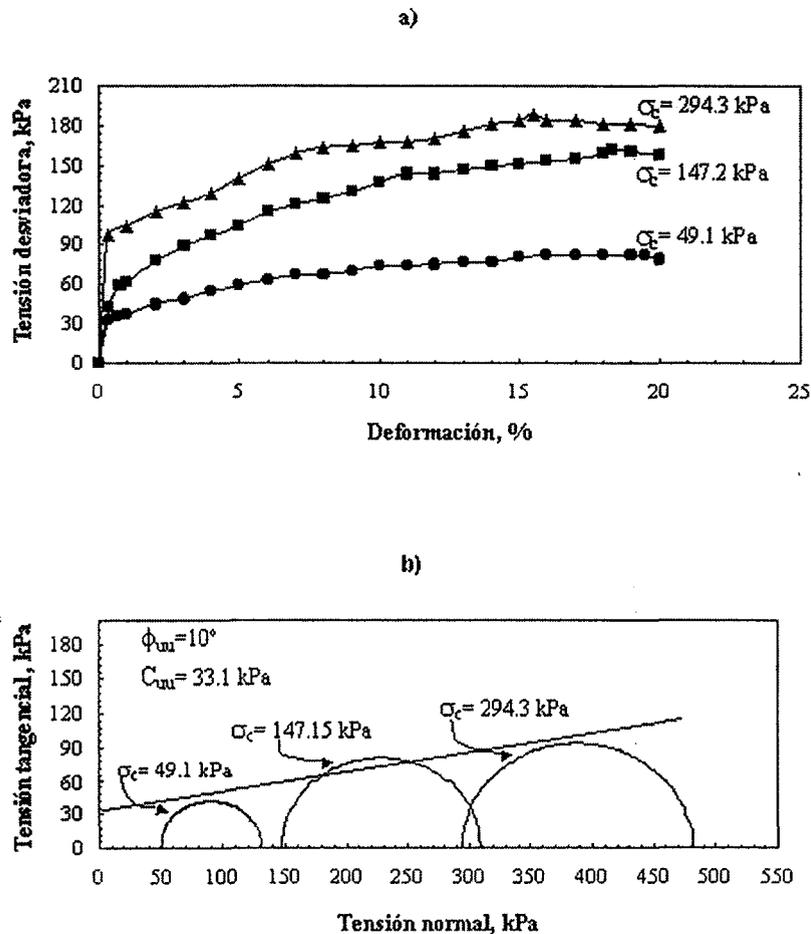


FIGURA 7.14. Ensayo de compresión triaxial UU en arcilla compactada por impactos

7.3.2.4. Ensayo UU en arcilla compactada por amasado

Se prepararon tres probetas con la humedad óptima y la densidad máxima en el aparato Harvard miniatura (con misma energía de compactación que las probetas descritas en el apartado anterior) y se sometieron a compresión isotrópica con tres diferentes presiones de cámara. Las curvas de rotura se incluyen en la figura 7.15a y como se puede observar, estas probetas alcanzaron su rotura antes de desarrollar el 20% de deformación. Como en el caso de la arcilla compactada por impactos, al incrementar las presiones de cámara sobre las probetas su rigidez aumenta y por tanto la tensión desviadora. La característica tensión desviadora-deformación de las probetas es de tipo plástico. Los círculos de Mohr se dibujan en la figura 7.15b y los parámetros de resistencia en condiciones no drenadas es $\phi_{uu} = 18^\circ$ y $C_{uu} = 9.87$ kPa.

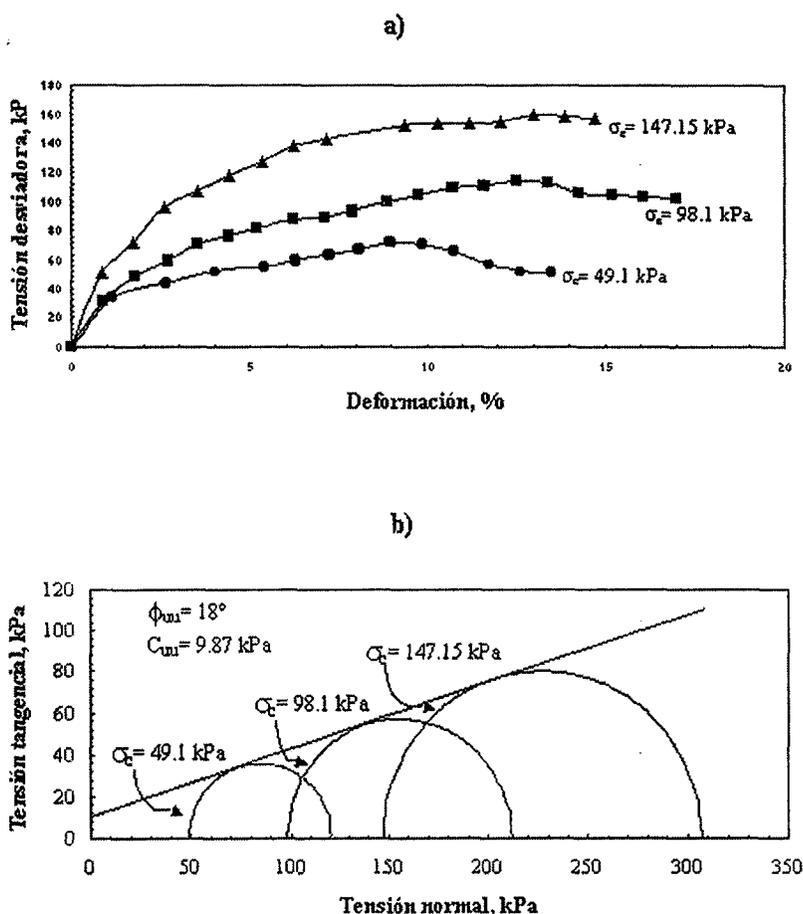


FIGURA 7.15. Ensayo de compresión triaxial UU en arcilla compactada por amasado

7.3.2.5. Influencia de las fisuras en la rigidez de la arcilla en estado natural

Se ha observado como influye la presencia de fisuras en el suelo en estado natural (ver microfotografías del capítulo 6) en el comportamiento tensión desviadora-deformación. Para tal análisis se ha extraído, de los estudios revisados, un par de curvas de rotura de probetas que tienen semejantes propiedades índice y se sometieron a la misma presión de cámara. Cabe aclarar, que las curvas de rotura son de probetas de arcilla provenientes de muestras en bloque, extraídas de calicatas próximas (realizadas en la misma fecha) y de muestras labradas a la misma profundidad (presiones geoestáticas iguales) y por tanto de la misma porción del depósito de cenizas volcánicas que aquí se estudian. En la figura 7.16 se muestran las curvas comentadas y la probeta 2 alcanzan la rotura antes del 6% de deformación. Las características de comportamiento tensión-deformación no es de tipo plástico, es decir, las probetas fallan súbitamente: falla frágil. Considerando la influencia de la estructura del suelo, además de las fisuras, Seed y Chan (1959) hicieron la observación que

la influencia de la estructura del suelo en la resistencia no drenada, depende del criterio de deformación adoptado. En efecto, si consideramos que la falla del suelo ocurre al 0.5 % de deformación, podemos observar en la figura 7.16 que la estructura del suelo y las microfisuras no influyen en el comportamiento tensión-deformación, pues los módulos tangentes de ambas probetas son prácticamente iguales; pero si adoptamos el criterio de rotura al 6%, encontramos que el comportamiento tensión-deformación y los módulos secantes de las dos probetas son diferentes (dibujados en líneas discontinuas del origen al valor de máxima tensión de rotura) y entonces podemos afirmar que la estructura del suelo y las fisuras sí influyen en el comportamiento tensión-deformación y en el módulo de Young. Los módulos secantes han sido trazados a partir de las recomendaciones que Lambe (1979) da.

Obsérvese la microfotografía de la figura 7.17, obtenida en microscopio electrónico de barrido a baja presión de vacío, en la que se puede ver claramente como las fisuras de la arcilla, en estado natural, no guardan una orientación determinada, es decir, la orientación de las fisuras es aleatoria.

Las fisuras en el suelo, pueden representar posibles superficies de deslizamientos cuando a éste se le somete a estados de tensiones. Por lo anterior, las probetas ensayadas en esta-

Características de la muestra				Propiedades índice de la arcilla inalterada				
Probeta	Prof. de la muestra mts	Tipo de muestreo	P _o kPa	ω -	e _o -	S _r %	I _L -	ρ _d gr/cm ³
1	1.75-1.8	En bloque	312	50	1.4	94.3	0.24	1.06
2	1.75-1.8	En bloque	300	49	1.37	94.4	0.27	1.02

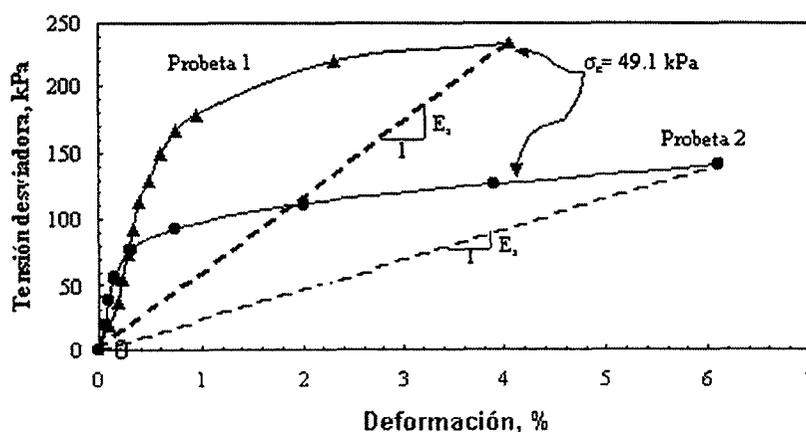


FIGURA 7.16. Influencia de las fisuras en la rigidez de la arcilla inalterada en ensayo UU

do natural no presentan planos de falla a 45° con respecto a la horizontal cuando se someten a tensiones, sino los planos de falla están condicionados por las fisuras. En la misma figura 7.16 se incluye una tabla que presenta las propiedades índice de las probetas 1 y 2, y las condiciones geostáticas (P_o) que éstas guardaban in situ; también se incluyen los contenidos de humedad (ω), el índice de huecos (e_o), el grado de saturación (S_r), índice de fluidez (I_L) y la densidad seca de la arcilla en estado inalterado.

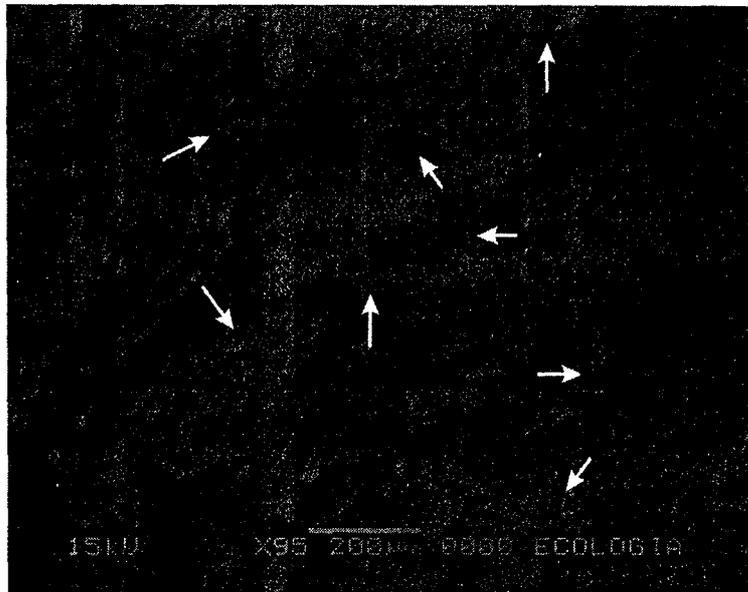


FIGURA 7.17. Microfotografía en la que se indica las fisuras en arcilla inalterada

7.3.2.6. Comportamiento tensión-deformación en arcilla en estado inalterado y compactado

Se han analizado curvas de rotura de la arcilla inalterada y la misma arcilla compactada por impactos y por amasado, con su densidad máxima y humedad óptima (ver tabla 7.2), para observar como influye la fábrica del suelo en el comportamiento tensión-deformación en ensayo UU. La probeta 1 (suelo inalterado) de la figura 7.18, presenta mayor rigidez que las probetas compactadas, ya sea en su modalidad por impacto (probeta 2) o por amasado (probeta 3), esta última condición de la arcilla compactada presenta mayor rigidez que la probeta compactada por impactos. Ambas condiciones de compactación, muestran una respuesta plástica y la probeta de arcilla inalterada frágil, tan sólo alcanza un 2% de deformación en tensión a la rotura, mientras la arcilla compactada por amasado alcanza la falla a un 9% y la arcilla compactada por impactos, alcanza la tensión a la rotura en un 19% de deformación.

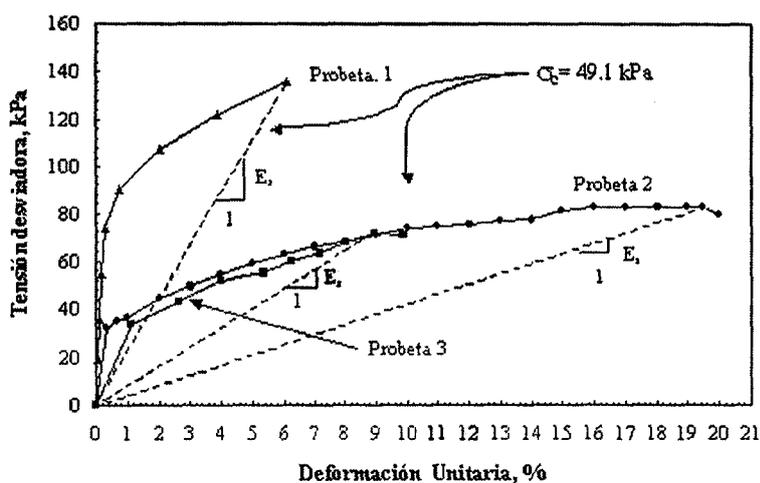


FIGURA 7.18. Comportamiento tensión-deformación de arcilla inalterada y compactada en ensayo UU

La rigidez de la arcilla inalterada lo explica la microestructura que caracteriza a estos suelos de origen volcánico, en que los enlaces lámina a lámina de los minerales de arcilla, por lo regular se encuentran conectadas cara-cara. Si observamos la microfotografía de la figura 7.19a, puede distinguirse la microfábrica oolítica, típica de estas cenizas volcánicas y de depósitos continentales. Además, el pH determinado en este estudio es de 6.6, resulta menor que en suelos con un pH de 8.2. Los suelos con un pH menor que el de 8.2 predominan las uniones cara-cara de sus láminas, el caso contrario (suelos con un $\text{pH} > 8.2$) predominan un acomodo espacial de lámina de arcilla borde-cara, para formar una estructura floculada. Las cenizas volcánicas se depositaron en un ambiente seco y a temperaturas alta y por tanto los contactos entre las láminas se encuentran soldadas.

Si observamos con detenimiento la microfotografía de la figura 7.19a, podemos ver como se acomodan las láminas de la matriz arcillosa y los agregados: cara-cara. En la microfotografía de la figura 7.19b se muestra la microfábrica de la arcilla compactada por impactos; puede apreciarse como el esfuerzo de compactación, aplicado por los impactos del pisón, no pudo romper los agregados o nódulos (láminas apiladas cara-cara) que se formaron en estado natural y no guardan una orientación preferente, como tampoco un mismo tamaño, incluso, se observa una estructura mas abierta que en estado natural. En la figura 7.19c se incluye una microfotografía que ilustra la microfábrica de la arcilla compactada por amasado (probeta 3) y puede apreciarse que el método de compactación ha permitido una mayor orientación de las láminas de arcilla (paralelas al plano que se observa) y una estructura más cerrada que la arcilla compactada por impactos; la estructura de la arcilla,

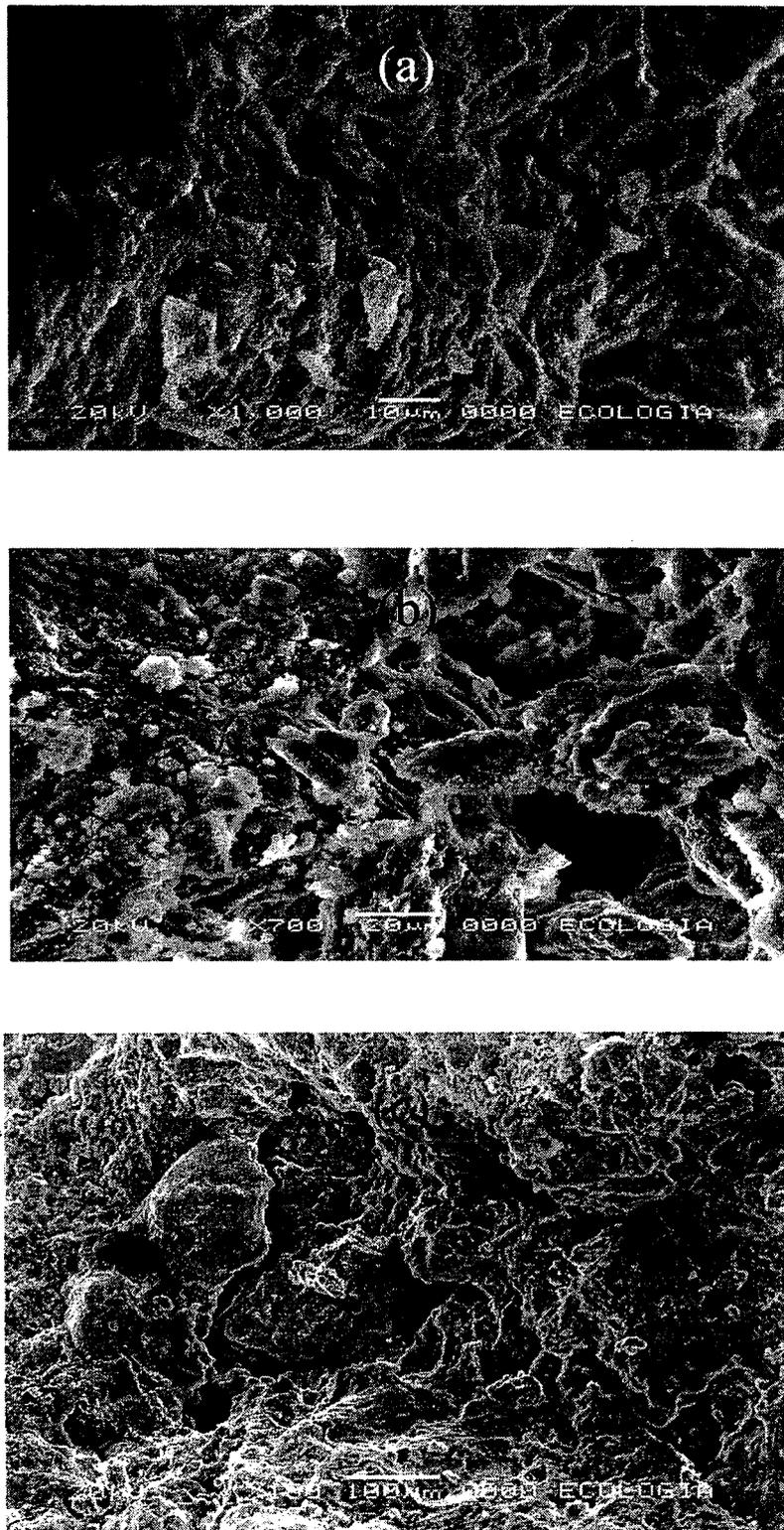


FIGURA 7.19. Arcilla en estado: a). inalterado, b). compactado por impactos y c). Compactado por amasado

bajo estas condiciones de compactado, presenta una estructura tendiente a la dispersa. En ambos casos de compactación, los agregados naturales de la arcilla volcánica no llegan a disgregarse. Lo anterior confirma lo que Mitchell (1993) comenta sobre la fábrica de un suelo compactado: la fábrica antes de la compactación, depende la resistencia de las “unidades (agregados) de la fábrica preexistente”.

7.3.3. Ensayo consolidado-no drenado en arcilla compactada por impactos

Se compactaron tres probetas con la humedad óptima y densidad máxima en condiciones Proctor normal (ver tabla 7.2) para aplicarles un ensayo de compresión triaxial consolidado-no drenado (CU) y determinar sus parámetros de resistencia bajo estas condiciones de ensayo. Las probetas se sometieron a una presión de cámara 882.9, 735.75 y 637.65 kPa y una presión de cola de 588.6 kPa respectivamente. En una primera etapa de ensayo se consolidaron las probetas y después, se cerró la válvula de drenaje de la cámara triaxial, para luego llevar a la falla las probetas, en esta última etapa se midió la presión intersticial en todo momento. Las curvas de rotura se muestran en la figura 7.20a señaladas con sus respectivas presiones laterales efectivas de cámara (σ'_c), dichas curvas representan una respuesta plástica del suelo. Ninguna probeta presentó presiones intersticiales negativas ante la aplicación de las tensiones desviadoras, como puede observarse en la figura 7.20b. Para una deformación del 2%, las probetas adquieren su máxima presión intersticial y tiende a establecerse hasta la rotura; como puede apreciarse en la misma figura, la arcilla tiene, bajo condiciones de volumen constante, una respuesta contráctil, pues el incremento en presión intersticial ($\Delta u > 0$) indica que al no permitirse la salida de agua en el sistema, la presión se va acumulando con el aumento de la tensión desviadora. En la figura 7.19c se muestra la variación del coeficiente A de Skempton (o coeficiente de presión de poro) con la deformación axial. Entre el 1% y 2% de deformación, las probetas con presión efectiva de cámara de 147.15 y 294.3 kPa alcanzan su máximo coeficiente de presión de poro. Considerando las presiones totales en rotura y restando las intersticiales en rotura respectivamente, se puede dibujar los círculos de Mohr en función de las presiones efectivas, dichos círculos se muestran en la figura 7.20d; en dicha figura se dibuja la envolvente en función de las presiones efectivas, cuya pendiente es de 35° y la ordenada al origen es 5.40kPa (0.055kp/cm²).

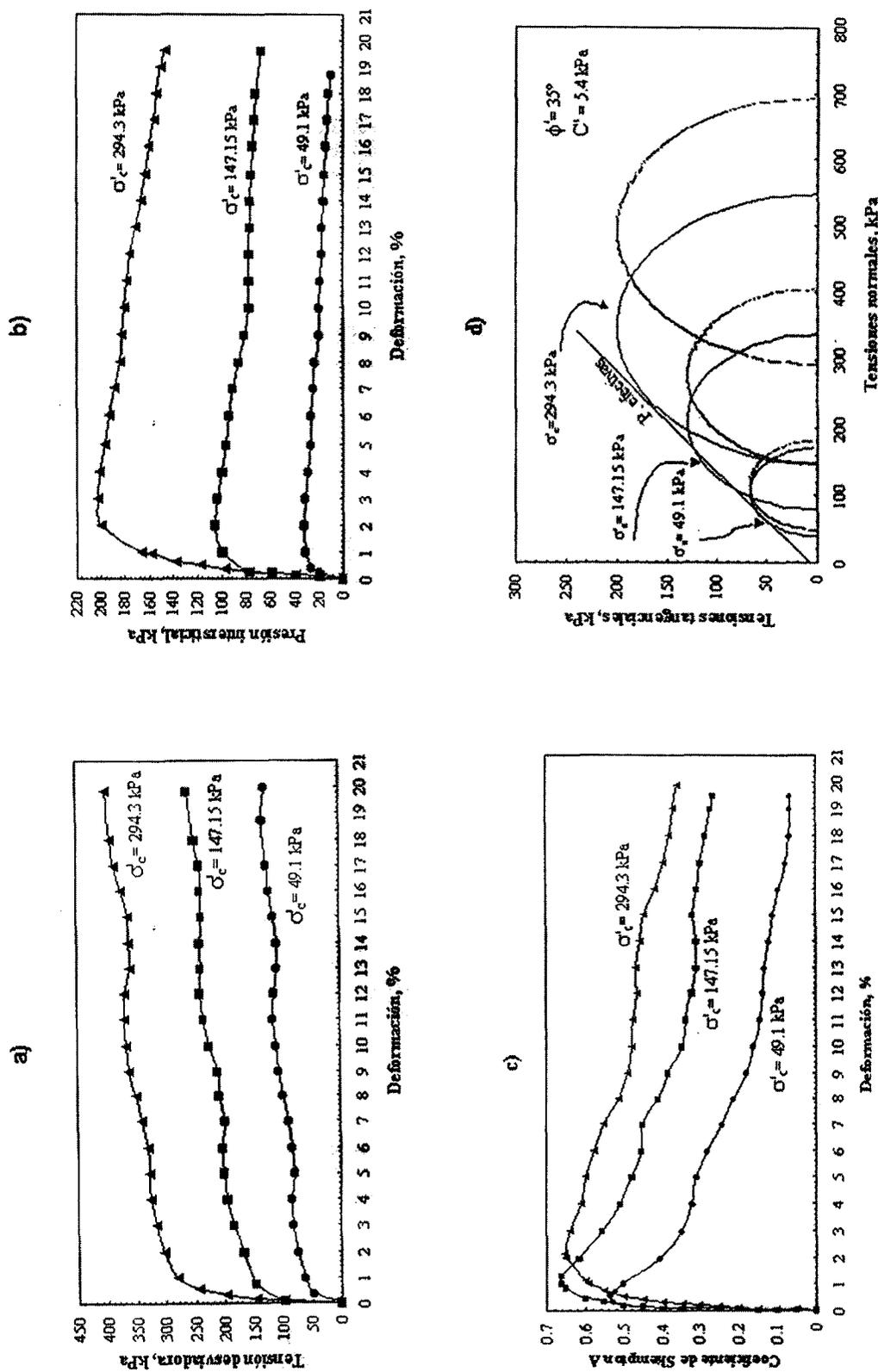


FIGURA 7.20. Ensayo de compresión triaxial CU en arcilla compactada por impactos

7.3.4. Ensayo consolidado-drenado en arcilla compactada por impactos

Bajo las mismas condiciones de compactación que en el apartado precedente (ver tabla 7.2), se prepararon tres **probetas para someterlas** a ensayo de compresión triaxial consolidado-drenado (CD), en la cual, **en primera** etapa del ensayo se consolidaron las probetas aplicándoles una contrapresión (o presión de cola) de 588.60 kPa y en una segunda etapa se llevaban a la falla en condiciones drenadas. En esta segunda etapa se midió la variación del volumen de los especímenes cuando éstos eran sometidos a la tensión desviadora. Las curvas de rotura, asociadas a sus respectivas presiones laterales efectivas de cámara (σ'_c), se muestran en la figura 7.21a y el tipo de rotura que describen es del tipo plástico. En la figura 7.21b puede apreciarse la variación de volumen de las probetas y bajo estas condiciones de ensayo se dibujan en la figura 7.21c los círculos de Mohr.

El ángulo de fricción interna en función de presiones efectivas es $\phi' = 30.87^\circ$ y la cohesión efectiva $C' = 22.55$ kPa. Llama la atención la probeta sometida a una presión $\sigma'_c = 49.1$ kPa, con una deformación de 6% (figura 7.21b) adquiere su máxima disminución de volumen y luego, con el incremento de la deformación axial, tiende a recuperara su volumen original, no ocurriendo lo mismo con las dos probetas restantes, que después de una deformación del 7% se mantiene constante el volumen de las probetas.

7.3.5. Permeabilidad en arcilla compactada por impactos

En una probeta compactada por impactos y con su humedad óptima y densidad máxima en condiciones Proctor normal (ver tabla 2), se procedió a determinarle la permeabilidad en la cámara triaxial. La probeta se sometió a una presión de cámara de 784.8 kPa y una contrapresión (presión de cola) de 588.6 kPa, para obtener una presión lateral efectiva de 196.2 kPa. La presión de entrada aplicada a la probeta fue de 735.75 kPa para tener una diferencia de presiones en probeta de 147.15 kPa, en flujo ascendente. El gradiente hidráulico aplicado fue de 20.1. Bajo estas condiciones de ensayo, el flujo de agua a través del medio poroso es de 0.00153 cm³/min y el coeficiente de permeabilidad estimado es: 11.4E-9 cm/min.

7.3.6. Consolidación bajo compresión isotropa

Se preparó una probeta bajo las mismas condiciones del apartado anterior, para consolidarla bajo presión de cámara de 882.9 kPa en la célula triaxial. La presión de cola apli-

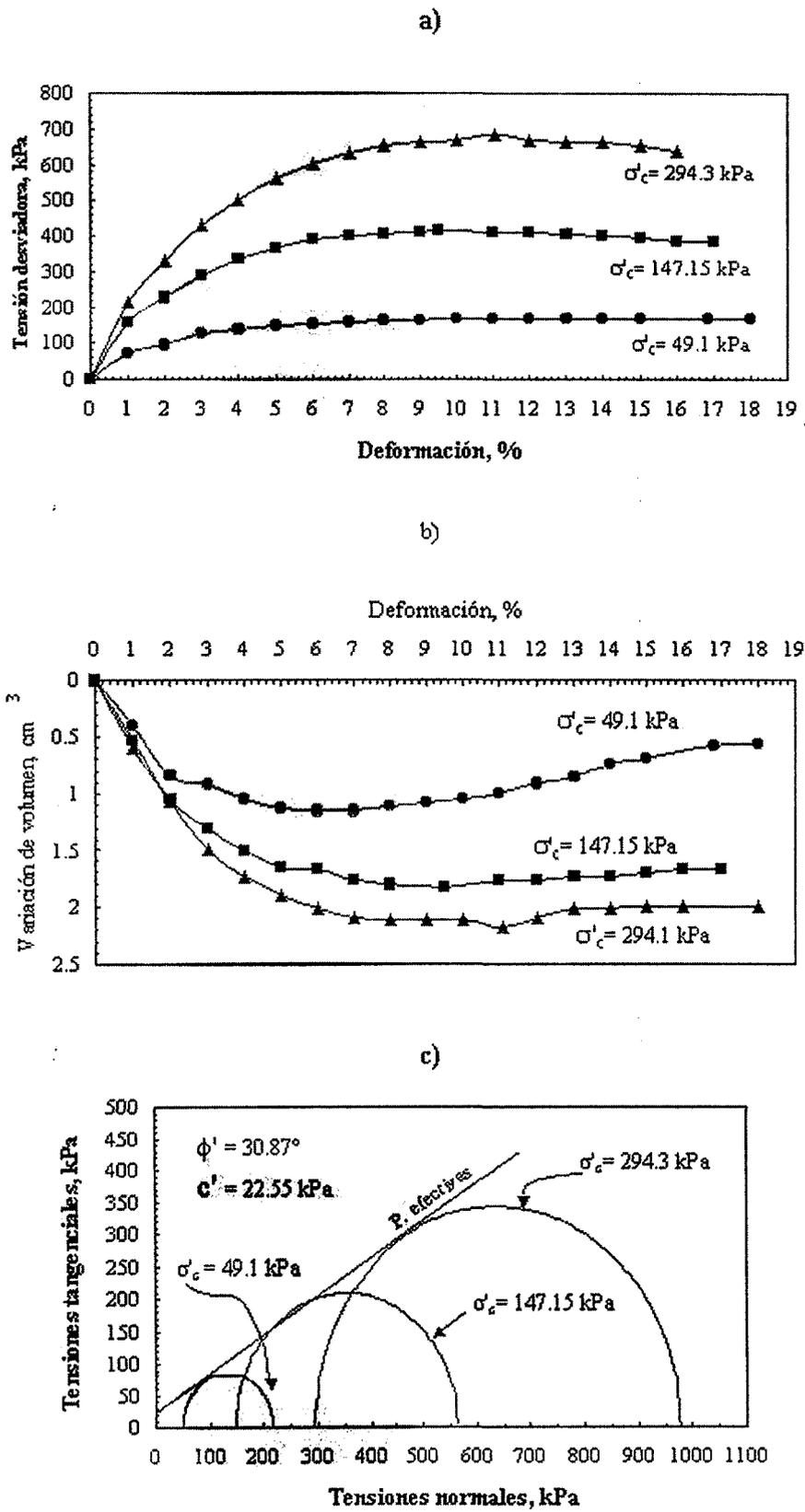


FIGURA 7.21. Ensayo de compresión triaxial CD en suelo compactado por impactos

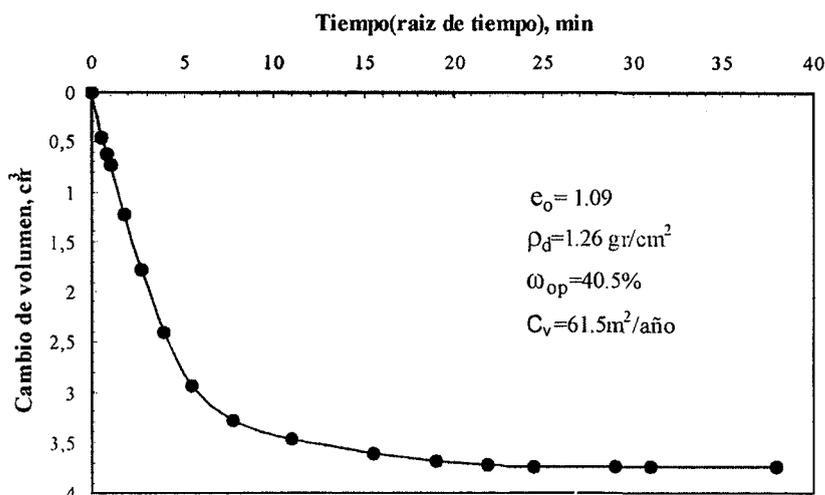


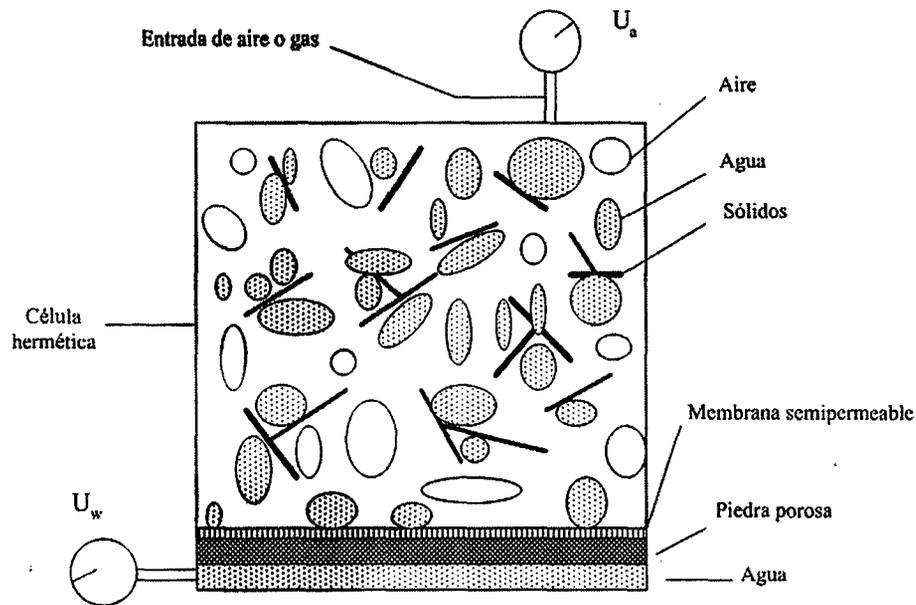
FIGURA 7.22. Consolidación isotrópica en arcilla compactada por impactos

cada a la probeta fue de 588.6 kPa. Bajo estas condiciones se midió el cambio de volumen de la probeta en el transcurso de tiempo. La curva característica de la variación de volumen con el tiempo se grafica en la figura 7.22. La condición de drenaje es por base de probeta y bajo las condiciones descritas anteriormente el coeficiente de consolidación C_v tiene un valor de 61.5 m²/año, para un tiempo de consolidación t_{100} de 38.9.

7.4. DEFORMABILIDAD

Se incluyen en este apartado a los ensayos realizados en edómetro convencional y con succión controlada, este último fue el desarrollado por Escario (1967), para determinar la expansión de los suelos de la localidad de Madrid. El edómetro de succión controlada tiene la ventaja que puede controlarse la presión de succión y la tensión vertical, que actúa sobre la muestra, ésta queda en contacto con una membrana² de alta resistencia a penetración de aire (Escario le denomina membrana semipermeable) que reposa sobre una piedra porosa (como las que se usan en los edómetros convencionales) que se satura y conecta con una vía de agua libre sometida a la presión atmosférica. Al introducir la presión de gas o aire (en la experimentación presente se utilizó nitrógeno) a la celda edométrica obligamos a que el agua de la muestra de suelo migre hacia la membrana semipermeable (en todo momento está en contacto con el suelo) y la piedra porosa. En la figura 7.23 se ilustra el funcio-

²Estas membranas, suelen ser sustituidas por discos porosos de cerámica de alto valor de entrada de aire (Frdelund & Rahardjo, 1993).



Nota: En la presente experimentación U_w es equivalente a la presión atmosférica

FIGURA 7.23. Dispositivo que representa la técnica de la traslación de ejes, para inducir succión en el suelo

namiento antes descrito. 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 de suelos arcillosos compactados. Al incrementar la presión de aire (U_a) en la celda edométrica, este penetra en los huecos del suelo obligando al agua libre a salir de la muestra de suelo incrementando la presión de agua (U_w), que siempre será positiva. A la diferencia de la presión de aire y agua ($U_a - U_w$) se denomina succión mátrica. Siempre la presión del aire es mayor que la del agua. En la misma figura 7.23 se representa la técnica de traslación de ejes.

Como se verá en el apartado 7.4.2, el edómetro de succión controlada es un instrumento que además de determinar el hinchamiento de un suelo (método muy representativo para reproducir las condiciones de suelos que se encuentran por arriba del nivel de aguas freáticas, como terraplenes, etc.) puede también determinarse el colapso de un suelo (Escario y Sáez, 1973).

En el edómetro de succión controlada se ensayaron cuatro probetas con condiciones diferentes, para observar como influye la fábrica del suelo en la deformabilidad del mismo. Por otro lado, se investigó el hinchamiento bajo dos modalidades: la primera en edómetro convencional y la segunda con el edómetro de succión controlada.

7.4.1. Deformabilidad determinada en edómetro convencional y de succión controlada

Para los fines de estudio, se vio la necesidad de observar como influye la succión en la deformabilidad de la arcilla, y para tal efecto se comparó un par de curvas edométricas, reportadas por los estudios revisados (Geociencias 1990a, b) con la curva edométrica determinada en este estudio en arcilla natural, con el edómetro con succión constante de 539.5 kPa y variación de la tensión vertical. Las curvas edométricas, extraídas de los estudios geotécnicos revisados se realizaron en edómetro convencional.

Puede observarse en la figura 7.24 dos aspectos, a saber: primero, las curvas edométricas reportadas por los estudios revisados, a pesar de tener igualdad de condiciones geostáticas y propiedades índice similares, se ve influenciada la compresibilidad de estas probetas (M-1 y M-2) por las fisuras, de hecho los módulos edométricos (E_m) y el índice de compresibilidad (C_c) se ven afectados por el estado que presenta la arcilla en estado natural y un segundo aspecto que se observa, es como la succión influye en la compresibilidad de la arcilla. La probeta M-td, que se sometió a una presión de succión 539.55, presenta mayor rigidez que las probetas M-1 y M-2, cuya succión es nula. Dicho en otras palabras, al aumentar la succión en la arcilla disminuyó su compresibilidad y aumentaron las tensiones capilares provocadas por la presión de succión (U_a), este aumento en las tensiones capilares rigidizó la estructura del suelo y lo hizo menos compresible.

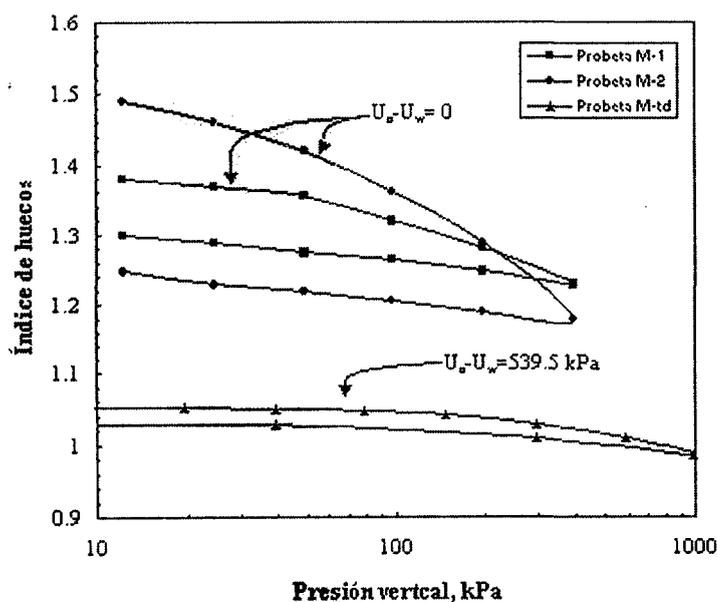


FIGURA 7.24. Influencia de la succión en la rigidez de la arcilla

Obsérvese en la misma figura 7.24, como es mínima la variación volumétrica en la probeta sometida a succión (probeta M-td), a pesar de que se sometió a una tensión vertical de 980.60 kPa y las probetas que no se sometieron a una presión de succión, y tan sólo se sometieron a una tensión vertical de 392.4 kPa, presentan mayor variación volumétrica Δe .

Sobre la base de la información revisada y a la obtenida en este estudio se formuló la tabla 7.3, para comparar las propiedades índice y ver de manera cuantitativa como influye la succión en la deformabilidad de la arcilla. Volviendo a la misma tabla 7.3, puede apreciarse como varía el índice de huecos (e_o y e_f) y el módulo edométrico (E_m), así como también el índice de compresibilidad (C_c) de cada probeta de la figura 7.24, en la cual puede distinguirse que la rama de compresión noval de la probeta M-td es casi horizontal, representando mayor rigidez que las otras curvas.

TABLA 7.3. Comparación de parámetros de compresibilidad en ensayo edométrico convencional y con succión controlada

Probeta	Succión Aplicada kPa	W %	ρ gr/cm ³	e_o^* -	e_f -	I_L -	E_m kPa	C_c -
M-1	0.0	48.0	1.14	1.38	1.29	0.1	3 666.7	0.13
M-2	0.0	50.0	1.13	1.49	1.25	0.26	1 692.3	0.23
M-td	539.5	48.7	1.2	1.05	1.03	0.12	14 695.0	0.073

*El índice de huecos está extraído del ensayo y no corresponde al valor *in situ*.

En adición de lo dicho anteriormente, se investigó la susceptibilidad (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, 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 y con agregados 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 estu-

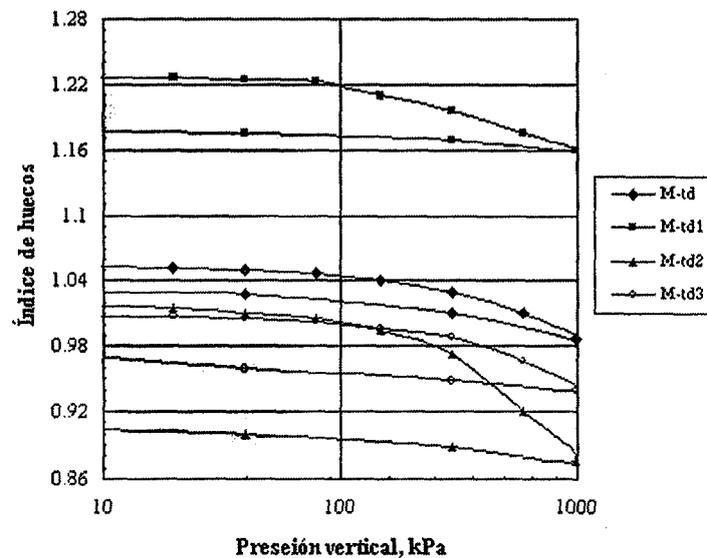


FIGURA 7.25. Influencia de la fábrica en la deformabilidad de la arcilla, bajo succión constante

dia, los índices de fluidez son menores que la unidad (ver tabla 7.3), valores próximos a cero.

Se ensayaron cuatro **probetas** para montarse en la célula edométrica, 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 desgregar; creada por la compactación por impactos.

Puede apreciarse en la figura 7.25 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 volumétrica³ ante la aplicación de las tensiones verticales, 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-td3).

³Entiéndase a la variación volumétrica, a la diferencia del índice de huecos e_0 , para el primer incremento de tensión vertical y e_1 , que corresponde a una tensión vertical máxima aplicada a la probeta.

Si analizamos los parámetros de compresibilidad presentados la tabla 7.4, estimados a partir de los ensayos realizados en la celda edométrica con succión constante, podemos ver que las probetas de arcilla inalterada M-td y compactada por carga estática M-td1, con igual contenido de humedad que en condiciones naturales, son prácticamente igual de rígidas, no ocurriendo lo mismo con la probeta formada por arcilla compactada por impactos M-td2, que manifestó mayor variación volumétrica. Si tenemos presente que el módulo edométrico (E_m) está en función directa del nivel de tensiones verticales y es inversamente proporcional a las deformaciones verticales, entonces, la probeta M-td2 presentó mayor deformabilidad volumétrica, dada que su fábrica presenta una red porosa más abierta.

TABLA 7.4. Deformabilidad volumétrica bajo influencia de la fábrica en ensayo con celda edométrica bajo succión constante

Probeta	Condiciones de la probeta	W %	ρ gr/cm ³	e_0 -	e_{min} -	Δe -	I_L -	E_m kPa	C_c -
M-td	Inalterada	43.5	1.21	1.05	0.987	0.065	0.12	30,142.7	0.073
M-td1	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-td2	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-td3	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

7.4.2. Hinchamiento

Los ensayos de hinchamiento libre y presión de hinchamiento se llevaron a cabo en edómetro convencional, y en celda edométrica, en el primero se inundaron las probetas y en la segunda las muestras no se inundaron. Para los ensayos en edómetro convencional, se prepararon cuatro muestras, dos de las cuales se hidrataron por un período de ocho días, con la densidad y la humedad óptima del ensayo Proctor normal, para determinarles su presión de hinchamiento e hinchamiento libre, y las dos restantes, no se hidrataron y se les aplicó los mismos ensayos, estas dos últimas probetas se prepararon, también, con las condiciones de humedad y densidad del ensayo Proctor normal. También se labraron dos probetas de arcilla en estado inalterado, para montarlas en edómetro con dos diferentes ten-

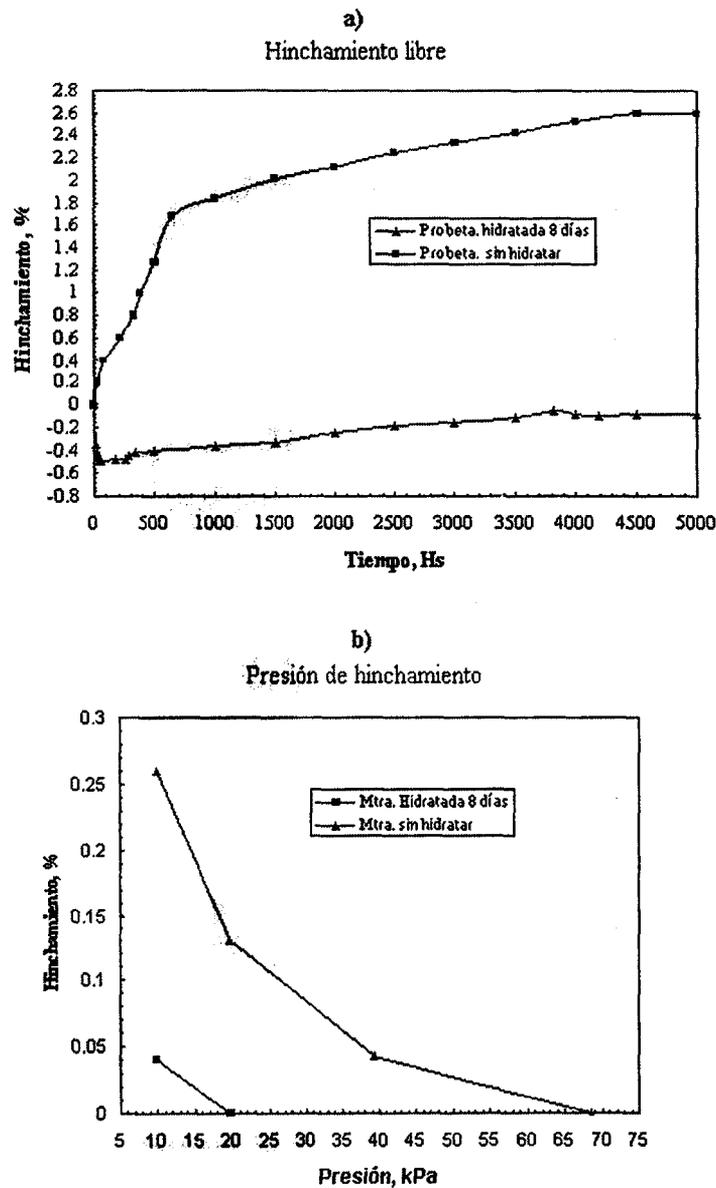


FIGURA 7.26. a) Hinchamiento libre y b) Presión de hinchamiento

siones verticales (98.1 y 196.2 kPa) y variación de la presión de succión, hasta alcanzar una presión de succión nula, en **donde el suelo** alcanzaría el máximo hinchamiento y dejaría de absorber agua.

De acuerdo en la composición mineralógica que se identificó de la arcilla volcánica en el capítulo 5, cuyos componentes de minerales de arcilla son la halloysita y la alofana, era de esperarse que la arcilla **en estudio** manifestara porcentajes de hinchamiento mucho menores que las arcillas de composición esmectítica, como las arcillas rosas de la Cuenca del Tajo (De Santiago, 2000) o las famosas arcillas azules del Guadalquivir (Tsige, 1999).

Los resultados obtenidos en los ensayos de hinchamiento libre se presentan en la figura 7.26a, en la cual puede apreciarse que la probeta que no se hidrató alcanzó un 2.6% de hinchamiento. La probeta hidratada **no** presentó hinchamiento, sino asentamiento (valores negativos del eje de las ordenadas) y con el paso del tiempo tuvo un ligero hinchamiento, pero nunca recuperó su altura inicial. En la figura 7.26b se grafican las curvas que representan los ensayos de presión de hinchamiento. La probeta que se hidrató tuvo una presión de hinchamiento de 20 kPa y el valor de hinchamiento para la probeta que no se hidrató es de 68 kPa. La muestra **no hidratada** manifestó un 235% de presión hinchamiento mayor que la probeta hidratada. En la tabla 7.5 se comparan los resultados de estos ensayos con suelos españoles que se tienen identificados como suelos expansivos, así como también se asocia la mineralogía de cada suelo. De la tabla 7.5 se puede colegir que la arcilla volcánica no es expansiva, comparada a las arcillas españolas que están compuestas por minerales activos y son más expansivas.

TABLA 7.5. Hinchamiento de la arcilla volcánica y de algunos suelos españoles

Suelo	Composición mineralógica	Ensayo en edómetro convencional		Ensayo de Hinchamiento en la célula edométrica	
		Hinchamiento libre, %	Presión de hinchamiento, kPa	A presión vertical de 98.1 kPa, %	A presión vertical de 196.2 kPa, %
Arcilla volcánica	Halloysita	2.60	68.0	0.81	0.30
Arcilla de Madrid	Mica, caolinita y esmectita	4 a 12	-	3.2	-
Arcilla de la Cuenca del Tajo	Esmectita magnésica y un poco de mica	4.7 a 9.1	137.3 a 215.8	-	-
Arcillas azules del Guadalquivir	Esmectitas, illita y muy poca caolinita	3.2 a 5.30	372.8 a 520.0	-	-

En la figura 7.27 se vierten los resultados obtenidos en célula edométrica y se advierte que la arcilla volcánica **no** manifiesta colapso como la arcilla gris o también llamada peñuela de Madrid reportada por Escario y Sáez (1973), que con la disminución de la succión, primero hincha y a la presión de succión de 49.1 kPa la arcilla gris colapsa.

Este comportamiento es debido a la fábrica abierta de poros grandes que quizás cuenta la arcilla gris, que al incrementarse las presiones intersticiales disminuyen las tensiones efectivas y se produce el **colapso**, y, comparada con la arcilla volcánica que su estructura es cerrada, no presenta colapso.

En definitiva, la composición mineralógica influye en la actividad expansiva de un suelo.

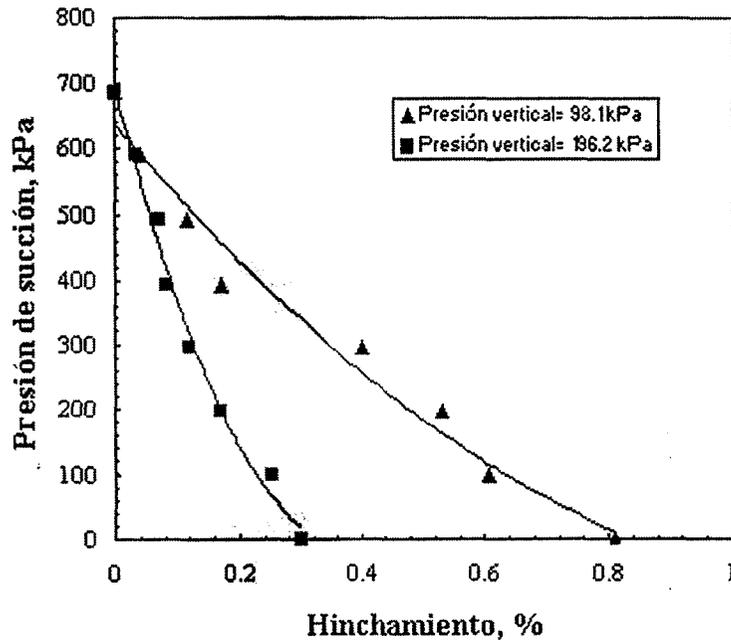


FIGURA 7.27. Ensayo de hinchamiento en célula edométrica

7.5. SUCCIÓN

Como se ha observado en el apartado anterior, la succión matricial tiene una fuerte influencia en la deformabilidad de la arcilla. Está fuera del alcance de este estudio investigar la componente osmótica, que influye parcialmente en el potencial capilar (Jiménez Salas, 1990) cuando cambia las condiciones del soluto. Como el medio en que se encuentra la arcilla volcánica no se tiene evidencias de que el medio influya en el cambio de las condiciones del soluto, nos avocamos en este apartado a investigar la succión matricial de la arcilla. Para tal objetivo, se presentan los resultados obtenidos, en la determinación de la succión inicial, en células de presión (ver figura 7.23) en arcilla inaltera y después se investiga el comportamiento succión-humedad (curvas características) en estado compacto y natural de la arcilla, para observar como influye la fábrica y el grado de saturación en dicho comportamiento.

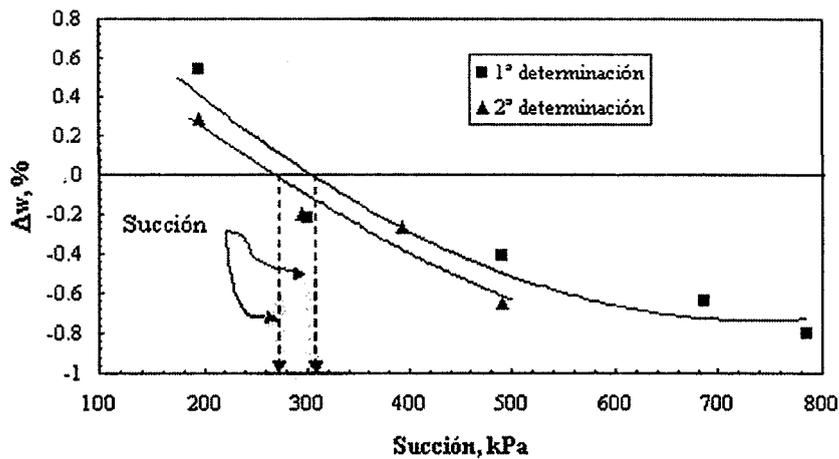


FIGURA 7.28. Succión inicial de la arcilla

7.5.1. Succión inicial

Se determinó la succión inicial en las celdas de presión por el método rápido, que consiste en colocar cuatro probetas de suelo en igualdad de condiciones, en este caso con densidad y humedad natural y se les aplicó diferentes presiones de succión para observar su comportamiento en cuanto a pérdida o ganancia de humedad. Las probetas sometidas a una presión de célula por debajo de la succión del suelo (succión inicial) ganarían humedad y las celdas de presión que tuvieran presiones por arriba de la succión del suelo, las muestras perderían humedad. Bajo esta circunstancia descrita anteriormente, se graficaron los valores de la humedad de equilibrio con sus correspondientes valores de presión de succión y se unieron para formar la curva inscrita en la figura 7.28. Los valores positivos del eje de las ordenadas representan las presiones de célula que están por debajo del valor de la succión, es decir el suelo absorbe agua y los valores negativos del mismo eje, es el fenómeno contrario. En este ensayo se realizaron dos determinaciones, para tener curvas comparativas e identificar la succión del suelo. La succión inicial varía de 265 a 303 kPa.

7.5.2. Curvas características succión humedad

Se realizaron ensayos en el aparato de membrana de presión (o célula de presión) para establecer correlaciones con la succión y la humedad, en arcilla inalterada y compactada con carga estática con la densidad y humedad de las condiciones del ensayo Proctor normal. En la figura 7.29 se grafican los resultados y puede apreciarse que las curvas carac-

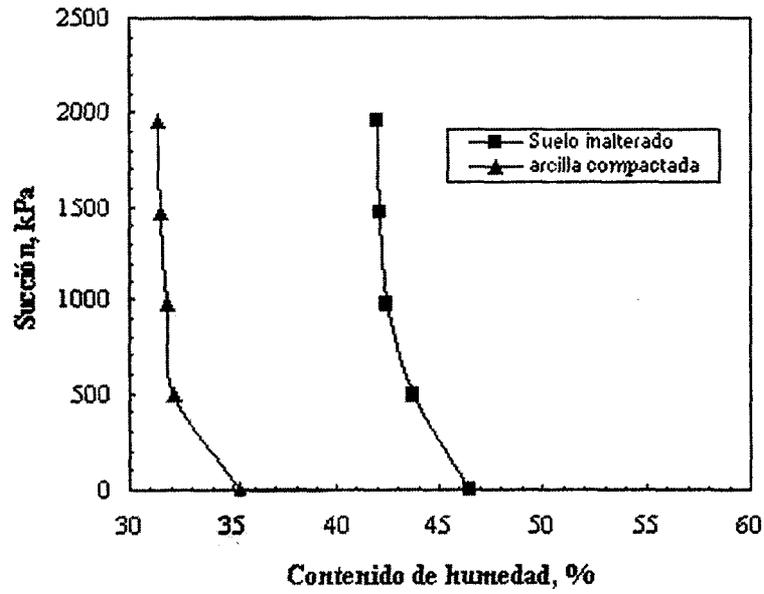


FIGURA 7.29. Curvas característica succión-humedad

terísticas succión-humedad son casi verticales, indicando esta circunstancia la capacidad de retención que tiene la arcilla, tanto en estado inalterado y compactado, a pesar de tener esta última condición de la arcilla una fábrica más abierta, es decir floculada. Aquí influye en la retención del agua la superficie específica de las partículas de la arcilla, amén de considerar las fuerzas eléctricas que crecen con la superficie específica.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1. CONCLUSIONES

Basándose en lo expuesto en los capítulos precedentes, puede extraerse las siguientes conclusiones.

- Según la clasificación de Fisher (1961), la arcilla volcánica de Xalapa corresponde a una roca piroclástica, cuyas partículas son lanzadas al exterior del edificio volcánico de manera **separada**. El autor aludido, denomina a estos materiales cenizas (ver tabla 1.1). Considerando la evidencia presentada en las microfotografías obtenidas con microscopio electrónico de barrido de la figura 6.9, donde puede observarse que el suelo está en procesos de meteorización, puede considerarse, bajo estas condiciones, que la arcilla volcánica entra en la denominación de roca epiclástica.
- Con relación a la definición de suelo tropical propuesta por Vargas (1985), a las condiciones climáticas de la región y a la meteorización que exhiben las arcillas volcánicas de la cuenca de Xalapa, estas arcillas pueden circunscribirse dentro de los suelos tropicales.
- De toda la literatura técnica revisada sobre suelos tropicales (estado del conocimiento), son tres los factores más sobresalientes que aluden los investigadores, esto es: 1) Fuerte **influencia** de la composición mineralógica del suelo en sus características y comportamiento, 2) La presencia de la halloysita, caolinita, alofana (en terrenos bien drenados) y montmorillonita (terreno mal drenados), como minerales que predominan en estos suelos tropicales y subecuatoriales y 3) Una fuerte **influencia de las condiciones de drenaje superficial** y las condiciones climáticas sobre este tipo de suelo en el proceso de meteorización.

- Existe diferencia entre la microestructura y fábrica, esta última, junto con las fuerzas interpartículas constituyen la microestructura de un suelo arcilloso.
- 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. El clima de la región lo condiciona la fisiografía y es del tipo semicálido-húmedo a cálido-húmedo.
- La estratigrafía del lugar está constituida por arcillas de color café rojizo, de consistencia en estado inalterado muy firme, por lo menos hasta la profundidad de prospección de 11.0 metros. Los ensayos de resistencia a la penetración estándar (SPT) realizados superficialmente varían de 20 a 40 golpes y a la profundidad entre 10.0 y 11.0 metros, la resistencia SPT es de 40 golpes (ver figura 4.3). A todo lo largo de la estratigrafía definida, el índice de fluidez oscila entre valores de 0.20 a 0.40, disminuyendo con la profundidad hasta un valor de 0.10. El número de golpes obtenidos en ensayos de resistencias SPT y los índices de fluidez reportados por los estudios revisados, son valores típicos que representan a suelos arcillosos de consistencia firme a muy firme. En la tabla 4.3 se muestran los valores máximos y mínimos de las propiedades índice y mecánicas de las arcillas volcánicas.
- 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 figura 5.1 y 5.2).
- El contenido de materia orgánica en la arcilla es prácticamente nulo y el contenido de carbonatos es completamente nulo, 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 (ver tabla 2.3).

- De acuerdo con Skempton (1953), la arcilla volcánica no es activa. Day (2000) indica que las arcillas con valor de actividad "A" menor que 0.75 se consideran inactivas. La actividad de la arcilla volcánica (determinación de los límites de consistencia sin previo secado al ensayo) es de 0.58. El valor antes citado es congruente con la superficie específica determinada en este estudio y que corresponde a 92.7 m²/gr. Si reconsideramos la figura 2.1, se observa que los valores más altos de superficie específica corresponden a la montmorillonita y los valores de actividad reportados por Jiménez Salas y De Justo (1975), en este tipo de mineral, varía entre 1.12 y 11.5, mineral con una actividad coloidal muy alta.
- El contenido de fracción arcillosa real del suelo estudiado es de 79 % (ver tabla 5.3 y figura 5.5), predominando las partículas de arcilla y en menor medida las partículas de limo.
- Basándose en lo anterior y en las características de plasticidad mostradas en la figura 5.6, la arcilla volcánica corresponde a una arcilla de alta plasticidad "CH".
- Los factores que mayor influyen, en los resultados para identificar las características reales de estos suelos volcánicos son: la presencia de agregados fuertemente apilados (soldados), que presentan dificultad para disgregarse en el ensayo de análisis granulométrico (ver figura 5.5) y por otro lado, la disminución del espacio basal de la halloysita hidratada, producida por el secado previo a los ensayos para determinar los límites de consistencia. 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.
- De acuerdo con las observaciones llevadas a cabo con el microscopio de electrónico de barrido (MEB), el nivel de fábrica que presentan la arcilla *en estado natural*, corresponde a una fábrica total anisótropa (ver figura 6.7). La misma arcilla meteorizada muestra igual fábrica anisótropa (ver figura 6.9). Basándose en la clasificación presentada en la tabla 2.4, **el tipo de microfábrica de la arcilla analizada es de tipo oolítica o nodular**. Los conectores se encuentran unidos por partículas dispuestas cara-cara (ver figura 6.7b).

- 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 (ver figura 6.10a). La arcilla *compactada por impactos* (Proctor normal) exhibe una fábrica isótropa. Las partículas se encuentran orientadas cara-cara en los agregados y éstos se encuentran dispuestos dentro de la matriz arcillosa al azar. (ver figura 6.11a). 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 método de compactación influye en el arreglo de las partículas. El método de compactación por amasado proporciona una mayor orientación a las partículas, que el de compactación por impactos. Lo anterior se puede corroborar en las microfotografías de las figuras 6.10 y 6.11 y en las curvas densidad máxima-humedad mostradas en la figura 7.3. El tratamiento de las muestras antes de ser compactadas, influye en los resultados de los ensayos de compactación (ver figura 7.4).
- A pesar de estar **sobreconsolidadas** las muestras empleadas en los ensayos de corte directo, la arcilla exhibió un comportamiento tensión-desplazamiento como el de una arena floja o un limo normalmente consolidado. También se observó que el grado de saturación influyó en los parámetros de resistencia.
- La diferencia de la forma del mineral de la halloysita (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.
- Se vio 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 7.8).
- La resistencia en condiciones no drenadas del ensayo de compresión triaxial (UU), disminuye con el incremento de la humedad (ver figura 7.12).
- De acuerdo a ensayos de compresión Triaxial UU, realizados con probetas compactadas por amasado (fábrica anisótropa) y compactadas por impactos (fábrica isótropa), el tipo de fábrica creada por cada método de compactación influye en la

resistencia no drenada (ver figura 7.14 y 7.15). La presencia de fisuras en la arcilla volcánica influye en la resistencia no drenada y en la rigidez de la misma (ver figura 7.16).

- Los valores de sobreconsolidación (OCR), de susceptibilidad y los índices de compresibilidad de la arcilla, corresponden a un suelo preconsolidado.
- Bajo succión constante, el tipo de fábrica (estado natural y compactado) influye en la deformabilidad de la arcilla volcánica (ver figura 7.25 y tabla 7.4).
- El tratamiento de las muestras, previo al ensayo de hinchamiento en edómetro convencional, influye en sus resultados (ver figura 7.26 y tabla 7.5).
- Basándose en ensayos realizados en célula edométrica, con tensión vertical constante, el suelo no presenta hinchamiento, ni tampoco es colapsable (ver figura 7.27).
- De acuerdo con las curvas características humedad-succión, la arcilla volcánica tiene una gran capacidad de retención del agua, ya sea en estado compactado o natural (ver figura 7.29).

8.2. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Considerando la revisión del estado del conocimiento y la experimentación llevada a cabo en este estudio, se recomienda lo siguiente:

- Realizar ensayos de corte directo en muestras inalteradas y muestras compactadas, con succión controlada y con diferentes presiones de succión, con el objeto de observar como influye la succión en la resistencia.
- Puesto que en este estudio no se pudo establecer los ciclos de histéresis succión-humedad, por las limitaciones que presentan los aparatos de membranas de presión (pérdidas sistemáticas de presión durante el ensayo), se recomienda realizar en futuras investigaciones, ensayos de este tipo con células de presión dotados con discos porosos de cerámica de alto valor de entrada de aire.

- Ir a campo, específicamente al lugar donde ocurren los eventos de deslizamientos de taludes en este tipo de depósitos volcánicos, y determinar la permeabilidad *in situ*, para considerar la influencia de las fisuras en la permeabilidad en la arcilla.
- Con el objeto de observar el comportamiento tensión-deformación de la arcilla volcánica *in situ*, realizar ensayos de placa.
- Realizar levantamientos topográficos de taludes fallados, para realizar análisis a posteriori (back analysis) e inferir los parámetros de resistencia que satisfagan la condición de equilibrio del talud (Abramson et al, 2002; González de vallejo *et al*, 2002).
- Llevar seguimiento de taludes que se encuentren en falla incipiente, instalando inclinómetros y controles topográficos.

BIBLIOGRAFÍA

- AITCHISON, G. D. (1967). *Discussion on soil fabric and deformation. Proc. of the Geotech. Conf. On Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks*, Oslo, Vol. II, 171-173.
- ARAÑA, V. Y ORTIZ, R. (1984). *Volcanología*. Madrid: Editorial Rueda.
- BARDEN, L. Y SIDES, G. (1971). **The influence of weathering on the microstructure of Keuper Marl.** *Q. J. Engng. Geol.* Vol. 3, 259-260.
- BATES, T. F. (1955). Electron microscopy as a method of identifying clays. *Proc. Of the 1st National Conf. On Clays and Clay Technology*. 130-148.
- BATTEY, M. H. Y PRING, A. (1997). *Mineralogy for students*. Hong. Kong: Longman
- 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, *Géotechnique* 21, No. 4, 273-328.
- BLIGHT, G. E. (1990). Keynote paper: Construction in tropical soils. *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Geomech. in Tropical Soils*. Singapur, Vol. 2, 449-465.
- BOCHKO, R. (1973) Types of microtextural elements and microporosity in clays (based on scanning electron microscopy studies). *Proc. of the Int. Symposium on soil structure*. Gothenburg, Sweden, 97-101.
- CASAGRANDE, A. (1932). The structure of clay and its importance in foundation engineering. *Jour. Bos. Soc. Civil Engineers*, Vol. 19, 72-113.
- CASAGRANDE, A. (1932). Research of Atterberg limits of soils. *Public Roads*, Vol. 13, 8, 121-136.
- CASAGRANDE, A. (1948). Classification and identification of soils. *Transactions, ASCE*, Vol. 1, 13-930.
- CHANDLER, R. J. (1973). A study of structural discontinuities in stiff clays using a polarizing microscope. *Proc. of the Int. Symposium on soil structure*. Gothenburg, Sweden, 78-85.
- COLEMAN, J. D., FARRAR, D. M. Y MARSH, A. D. (1964). The moisture characteristics, composition and structural analysis of a red clay soil from Nyeri, Kenia. *Géotechnique*, 14, No. 3, 262-276.
- COLEMAN, J. D. AND MARSH, A. D. (1961). An investigation of the pressure-membrane method for measuring properties of soil. *The Journal of soil science*, Vol. 12, 344-362.
- COLLINS, K. Y MCGOWN, A. (1974). The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. *Géotechnique* 24, No. 2, 223-254.

- COLLINS, K. (1985). Towards characterization of tropical soil microstructure. *Proc. Of the 1st Int. Conf. On Geomech. In Tropical Lateritic and Saprolitic soils*. Brasil, 85-96.
- CRONEY, D. Y COLEMAN, J. D. (1954). Soil structure in relation to the soil (pF). *Journal of Soil Science*, Vol. 5, No. 1, 78-84.
- CRUZ HUERTA, L. Y GEISSERT, D. (2000). Electric charge of andosol of Cofre de Perote, Veracruz, México. Xalapa, México: *Boletín del Instituto de Ecología, A. C.* (paper).
- DAS, B. M. (2002). *Principles of geotechnical engineering*. USA: Brooks/Learning. p. 71, 352.
- DAY, R. W. (2000). *Geotechnical engineer's portable handbook*. USA: McGraw-Hill
- DE SANTIAGO, C. (2000). *Las arcillas magnésica de la Cuenca del Tajo: caracterización y propiedades*. Madrid: CEDEX..
- DIXON H. H. (1963). A review of test results on halloysitic soils and their performance in the field. *Proc. of 3rd Reg. Conf. for Africa on Soil Mech. and Found. Engg.* Rhodesia, Vol. I, 183-185.
- DOMÉNICH, X. (1994). *Química del suelo, el impacto de los contaminantes*. Madrid: Miraguano Ediciones.
- 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.
- DUMBLETON, M. J. (1967). Origin and mineralogy of African red clays and Keuper Marl. *Q. Jl. Engng. Geol.* Vol. 1, 39-45.
- 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. (1969). Swelling of clays in contact with water at a negative pressure. *Proc. of the 2nd Int. Research and Eng. Conf. On Expansive Clay*, Texas, 207-217.
- ESCARIO, V. (1973). Medida de las propiedades de los suelos expansivos y colapsibles bajo succión controlada. *Boletín de información, Laboratorio del Transporte y Mecánica del suelo*, 100, CEEOP, 1-8.
- ESCARIO, V. Y SÁEZ, J. (1974). Colapso gradual de los suelos producido por una disminución de la succión. *Boletín de información, Laboratorio del Transporte y Mecánica del suelo*, 105, CEEOP, 37-38.
- ESCARIO, V. (1988). Formulaciones para la definición de la resistencia a esfuerzo cortante de los suelos parcialmente saturados. *Revista de Ingeniería Civil*. 68, 45-54.
- ESPÍNDOLA CASTRO, J. M. (1999). La actividad volcánica. *Instituto de Geofísica, México: UNAM*.
- FISHER, R. V. (1961). Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks. *Geological Society of American Bulletin*, Vol. 72, 1409-1414.
- FREDLUND, D. G. AND RAHARDJO, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- GEOCIMENTACIONES, S. A. (1990). *Estudio de Mecánica de suelos para el Proyecto Desarrollo Urbano "Nueva Xalapa", de Xalapa, Ver.* (paper).

- GEOCIMENTACIONES, S. A. (1990). *Estudio de mecánica de Suelos para cimentar edificios correspondientes a la 1ª y 2ª etapa del Proyecto Habitacional "Nueva Xalapa" de Xalapa, Ver.* (paper).
- GEOCIMENTACIONES, S. A. (1991). *Estudio de Mecánica de suelos para cimentar la Torre Ánimas.* (paper).
- GEOCIMENTACIONES, S. A. (1992). *Estudio de Mecánica de suelos para cimentar el Estacionamiento IPE.* (paper).
- GEOCIMENTACIONES, S. A. (1992). *Estudio de Mecánica de suelos para cimentar el Estacionamiento Veracruz.* (paper).
- GEOCIMENTACIONES, S. A. (1993). *Estudio de mecánica de Suelos para cimentar edificios correspondientes a la 3ª etapa del Proyecto Nueva Xalapa.* (paper)
- GIDIGASU, M. D. (1976). *Laterite soil engineering. Pedogenesis and Engineering principles.* Amsterdam: Elsevier scientific publishing company.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. (1979). *Influencia de la génesis, mineralogía y fábrica en las propiedades geotécnicas de los suelos volcánicos de La Laguna (Tenerife).* Tesis Doctoral. U.C.M.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. JIMÉNEZ SALAS, J. A. Y LEGUEY, S (1981). Engineering geology of the tropical volcanic soils of La Laguna, Tenerife. *Engng Geology*, 17, 1-17.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L., FERRER, M., ORTUÑO, L. Y OTEO, C. (2002). *Ingeniería geológica.* Madrid: Prentice-Hall.
- HANSBO, S. (1973). Influence of mobile particle in soft clay on the permeability. *Proc. of the Int. Symposium on soil structure.* Gothenburg, Sweden, 132-135.
- HERVÁS, J. Y RODRÍGUEZ, R. (2001). *Estudios comparativos de métodos de determinación del contenido de materia orgánica en suelos según la norma UNE 10320: 1993 y el método de Walkley_Black.* Madrid: CEDEX.
- HILF, J. W. (1956). An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. *Tech. Memorandum 654.* USA: Bureau of Reclamation.
- HOBBS, P. R., CULSHAW, M. G., NORTHMORE, K. J., RACHLAND, A. Y ENTWISLE. D. C. (1988). Preliminary consolidation and triaxial strength test results for some undisturbed tropical red clay soils from West Java, Indonesia. *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Geomech. in Tropical Soils.* Singapur, Vol. 1, 149-155.
- HOLTS, W. G Y GIBBS, H. J. (1954). Engineering properties of expansive clays. *Proc. of ASCE*, No. 516, 641- 663.
- HÜLIMANN, M., LEDESMA, A. Y MARTÍ, J. (2001). Characterisation of a volcanic residual soil and its implications for large landslide phenomena: Canary Islands. *Engng. Geology* 59. 115-132.
- INEGI (1984). *Geología de la República Mexicana.* México: Edita el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) con la colaboración de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (1987). *Carta Estatal Geológica. Escala 1:1 000 000.* México: INEGI.

- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (1987). *Carta Estatal Topográfica. Escala 1:1 000 000*. México: INEGI.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (1987). *Carta Estatal de Hidrología subterránea. Escala 1:1 000 000*. México: INEGI.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (1987). *Carta Estatal de Hidrología superficial. Escala 1:1 000 000*. México: INEGI.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (1987). *Carta Estatal de Climas. Escala 1:1 000 000*. México: INEGI.
- JAQUET, D. (1990). Sensivity to remoulding of some volcanic ash soils in New Zealand. *Engng. Geol.* **28**, 1-25.
- JIMÉNEZ SALAS, J. A. (1958). *Propiedades mecánicas del suelo. Monografía de la Sociedad española de mecánica del suelo y Cimentaciones del Instituto técnico de la Construcción y del Cemento*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- 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 cimientos I, Propiedades de los suelos y de las rocas*. Madrid: Editorial Rueda.
- JIMÉNEZ SALAS, J. A. (1990). *Towards a mechanics of unsaturated soils. Tenth Nabor Carrillo lecture*, San Luis Potosí, México, nov., 1990. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- JUÁREZ BADILLO, E. Y RICO RODRÍGUEZ, A. (1995). *Mecánica de suelos, teoría aplicaciones, Tomo I*. México: Editorial Limusa.
- JUCA, F. T. (1993). *Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada*. Madrid: CEDEX.
- KARLSSON, R. Y PUCH, R. (1967). Shear strength parameters and microstructure characteristics of a quick clay of extremely high water content. *Proc. Of the Geotech. Conf. On Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks*, Oslo, Vol. **I**, 35-42.
- KASSIF, G. Y BEN SHALOM, A. (1971). Experimental relationship between swell pressure and suction. *Géotechnique* **21**, No. 3, 245-255.
- 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.
- KIRKPATRICK, W. M. Y RENNIE, I. A. (1973). Clay structure in laboratory prepared samples. *Proc. of the Int. Symposium on soil structure*. Gothenburg, Sweden, 103-111.
- 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 al español de Jiménez Salas, J. A. México: Editorial Limusa.
- LEE, H. C. Y WRAY, W. K. (1995). Techniques to evaluate soil suction - A vital unsaturated soil water variable. *Proc. of the 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Alonso & Delage (edits), Paris, France, 615-621.
- LEONARDS, G. A. (1953). Strength characteristics of compacted clays. *Proc. Soil; Mech. And Foud. Div. ASCE*, Vol. **79**, No. 360, 1-45.
- LÓPEZ MARINAS, J. M. Y PERRÓN, M. (2002). *Glosario y vocabulario: español, inglés y francés de términos habituales en geología aplicada a la ingeniería civil*. Madrid: CIE/DOSSAT 2000.
- LUPINI, J. F., SKINNER, A. E. Y VAUGHAN, P. R. (1981). The drained residual strength of cohesive soils, *Géotechnique*, **31**, No. 2, 181-213.
- MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS. (1976). *Instructivo para ensayos de suelos*. México: Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- McCONNACHIE, I. (1974). Fabric changes in consolidate kaolin. *Géotechnique* **24**, No. 2, 207-222.
- MARSAL, R. J. Y RESÉNDIZ, D. (1975). *Fundamentos del diseño y construcción de presas de tierra y enrocamiento*. México: Editorial Limusa.
- MARSAL, R. J. (1980). (1980). Reflections on the design of earth structure. *Fifth Nabor Carrillo Lecture*. Morelia, Méx. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos
- MARSLAND, A. (1971). The shear strength of stiff fissured clays. *Proc. of the Roscoe Memorial Symposium*, Cambridge University, march 1971, 59-67.
- MEDINA MARTÍNEZ, F. (2000). *Sismicidad y Volcanismo en México*. México: Fondo de Cultura Económica.
- MITCHELL, J. K. (1993). *Fundamentals of soil behavior*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- MOORE, R. (1991). The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of the pure and natural clays. *Géotechnique*, **41**, No. 1, 35-47.
- MORIN, W. J. AND PARRY, W. T. (1971). Geotechnical properties of Ethiopian volcanic soils. *Géotechnique* **21**, No. 3, 223-232.
- NEWILL, D. (1961). A laboratory investigation of two red clays from Kenia. *Géotechnique* **11**, No. 4, 302-318.
- NORMAS AENOR (2003). *Ensayos de Campo y Laboratorio*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- PEMEX (1974). *Especificaciones generales para proyectos de obra*; Norma 2.214.05. México: Edita: Petróleos Mexicanos.
- PECK, R. B. (1974). *Selección de los parámetros del suelo para el diseño de cimentaciones. Segunda Conferencia Nabor Carrillo*. Guadalajara, Méx. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

- PECK, R. B. (2001). The observational method can be simple. *Geotech. Engng.* **149**, No. 2, 71-74.
- PECK, R. B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, **19**, No. 2, 171-187.
- PÉREZ GARCÍA, A. Y CORTÉZ OCHOA, J. (2002). Edómetro de succión controlada para efectuar ensayos sobre suelos no saturados. *XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*. Querétaro, México, nov. de 2002, 81-87.
- POUSADA, E. (1984). *Deformabilidad de arcillas expansivas bajo succión controlada*. Madrid: CEDEX.
- PROCTOR, R. R. (1933). Description of field and laboratory methods (second of four articles on the design and construction of rolled-earth dams), *Eng. News-Record*, **9**, 111, 286-289.
- 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.
- PUSH, R. (1973). Structural variations in boulder clay. *Proc. Of the Int. Symposium on soil structure*. Gothenburg, Sweden, 113-121.
- PUSH, R. (1999). Experience from preparation and investigation of clay microstructure. *Eng. Geology* **54**, 187-194.
- PUSH, R. (1970). Microstructural changes in soft quick clay at failure. *Can. Geotech J.* Vol. **7**, No. 1, 1-7.
- 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).
- RENDÓN, F. (1978). *Las Propiedades ingenieriles de los suelos y su relación de acuerdo al diagrama unificado*. Conferencia celebrada en el Aula Magna de la U. V., Veracruz, Ver., agosto de 1978 (paper).
- ROAD RESEARCH LABOARATORY. (1959). *Soil mechanics for road engineers*. Trad. al español de Luis Valero Alonso (1963), rev. de Jiménez Salas, J. A. Madrid: CEEOP.
- ROMO, M. P. (1990). Suction measurements in partially saturated soils. *Tenth Nabor Carrillo Lecture, Contributions of the panel members*. San Luis Potosí México, nov., 1990, 111-123. México: Sociedad de Mexicana de Mecánica de Suelos.
- ROWE, P. W. (1972). The relevance of the soil fabric to site investigation practice. *Géotechnique* **22**, No. 2, 195-300.
- SAHU, B. K., GICHAGA, F. J. Y VISWESWARAIYA, T. G. (1988). Atterberg limits for Nairobi soils. *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Geomech. in Tropical Soils*. Singapur, Vol. **1**, 211-214.
- SCHMERTMANN, J. H. (1953). Estimating the true consolidation behavior of clay from laboratory test results. *J. of the Soil Mech. and Found. Div. ASCE*. Vol. **79**, No. 211, 1-26.
- SEED, H. B. Y CHAN, C. K. (1959). Structure and strength characteristics of compacted clays, *J. Soil Mech. and Found. Div ASCE*, Vol. **85**, No. SM 5, 87-128.

- SERGEYEB, Y. M., OSIPOV, V. I., GRABOWSKA-OLSZEWSKA, B. Y SOKOLOV, V. N. (1978). Types of the microstructures of clayey soils. *Proc. 3rd Int. Cong. IAEG, II, 1*, 319-327.
- INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM/SERVIVIO SISMOLÓGICO NACIONAL (2003). *Mapa de Regionalización Sísmica de la Republica Mexicana*. México: www.ssn.unam.mx.
- SHERWOOD, P. T. (1967). Classification test on African red clays and Keuper Marl. *Q. Jl. Engng Geol. Vol. 1*, 47-55.
- SIEFFERMANN, G. Y MILLOT, G. (1969). Equatorial and tropical weathering of recent basalt from Cameroon: Allophanes, halloysite, methahalloysite, kaolinite and gibbsite. *Proc. Of the International Clay Conference*. Tokio, Japan. 417-428.
- S.M.M.S. E INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM (1977). *Vocabulario de mecánica de suelos (soil mechanics glossary)*. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- SORIANO, J., DE LA PEÑA, J. A. Y MARFIL, R. *Aplicación de la microscopía óptica y electrónica de barrido al estudio de los procesos de alteración diagenética de rocas volcanoclásticas*. Madrid: MOPU.
- SKEMPTON, A. W. (1953). The colloidal activity of clays. *Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech.*, 1, 57-61.
- SKEMPTON, A. W. Y PETLEY, D. J. (1967). The strength along structural discontinuities in stiff clays. *Proc. Of the Geotech. Conf. On Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks*, Oslo, Vol. II, 29-45.
- SKEMPTON, A. W. (1985). Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Géotechnique 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. (1960). *From theory to practice in soil mechanics, structure and volume of voids of soils, from part of 13 of Erdbaumechanics, translated by Arthur Casagrande*. USA: John Wiley & Sons.
- TERZAGHI, K. (1966). *Theoretical soil mechanics*. USA: John Wiley & Sons Inc. cap. 13.
- TOVEY, N. K. Y YAN, W. K. (1973). The preparation of soils and other geological materilas for the S.E.M. *Proc. of the Int. Symposium on soil structure*. Gothenburg, Sweden, 59-67.
- TSIGE, M. (1999). *Microfábrica y mineralogía de las arcillas azules del Guadalquivir: influencia en su comportamiento geotécnico*. Madrid: CEDEX.
- UNE 103800: 1992. Geotecnia. Ensayos "in situ". Ensayo de penetración estándar (SPT).
- UNE 7371: 1975. Toma de muestras superficiales de suelo de tipo inalterado.
- URIEL, S. Y SERRANO, A. (1974). Propiedades geotécnicas de dos suelos volcánicos colapsibles de baja densidad en la cimentación de dos presas en la Islas Canarias (España). *Boletín de Información del Lab. del Transp. y Mec. de Suelos*. Madrid: CEEOP, No. 105, 21-28.
- VARGAS, M. (1985). The concept of tropical soils. First Int. Conf. On Geomech. in Tropical Lateritic and Saprolitic soils. *Brasilian Soc. for Soil Mech. Vol. 3*, 101-134.

- VOIGHT, B. (1973). Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils(technical note). *Géotechnique* **23**, No. 4, 265-267.
- WESLEY, L. D. (1973a). Cluster hypothesis and the shear strength of a tropical red clay. *Géotechnique*, **23**, 1, 109-113.
- WESLEY, L. D. (1973b). Some basic engineering properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. *Géotechnique* **23**, No. 4, 471-494.
- WESLEY, L. D. (1974). Tjipanundjang Dam in West Java, Indonesia. *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*. 503-522.
- WESLEY, L. D. (1977). Shear strength properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. *Géotechnique* **27**, No. 2, 125-136.
- WESLEY, L. D. Y MATUSCHKA, T. (1988). Geotechnical engineering in volcanic ash soil. *Proc. of the 2nd Int. Conf. On Geomech. in tropical soils*. Singapore, Vol. 1, 333-340.
- WHITTEN, D. G. A. Y BROOKS, J. R. (1980). *Diccionario de geología*. Madrid: Alianza Editorial.
- 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.
- YONG, R. N AND WARKENTING, B. P. (1975). *Soil properties and behaviour*. Amsterdam: Elsevier scientific Publishing Company. cap. 2, 3.
- YONG, R. N. Y SHEERAN, D. E. Y NAGARAJ, T. S. (1975). Soil composition control of fabric and response behaviour. *Proc. of the Int. Clay Conf. Mexico City*. 663-672.
- YONG, R. N. Y SHEERAN, D. E. (1973). Fabric unit interaction and soil behaviour. *Proc. of the Int. Symposium on soil structure*. Gothenburg, Sweden, 176-183.
- YOSHIMI, Y. Y OSTERBERG, J. O. (1963). Compression of partially saturated cohesive soil. *J. of the Soil Mech. and Found. Div. ASCE*, Vol. **89**, No. SM 4, 1-24.