

INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA EN LAS TENDENCIAS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO. SUELOS TROPICALES DEL STOCK DE SAN DIEGO, MEDELLÍN-COLOMBIA

Maria del Mar Mesa S., Julio C. Solano A., Jaime E. Hincapié A. y Marco A. Márquez G

Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, Sede de Medellín

mdmesas@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 19 de Agosto de 2004 / Aceptación: 09 de Noviembre de 2004 / Recibida versión final: 19 de Noviembre de 2004

RESUMEN

Teniendo en cuenta que en el ambiente tropical húmedo, en el cual nos encontramos, los fenómenos de meteorización química son intensos y los factores de formación de suelos variados, la práctica de la geotecnia se vuelve algo particular. Aparece la microestructura como un elemento con una influencia significativa sobre el comportamiento geomecánico de la masa de suelo. Para analizar las tendencias de los parámetros de resistencia y compresibilidad asociados a cambios microestructurales, se realizan análisis químicos y mineralógicos, mediciones microscópicas de parámetros como el tamaño y distribución del espacio poroso, organización y tamaño de partículas, en dos perfiles de meteorización del Stock de San Diego, en la ciudad de Medellín (Antioquia - Colombia). A partir del análisis microestructural se plantea que las respuestas de los suelos estudiados se encuentran asociadas a la microestructura desarrollada en el proceso de meteorización, al microfisuramiento y a la presencia de óxidos de manganeso y hierro.

PALABRAS CLAVES: Microestructura; meteorización; Suelos Tropicales; Resistencia; Compresibilidad.

ABSTRACT

Keeping in mind that in the humid tropical environment, where we are, the phenomena of chemical weathering are intense and the soils formation factors varied, the practice of the geotechnics becomes particular, appearing the microstructure as an element with a significant influence on the geomechanical behavior of the soil masses. To analyze the tendencies of the behavior of the strength and compressibility parameters associated to microstructural changes, there are realized chemical and mineralogical analysis, microscopic measures of microstructural parameters as the porous space size and distribution, organization and particles size, in two weathering profiles of the Stock of San Diego, in the city of Medellín (Antioquia - Colombia). Starting from the microstructural analysis it's posed that the soils behavior is associated to microstructure developed in the weathering process, by microcracking and by the presence of manganese and iron oxides.

KEY WORDS: Microstructure; Weathering; Tropical Soils; Strength; Compressibility

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de meteorización transforman un material parental, *in situ* o transportado en un suelo (geomaterial meteorizado: suelo tropical) con propiedades ingenieriles particulares que difieren del comportamiento mecánico y dinámico de los suelos no meteorizados. Las características del material parental y los procesos de formación que dan origen a estos suelos heterogéneos influyen directamente en la metodología de clasificación.

El estudio de geomateriales por medio de los ensayos convencionales y su relación con las propiedades mecánicas ha sido muy discutido en la comunidad geotécnica debido a la calidad del muestreo, a la validez de la aplicación de algunas pruebas y a la dificultad para establecer correlaciones generales, razón que obliga a realizar algunas modificaciones en la metodología y énfasis de las pruebas de clasificación, con el fin de avanzar en el estado del conocimiento.

El comportamiento geomecánico, en condiciones *in situ*, depende de muchos factores; por ejemplo, la mineralogía, el arreglo espacial y la distribución de las partículas, la asociación del espacio poroso y la fuerza entre partículas. Todos estos aspectos conforman la microestructura del suelo, los cuales pueden ser correlacionados con propiedades ingenieriles. En esta investigación se analizan las tendencias del comportamiento de los parámetros de resistencia y compresibilidad asociados a cambios microestructurales. Para tal efecto, se recolectaron muestras en el departamento de Antioquia (área urbana de Medellín) en los niveles saprolito y residual, en dos perfiles de meteorización del Stock de San Diego, con el fin de determinar la variación del comportamiento geomecánico en función de la evolución del perfil de meteorización, elaborando láminas delgadas y secciones pulidas en cada profundidad de muestreo para el análisis y evaluación de las componentes microestructurales.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en el sector norte de la Cordillera Central de los Andes Colombianos, específicamente, en el flanco centro-oriental del Valle de Aburrá, al interior de la zona 12 de la Microzonificación Sísmica de Medellín (Figura 1).

En el área de estudio afloran principalmente rocas de origen ígneo y metamórfico y, a nivel superficial, una serie depósitos de vertiente.

El Stock de San Diego corresponde a un cuerpo de aproximadamente 9 km² con forma alargada, cuyo eje principal presenta dirección NW. Con rocas de intermedias a básicas desde dioritas hasta gabros, son comunes las pegmatitas con grandes cristales de hornblenda (Machado y Salazar, 2000). En esta unidad de rocas ígneas se seleccionaron dos perfiles de meteorización: Altos del Poblado y Terra Verde.

3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

El estudio de la microestructura de los suelos en las últimas décadas, se ha realizado utilizando técnicas de microscopía óptica de luz polarizada (PLM, por sus siglas en inglés), microscopía electrónica de barrido y transmisión (SEM y TEM, por sus siglas en inglés, respectivamente) y como es bien conocida la difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés).

La microscopía electrónica es una de las técnicas más versátiles para la visualización y el análisis de las características microestructurales de muestras sólidas por medio de imágenes digitales, debido principalmente, a su elevada resolución (alrededor de 2 nm) y a su gran profundidad de campo, lo que permite una visualización tridimensional (Goldstein, 1984). Las características como tamaño medio de las partículas, distribución, morfología, cantidad aproximada y distribución de la porosidad pueden evaluarse cuantitativamente.

4. MUESTRAS Y MÉTODOS

Para caracterizar la microestructura y determinar las propiedades geomecánicas de los horizontes analizados se realizó el seguimiento a excavaciones manuales (pilas) con diámetros promedios de 1,5 m y profundidad máxima de 30 m. También se utilizaron taludes expuestos, los cuales permitieron: la observación y caracterización de los perfiles.

En el trabajo de campo se realizó una descripción visual de los diferentes horizontes de meteorización: cuantificación de los porcentajes de roca respecto a la matriz de suelo, color, espesor, condición de humedad, reacción al HCl, consistencia, cementación, estructuras, distribución cualitativa de la granulometría, grado de meteorización y minerales presentes.

Los puntos de muestreo se tomaron de forma aleatoria dentro del perfil de meteorización. Se recolectó el número de muestras mínimo para evitar un trabajo innecesario y reducir los costos.

El muestreo para análisis microestructural se hizo de forma manual utilizando cajas de Kubiena (muestras talladas manualmente), para generar muestras de buen tamaño, de fácil manejo y alta calidad.



FIGURA 1.

Localización del área de estudio.

Los especímenes se recolectaron (con mucho cuidado) de tal forma que su estructura natural se conservara inalterada. Se emplearon cajas metálicas de Kubiena de 200 cm^3 ($10 \times 5 \times 4 \text{ cm}$), las cuales ofrecen gran facilidad para obtenciones puntuales (al interior de las pilas y en los taludes) y el transporte (Figura 2).

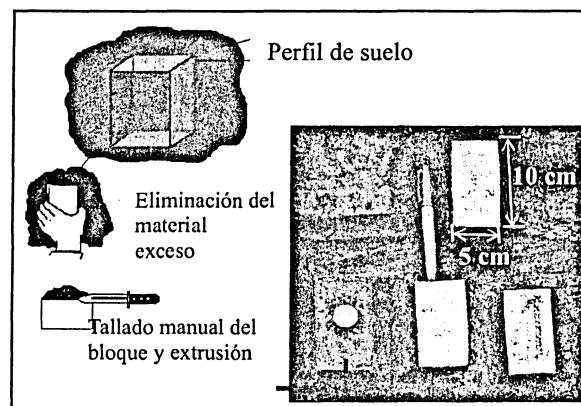


FIGURA 2.
Caja de Kubiena

4.1. Preparación de Muestras

Para la utilización del microscopio óptico y electrónico se emplearon láminas delgadas de 25 a 30 μm de espesor y secciones pulidas, respectivamente. Para la difracción de rayos X se utilizaron muestras pulverizadas. La fracción arcilla fue separada mediante el método de Bouyucos, basado en la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas. Se utilizó como agente defloculante silicato de sodio, para garantizar una buena dispersión de las partículas.

4.1.1. Preparación de láminas delgadas

Las técnicas de deshidratación e impregnación utilizadas en la investigación son las propuestas por Smart y Tovey (1982), con algunas modificaciones. Las muestras de suelo fueron deshidratadas utilizando el método de sustitución de agua por vapor de acetona, durante dos semanas. Este método produce menor alteración o lixiviación de la muestra. Las muestras fueron impregnadas con una mezcla de resina de poliéster insaturada, utilizando un equipo de impregnación al vacío y curado en tres semanas a temperatura ambiente. Finalmente, las secciones pulidas fueron recubiertas superficialmente con una capa nanométrica de oro y carbono en vacío, para una excelente conducción del haz de electrones y obtención de imágenes digitales de buena calidad.

4.1.2. Preparación para difracción de rayos X

Las muestras de suelo se secaron al aire bajo techo a temperatura ambiente, peso constante y luego se pulverizaron manualmente por medio de un mortero de ágata con acetona al 100%, para ser llevadas al difractómetro de rayos X.

5. RESULTADOS

El análisis de los resultados se encuentra dividido en dos componentes: caracterización microestructural y geomecánica, las cuales se presentan a continuación.

5.1. Descripción del Perfil de Meteorización

En esta investigación se adoptó la metodología de clasificación de suelos tropicales propuesta por Dearman (1978) y la Oficina de Control Geotécnico de Hong Kong (1988).

5.2. Caracterización Microestructural

A nivel de arreglos de partículas hay que enfatizar en primer lugar en el significado del término microestructura y diferenciarlo con el término microfábrica. La microestructura incluye la microfábrica, la componente mineralógica (fases minerales) y la fuerza entre partículas (Collins, 1985). La microfábrica es la componente de la microestructura que da la explicación del arreglo espacial y de la distribución de las partículas del suelo y la asociación de los espacios porosos.

5.2.1. Caracterización de la microfábrica

La caracterización de la microfábrica se realiza por medio de tres niveles fundamentales, los cuales se encuentran ligados a la escala y a los tamaños de las partículas en relación a la magnificación (Collins, 1985).

Los tres niveles de la microfábrica propuestos por Collins (1985) se presentan a continuación:

- Nivel elemental: Las partículas elementales son de tamaño arcilla, limo o arena o grupos de tamaño arcilla y agregados de partículas de arcilla.
- Nivel de ordenamiento: Un gran número de arreglo de partículas elementales de arcillas o granulares se combinan para formar varios tipos de ensambles de partículas, los cuales son unidades de organización con límites físicos definibles.
- Nivel compuesto: Así como los arreglos fundamentales se combinan para formar ensambles de partículas, estos ensambles individuales se combinan de varias maneras para formar la microfábrica compuesta.

Inicialmente la superficie de cada espécimen es observada en el SEM a baja magnificación (150X), este nivel de observación caracteriza un nivel global; la magnificación se incrementa (1500X), este nivel representa un nivel de fábrica intermedio; finalmente, la magnificación fue incrementada hasta 11000X donde es posible observar el nivel de fábrica de partículas arcillosas, la morfología de las partículas tamaño arcilla es observada en este nivel.

Las imágenes descritas en este estudio corresponden a muestras inalteradas y reconstituidas antes y después de falladas. Las Figuras 3 a 5 corresponden a los niveles de organización de la microfábrica del saprolito inalterado del perfil Terra Verde, siguiendo la metodología propuesta por Collins (1985).

La fábrica en general (nivel compuesto), consiste de un sistema continuo de matriz y agregados y espacio poroso intra-ensamble e inter-ensamble; en el nivel de fábrica intermedio (nivel de ordenamiento) las matrices encontradas son granulares-arcillosas con distribución aleatoria. Adicionalmente, se observan espacios porosos intra-elementos e intra-ensamble en el nivel elemental y contactos revestidos y limpios. Para el suelo residual, la fábrica compuesta se caracteriza por presentar un sistema continuo y embebido, con presencia de agregaciones minerales, matriz granular - arcillosa, contactos revestidos y limpios, sin paralelismo preferencial, espacio poroso intra-elemento e intra-ensamble.

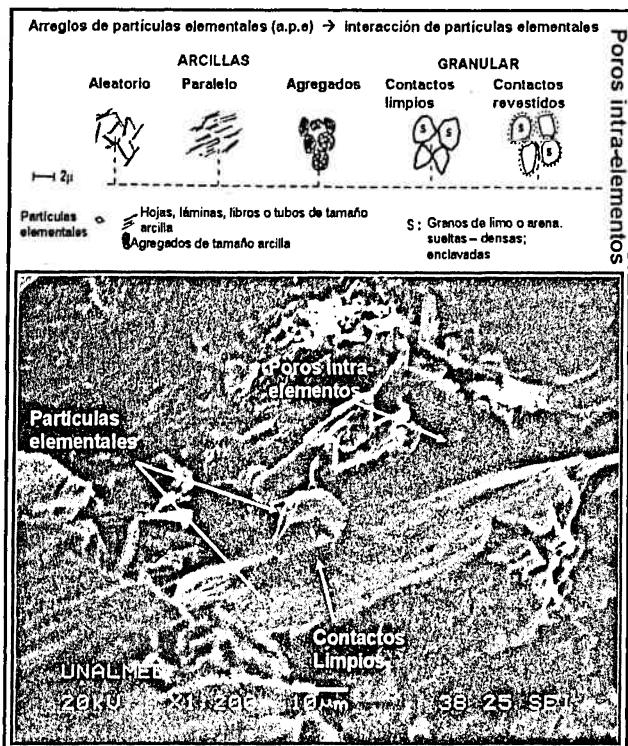


FIGURA 3.
Nivel elemental (1200X), derecha.

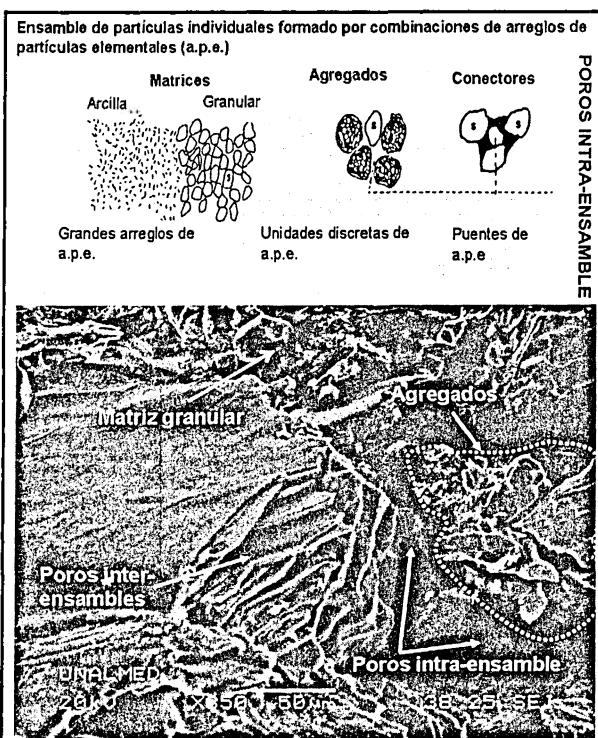


FIGURA 4.
Nivel de ordenamiento (650X), izquierda.

La caracterización del espacio poroso fue realizada por medio de la porosimetría por intrusión de mercurio (MIP, por sus siglas en inglés). Esta técnica ha sido usada rutinariamente para la evaluación de la distribución del tamaño de los poros (DTP). Recientemente ha sido aplicada a la ingeniería geotécnica.

La MIP es usada en esta investigación debido a que proporciona información sobre la morfología del espacio poroso reflejado en su distribución y tamaños.

La DTP del perfil Terra Verde (Figura 6) indica una distribución bimodal, definiendo un modo poroso de 45 μm (poros intra-ensamble o intra-granulares) y un modo poroso compuesto por un rango entre 9 y 15 μm (microfisuras, poros intra-elementos e inter-ensamble).

La DTP del perfil Altos del Poblado (Figura 7) indica una distribución trimodal, definiendo dos modos porosos de 43 y 80 μm , los cuales representan poros intra-ensamble y un modo poroso compuesto por un rango entre 8 y 25 μm , con valores centrales en 9, 10, 16 y 23 μm , los cuales representan microfisuras, poros intra-elementos e inter-ensamble.

Comparando los resultados de las distribuciones de tamaño de poros en los niveles saprolíticos de los perfiles estudiados, encontramos que los valores de tamaño de poros intra-ensamble e inter-ensamble son muy parecidos, además la MIP podría ayudar a establecer límites entre dichos espacios (poros intra-ensamble de los inter-ensamble).

Por medio del procesamiento digital de imágenes obtenidas con el SEM, fue posible obtener una cuantificación del tamaño, orientación y forma de los poros para el saprolito y el suelo residual. La Figura 8 muestra una imagen binaria del suelo residual del perfil Terra Verde, en la cual el espacio poroso es de color negro. El diagrama de rosas indica que existe una dirección preferencial de orientación de 135°. El tamaño medio de los poros es de 0,2 mm y la porosidad promedio obtenida está alrededor del 12%. Los valores de circularidad están en el rango (0,3 – 0,7).

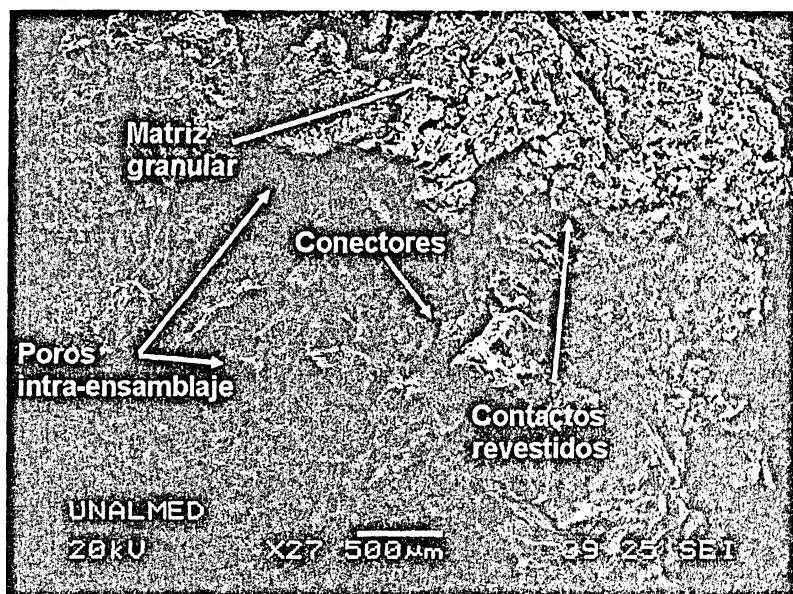


FIGURA 5.
Nivel compuesto de la microfábrica (27X).

Otros factores importantes de la microfábrica del suelo son el tamaño y la forma de las partículas y agregados y deben ser considerados en el análisis de su microestructura. Los agregados del suelo se forman cuando las partículas elementales se agrupan en unidades separables más grandes (FitzPatrick, 1990). Las arcillas son las partículas responsables del efecto agregante del suelo (Brewer, 1964).

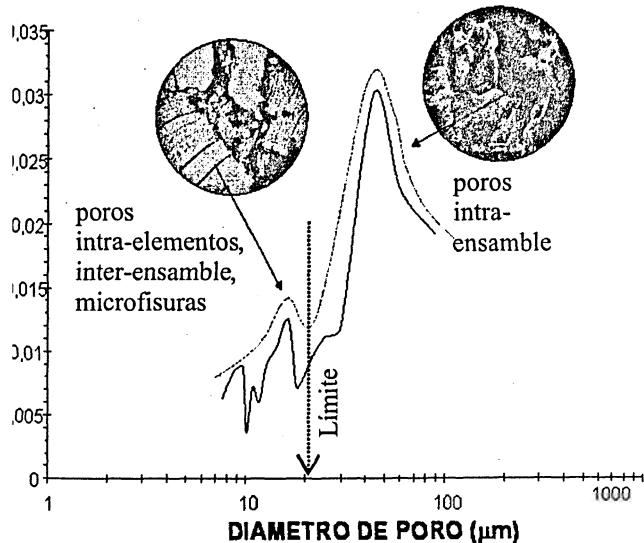


FIGURA 6.
DTP del saprolito del perfil Terra Verde

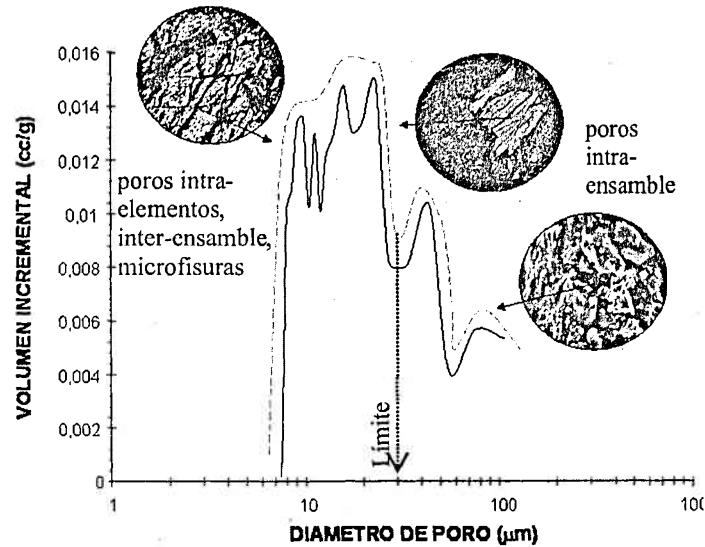


FIGURA 7.
DTP del saprolito del perfil Altos del Poblado

En esta investigación fue posible estudiar la agregación del suelo a través del método granulométrico del contador COULTER. Los ensayos hechos en el suelo residual del perfil Terra Verde con y sin agente defloculante muestran como la media del tamaño de las partículas en el suelo residual sin agente presenta un valor de 18,78 μm , mientras que para el mismo suelo con agente el valor medio del diámetro de las partículas aumenta a 42,61 μm , esto indica la agregación de partículas en la fracción fina del suelo (Figura 9). Vale la pena anotar que aunque el perfil Terra Verde presenta un porcentaje bajo de la fracción arcilla (15%, método de Bouyoucos), el efecto de agregación es considerable.

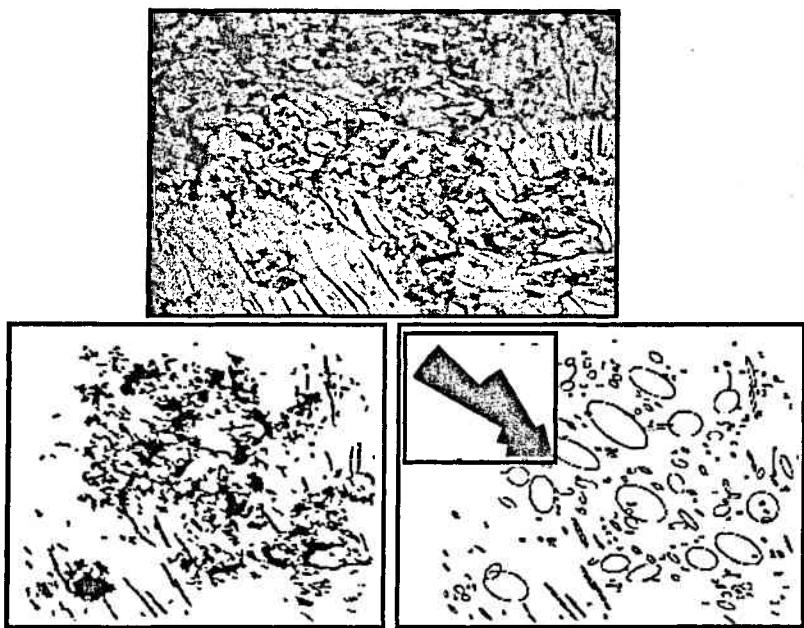


FIGURA 8.
Geometría y orientación de los poros intra y entre granos minerales para el saprolito del perfil Terra Verde

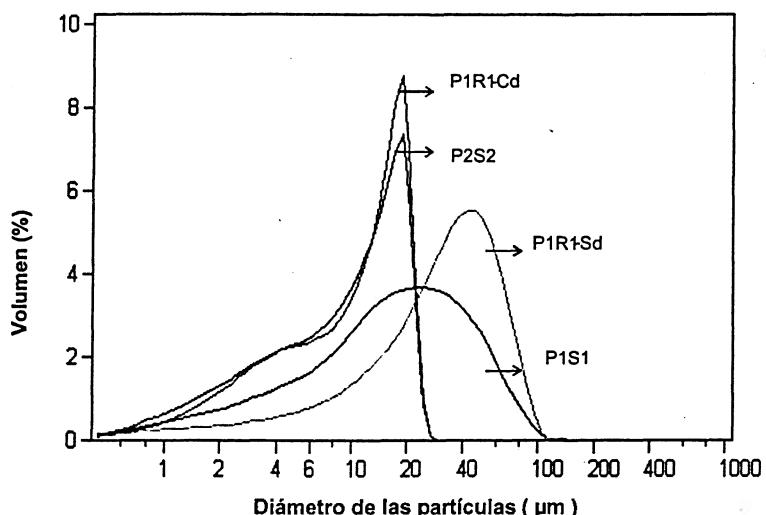


FIGURA 9.
Diámetro de las partículas para los perfiles Terra Verde (P1) y Altos del Poblado (P2). Saprolito (S) y Residual (R). Con desfloculante (Cd) y sin desfloculante (Sd).

5.2.2. Caracterización mineralógica

Por medio de la PLM fue posible realizar el estudio de la evolución del perfil de meteorización, la respuesta de los minerales a la meteorización y el estudio de índices cuantitativos de alteración mineralógica.

Petrografía de la roca parental

En el perfil Terra Verde la roca parental, macroscópicamente, presenta una textura, fanerítica equigranular, de color verde grisáceo moteado de blanco. Microscópicamente se observan cristales de plagioclasa y en menor proporción cuarzo y biotita.

El material parental del perfil Terra Verde fue clasificado según el triángulo QAP de Streckeisen (1976) como *cuarzo-monzogabro*. Las secciones analizadas muestran como minerales principales, plagioclasa (labradorita) y feldespato potásico (microclina), donde la plagioclasa, en la mayoría de los casos, se observa fuertemente zonada y se aprecian fenómenos de alteración como sausuritización. En el perfil Altos del Poblado la roca parental, macroscópicamente, presenta una textura, fanerítica, equigranular, de color negro moteado de blanco. Las muestras fueron clasificadas según el triángulo QAP de Streckeisen (1976) como *gabro*, debido al contenido de clinopiroxeno (augita).

La Tabla 1 muestra los porcentajes modales mineralógicos en los perfiles estudiados.

TABLA 1.
Composición mineralógica, en porcentaje, del Stock de San Diego.

Mineral (%)	Terra Verde	Altos del Poblado
Feldespato potásico	20	5
Plagioclasa	45	55
Hornblenda	-	15
Clinopiroxeno	-	17
Cuarzo	20	3
Biotita	12	-
Esfena	2	4
Opacos	1	1

Petrografía del saprolito

El saprolito preserva la textura de la roca parental; la transición de la roca al saprolito en los dos perfiles está marcada por una desintegración granular y alteración química.

Los feldespatos en el perfil Terra Verde presentan una incipiente desintegración, indicada por microfracturas intergranulares abiertas, la presencia de una matriz opaca microcristalina secundaria producto de la alteración de minerales primarios está asociada al feldespato potásico debido a la presencia de microclina poiquilitica presentada en la roca parental. La biotita se presenta en varios grados de cloritización, se caracteriza por la abertura a través de los planos de clivaje (Figura 10a) y sustitución por óxidos de hierro.

En el perfil Altos del Poblado, el saprolito se caracteriza por microfracturas intergranulares del clinopiroxeno y el anfíbol (hornblenda), evidenciándose por la separación de los planos de clivaje (Figura 10b). En las plagioclasas, la degradación mineral es evidenciada por la sausuritización y el decrecimiento del tamaño. Se forma una matriz granular-arcillosa con presencia de óxidos recubriendo microfracturas de minerales.

Petrografía del suelo residual

En los dos perfiles estudiados, el horizonte residual se encuentra caracterizado por una disminución del tamaño de los granos minerales, producto de la alteración de los minerales a fases del grupo de las arcillas; se desarrolla una matriz

que envuelve minerales remanentes o relictos de la roca original, como es el caso del cuarzo, donde la alteración es mínima y su presencia está condicionada al porcentaje presente en el material parental y procesos como la lixiviación.

La Figura 11 ilustra la intensidad de los cambios que se desarrollan en el paso de roca a suelo.

Respuesta de los minerales al proceso de meteorización

La primera fase del proceso de meteorización de los materiales estudiados en esta investigación está caracterizada por un cambio en la coloración del material original (decoloración). La segunda etapa (desintegración), se caracteriza por el decrecimiento de la dureza, se abren las discontinuidades, comienzan a desarrollarse pequeñas microfisuras (discontinuidades) muy estrechas y de paredes ajustables, que progresivamente se van ensanchando y haciéndose menos regulares y de morfología más compleja. El material se vuelve deleznable, más o menos suelto, de aspecto pulverulento. Se produce la desagregación de la roca, los cristales se separan unos de otros, pero conservando en gran medida el volumen inicial y manteniendo en cierta medida, la organización primitiva de la roca. A este nivel de alteración se le llama "saprolito". En la fase final la transformación es tan intensa que el material adquiere una morfología propia. Se tiene una intensidad de meteorización química máxima y los procesos pedogénéticos comienzan a actuar. A nivel de organización los cambios conducen a la pérdida total de la estructura de la roca. Los minerales que en las etapas anteriores se habían fragmentado pero que permanecían "in situ", formando entidades individuales, ahora se han movilizado y desplazado a distancias variables.

Como resultado de la intensa alteración la matriz se vuelve muy abundante y llega a constituir una especie de masa que engloba a los demás constituyentes. Por otra parte, la porosidad aumenta considerablemente, lo que conlleva a un aumento de volumen (Figura 11).

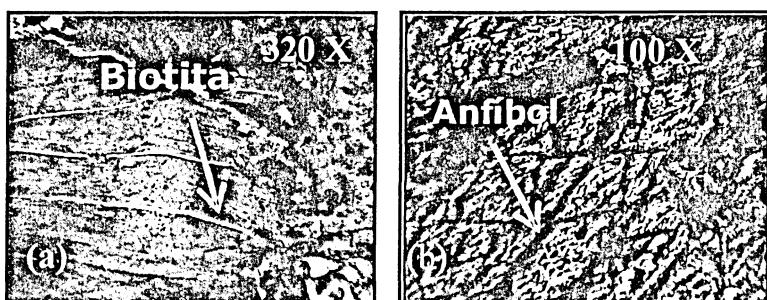


FIGURA 10.
Abertura de planos de clivaje en biotita y en anfíbol.

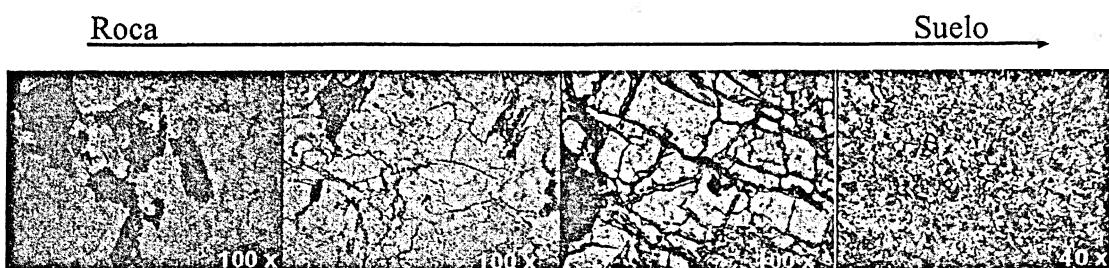


FIGURA 11.
Intensidad de los cambios que se desarrollan en el paso de roca a suelo. Perfil Terra Verde.

Transformaciones de fases

Con la ayuda del SEM y la XRD se pudo caracterizar la transformación de las fases minerales.

Los perfiles estudiados se caracterizan por el grado de caolinitización con la meteorización, evidenciándose con el aumento del pico de la caolinita en el difractograma (Figura 12) y la morfología típica en forma de "libros" de la caolinita en los niveles residuales en ambos perfiles (Figura 13). Es característico del perfil Altos del Poblado el aumento de óxidos e hidróxidos de Fe (Figura 12).

Índices cuantitativos

El Gabro de San Diego presenta un perfil complejo de meteorización, se caracteriza por presentar zonas heterogéneas de meteorización, diques pegmatíticos y contactos heterogéneos con unidades como la anfibolita, dificultando la unificación de un único perfil de meteorización.

La evolución de la meteorización fue caracterizada a través del índice de descomposición X_d (Lumb, 1962). Definido como:

$$X_d = \frac{N_q - N_{q0}}{1 - N_{q0}} \quad (1)$$

Donde, N_q : Relación en peso de cuarzo y feldespato en el suelo; N_{q0} : Relación en peso de cuarzo y feldespato en la roca. En esta investigación N_q fue determinada usando el porcentaje de cuarzo y feldespato presente en cada horizonte de meteorización. N_{q0} fue determinada como el porcentaje de cuarzo y feldespato presente en la roca fresca.

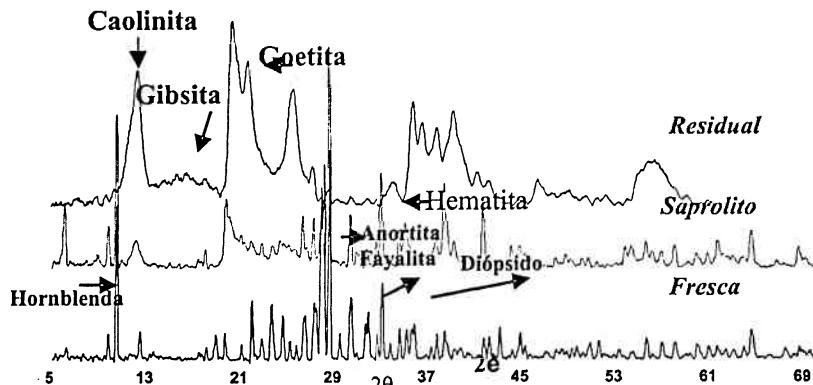


FIGURA 12.
Transformaciones de fases. Perfil Altos del Poblado.

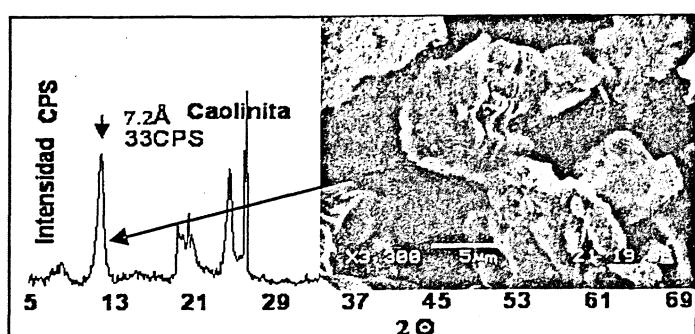


FIGURA 13.
Difractograma e imagen (SEM, 3300X) de caolinita en el suelo residual.

Se calculó el índice micropetrográfico Ip , definido por Irfan y Dearman (1978).

$$Ip = \frac{\% \text{ Minerales inalterados constituyentes}}{\% \text{ Minerales alterados constituyentes}} \quad (2)$$

Donde, los minerales inalterados constituyentes son los minerales primarios y accesorios no alterados y los alterados constituyentes son los minerales secundarios, minerales arcillosos, clorita, sericitita, saussurita, óxidos de hierro más las microfracturas y espacio poroso.

Las Tablas 2 y 3 muestran los resultados del X_d e Ip obtenidos, respectivamente.

TABLA 2.
Índice de descomposición X_d

Perfil de meteorización	Muestra	N_{q0}	N_q	X_d (mod.)
Terra Verde	Saprolito	0,78	0,55	0,51
	Residual	0,78	0,30	0,69
Altos del Poblado	Saprolito	0,65	0,45	0,36
	Residual	0,65	0,25	0,53

TABLA 3.
Índice micropetrográfico Ip

Perfil de meteorización	Muestra	Minerales Inalterados %	Minerales Alterados %	Microfracturas + Poros (%)	Ip
Terra Verde	Roca	92	7	1	11,5
	Saprolito	30	40	30	0,42
	Residual	10	55	35	0,11
Altos del Poblado	Roca	90	5	5	9
	Saprolito	32	38	30	0,47
	Residual	15	50	35	0,18

Otro índice utilizado es el propuesto en ésta investigación a partir de los resultados obtenidos de la difracción de rayos X.

Los valores de intensidad (cps) obtenidos a partir de la difracción de rayos X permiten conocer el pico principal de la plagioclasa (fase mineral dominante en la roca fresca) y el pico principal del mineral arcilloso, en este caso caolinita (alteración mineralógica dominante). Se considera que el grado de alteración de las muestras individuales se encuentra bien representado por la medición (índice) cuantitativa, basada en la comparación del mineral primario más abundante con el mineral secundario más abundante índice de alteración caolinítico (IAC).

$$IAC = \frac{Ps}{Pp} \quad (3)$$

Donde, PS = pico de mayor intensidad (cps) del mineral arcilloso más abundante (secundario) y Pp= pico de mayor intensidad (cps) del mineral primario más abundante en la muestra de suelo (background removido).

Este índice permite realizar comparaciones entre muestras del grado de alteración. Altos valores del índice indican alto grado de alteración y valores bajos del índice indican bajos grados de alteración.

La Tabla 4 muestra el valor del IAC para los suelos de ambos perfiles. La Tabla 5 resume el rango del IAC para la valoración cuantitativa del grado de alteración del Stock de San Diego, en los suelos estudiados.

TABLA 4.

Valores del índice de alteración caolinítico para los suelos del perfil Terra Verde (P1) y Altos del Poblado (P2).

Perfil	Clasificación de Hong-Kong	IAC
Perfil 1	PWg 0-30 (I)	0,09
	PWg 0-30 (III)	0,11
	PWg 0-30 (IV)	0,13
	PWg 0-30 (V)	2,17
	PWg 0-30 (VI)	6,6
Perfil 2	PWg 0-30 (I)	0,10
	PWg 0-30 (V)	0,20

TABLA 5.

Valoración del grado de alteración del Stock de Sandiego.

Índice de alteración caolinítico (IAC)	Grado de alteración
0,00 - 0,10	Fresca (F)
0,10 - 0,15	Ligeramente alterada (LA)
0,15 - 2,50	Completamente alterada (CA)
> 2,50	Suelo residual (SR)

5.3. Caracterización geomecánica

En el estudio de los suelos tropicales, es necesario introducir modificaciones a los sistemas clásicos de clasificación. Los límites de consistencia deben ser vistos como una primera clasificación de este tipo de materiales debido al remoldeo al que se somete la muestra (rompimiento de enlaces intra-partículas), por esta razón se deben considerar la naturaleza mineralógica del material parental, la mineralogía de la fracción arcillosa (mineralogía de las arcillas) y la microfábrica, por medio de análisis de difracción de rayos X, entre otros (Castaño, 2002). Según la Sociedad Geológica de Londres (1997), las pruebas de consistencia convencional en los suelos deben hacerse con el propósito de clasificación mineralógica. Por esta razón en esta investigación en el análisis de este tipo de ensayos se tiene en cuenta estas consideraciones.

En la Figura 14 podemos observar que la mineralogía de la fracción fina corresponde a caolinita, es importante hacer esta anotación ya que la mineralogía del grupo de las arcillas obtenida por difracción de rayos X corresponde exactamente a este tipo de mineral arcilloso.

Con estos resultados se plantea nuevamente que los límites de Atterberg proporcionan una herramienta no solo de clasificación sino, a la vez, de caracterización, especialmente mineralógica.

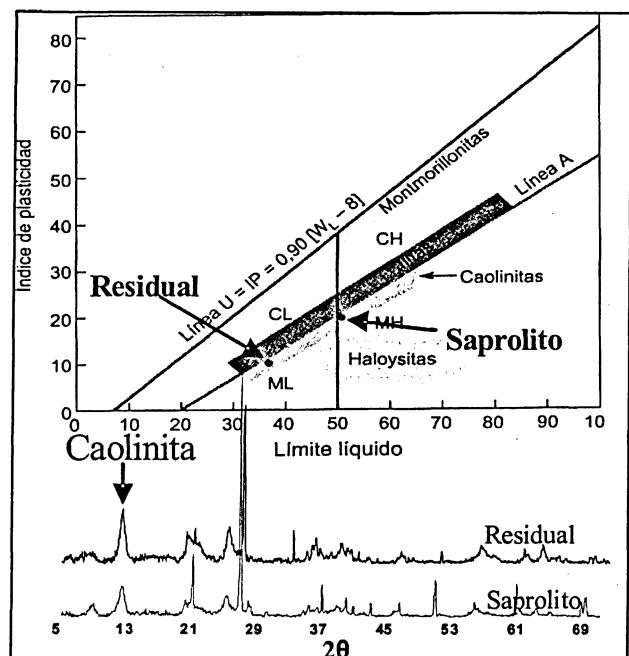


FIGURA 14.
Carta de plasticidad y difractograma perfil Terra Verde.

5.3.1. Ensayos de resistencia

Para evaluar la influencia de la microestructura en los parámetros de resistencia en los suelos estudiados, se tuvo en cuenta la respuesta de estos en condiciones inalteradas y reconstituidas, la diferencia de los resultados entre estas dos condiciones, se propone que sea la influencia que la microestructura está ejerciendo en las tendencias de los parámetros de resistencia.

Para una acertada evaluación de la resistencia también se tuvo en cuenta la resistencia en las discontinuidades, contactos (saprolito y suelo residual) y recubrimientos de óxidos de manganeso, muy comunes en las muestras estudiadas en el perfil Terra Verde.

La Figura 15 evidencia la relación directa que existe entre los recubrimientos de óxidos de Mn que presenta el saprolito del perfil Terra Verde y el valor de la resistencia a la compresión simple (Q_u) que presentan las muestras inalteradas en comparación con las alteradas, de esta forma se tiene que los valores de resistencia disminuyen hasta en un 40% respecto al promedio de las probetas inalteradas y sustancialmente con las probetas reconstituidas.

Cabe anotar que dichos recubrimientos facilitan la posibilidad de movimiento bajo condiciones de desconfinamiento (Suárez, 1998).

Los resultados del ensayo de cizalladura directa muestran que con el grado de meteorización la cohesión disminuye (Tabla 7). Una razón para que esto ocurra es la presencia de recubrimientos de óxidos de manganeso (pirolusita), estos pueden constituir planos de baja resistencia, logrando disminuir la cohesión por dichos planos. También se observa que el valor de la cohesión disminuye cuando el plano de corte es predeterminado, por ejemplo contactos entre el saprolito y el suelo residual donde se obtienen las cohesiones más bajas ($0,12 \text{ Kgf/cm}^2$). Cabe anotar que estos contactos se encuentran también asociados a discontinuidades rellenas de óxidos de manganeso.

Ayudados del estudio de la caracterización por medio de SEM, se conocía que el suelo saprolítico poseía poca presencia de puentes y conectores entre elementos, esto puede de alguna manera ser indicativo de los valores de cohesión bajos obtenidos. Por otro lado, el estudio granulométrico por el método de Bouyocos muestra que la fracción tamaño arcilla es baja (10%), lo que conlleva a tener baja cementación entre partículas finas con la fase granular del suelo, ya que éstas son las que aportan en la mayoría de los casos un mayor grado de empaquetamiento, por lo tanto una disminución en la fracción matricial que sirva de cementante trae como consecuencia una disminución de los valores de cohesión.

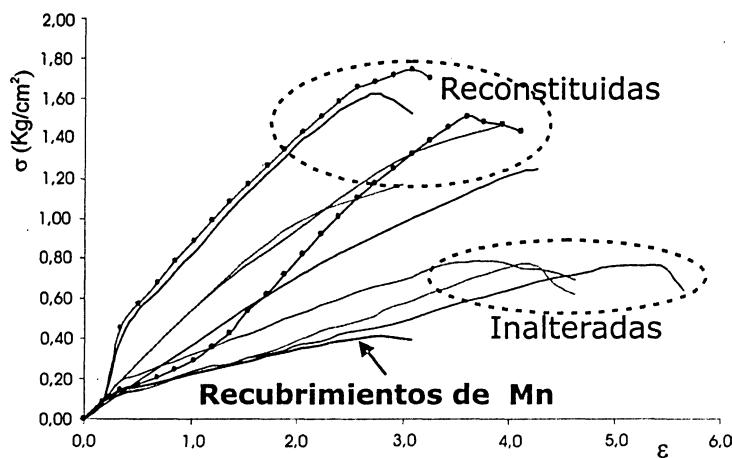


FIGURA 15.
Curvas de esfuerzo-deformación perfil Terra Verde.

TABLA 7.
Valores de la cohesión (C) y el ángulo de rozamiento interno (ϕ). Perfil Terra Verde.

Muestra	C	ϕ
Saprolito Inalterado	0,261	27,9
Saprolito inalterado	0,209	26,7
Saprolito -Reconstituido- g (campo)	0,001	44,9
Saprolito -Reconstituido- W óptima	0,202	15,5
Residual Inalterado	0,213	15,5

De manera similar, el ángulo de fricción presenta una tendencia a disminuir con la meteorización, esto se explica por el sistema embebido en que se encuentran el saprolito y el suelo residual, el cual consiste de una matriz granular-arcillosa que envuelve granos minerales y no permite el contacto entre éstos, disminuyendo la componente friccional.

Las Figuras 16 (a-c), presentan las envolventes de resistencia (pruebas de compresión triaxial del tipo consolidado no drenado) para las diferentes profundidades del saprolito del perfil Altos del Poblado. Los resultados permiten observar que existe una variación en los parámetros de resistencia a medida que aumenta el grado de alteración química, siendo más notorio en la componente cohesiva en los niveles superiores del perfil, la tendencia principal de la cohesión es a aumentar con la meteorización, debido al papel cementante de los óxidos e hidróxidos de hierro (hematita y goetita).

Si comparamos los valores de cohesión obtenidos en ambos perfiles, se puede plantear que la tendencia a disminuir que se presenta en Terra Verde se rompe en este perfil, debido probablemente a la alta influencia de los óxidos e hidróxidos de hierro en la cementación de las partículas, típico en el perfil Altos del Poblado; por otro lado es importante anotar que en el perfil Terra Verde las discontinuidades de baja resistencia (recubrimientos de óxidos de Mn) distribuidas en

las masa de suelo controlan este parámetro. Resultados similares fueron obtenidos por Castaño (2002), sobre suelos tropicales del Batolito Antioqueño, en los cuales la influencia de los óxidos de hierro es bien marcada y juegan un papel importante en la cementación de las partículas.

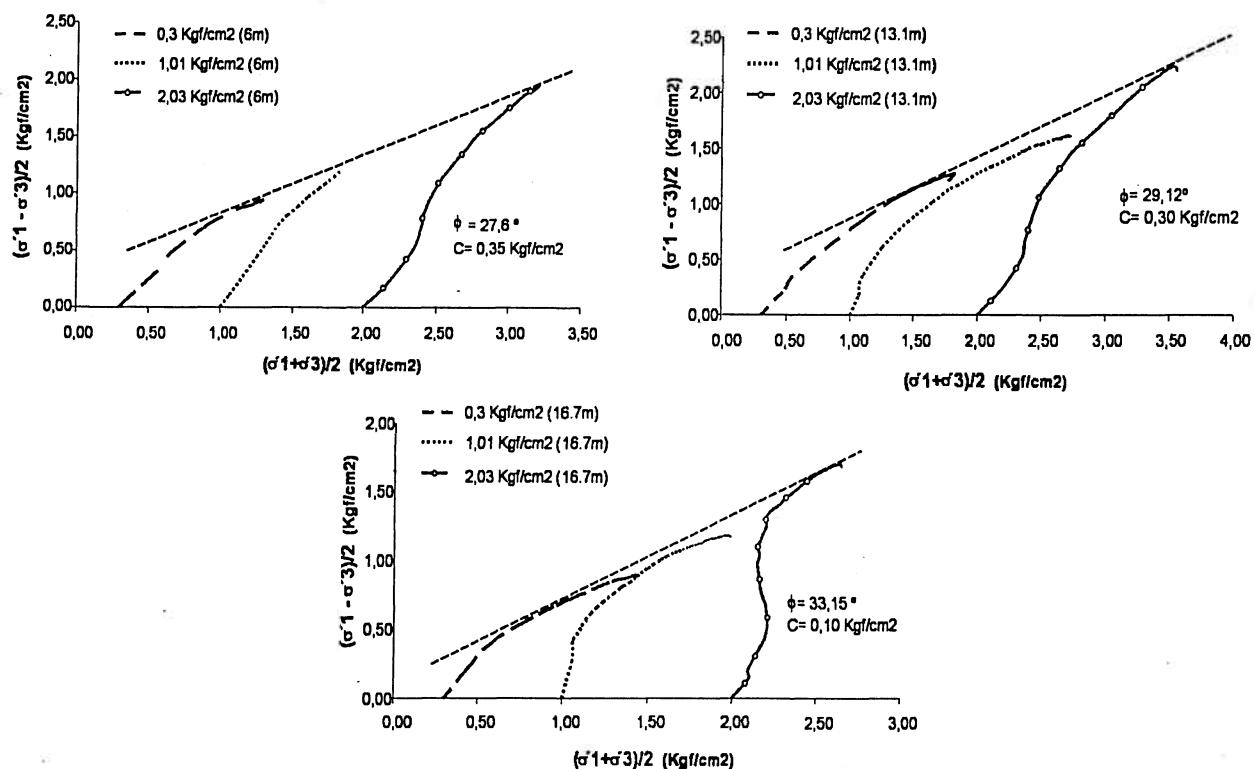


FIGURA 16.
Envolventes de resistencia. Ensayo de compresión triaxial – CU. a (6m.), b (13,1m.) y c (16,7m.)

5.3.2. *Ensayos de compresibilidad*

El esfuerzo de preconsolidación en el sentido propuesto por Casagrande no es estrictamente aplicable a esta clase de geomateriales meteorizados, debido a que este efecto no se debe a cargas previas, siendo más probable a vínculos residuales de los granos minerales que constituyeron la roca parental y cementación producida por la precipitación de hidróxidos de hierro y aluminio durante la meteorización (Osorno, 1983; en Castaño, 2002).

Con el objetivo de identificar la influencia de la microestructura del suelo en la compresibilidad, se realizaron ensayos de compresión confinada sobre muestras inalteradas (Figura 17) y reconstituidas (Figura 18) para obtener los esfuerzos de fluencia en ambos casos. Inicialmente se utilizaron presiones de confinamiento muy bajas (2 KPa) para poder observar la evolución de la microfábrica del suelo. Para tener la certeza de haber perdido la estructura del suelo se llevó el ensayo a grandes esfuerzos (2,000 KPa) en ambas muestras (inalteradas y reconstituidas).

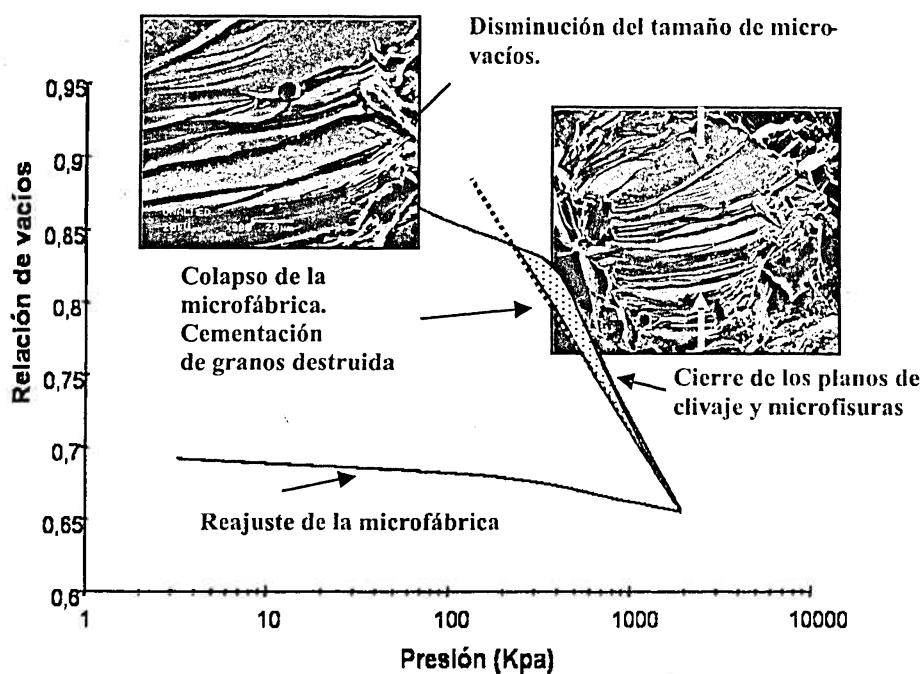


FIGURA 17.

Curva de compresión isotrópica perfil Terra Verde, saprolito inalterado.

El esfuerzo de fluencia microestructural para el saprolito inalterado del perfil Terra Verde, está alrededor de los 700 KPa. Este valor representa el esfuerzo en el cual los enlaces intraparticulares son completamente rotos o destruidos, generándose discontinuidades a nivel microscópico que favorecen la generación de grandes deformaciones por pérdida de continuidad en la microfábrica

Comparando los resultados obtenidos para el suelo saprolítico en condiciones inalteradas y reconstituidas, se observa que en condiciones inalteradas (700 KPa) existen variaciones en la curva esfuerzo – deformación mucho mayores que en condiciones reconstituidas (400 KPa), hasta antes de llegar a la pérdida de la microfábrica original, el cual en condiciones inalteradas se extiende mucho más que en la condición reconstituida.

Un planteamiento que explica lo anterior, se da si se entiende que el remoldeo logra romper todos los vínculos entre partículas y/o agregados del suelo que existen en la muestra inalterada, haciendo que la variación de deformaciones con respecto a la variación del esfuerzo sea mayor que la del suelo reconstituido; el cual no presenta dichos vínculos.

Cabe anotar, que el cambio en las trayectorias de deformación se puede relacionar con las características propias de las partículas, es decir, parte de la energía de deformación se consumirá en la disminución del tamaño espacio poroso, en este caso para cerrarse los planos de clivaje en biotita y microfisuras, caracterizados por medio de MIP, SEM y PLM.

En la Figura 19 se aprecia que los resultados de los saprolitos del perfil Altos del Poblado exhiben una conducta, en general, de suelos preconsolidados, destacándose la trayectoria de la muestra a la profundidad 12,5 m.

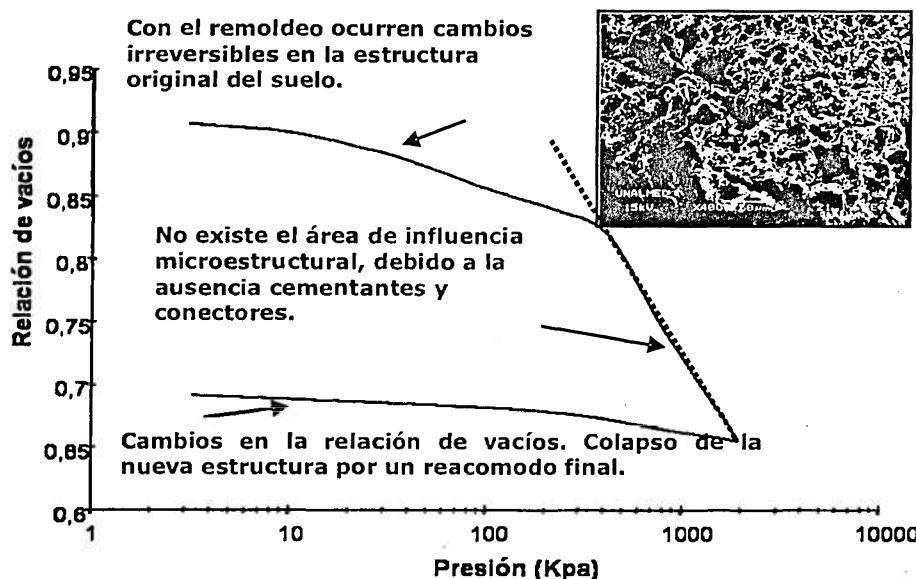


FIGURA 18.
Curva de compresión isotrópica perfil Terra Verde, saprolito alterado.

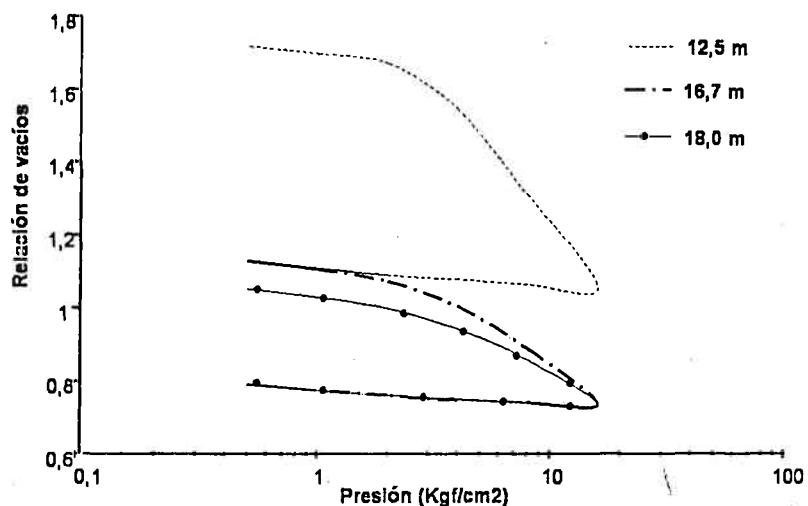


FIGURA 19.
Resultados del ensayo de compresión confinada en el saprolito del perfil Altos del Poblado.

Este primer efecto en las trayectorias tensión – deformación puede atribuirse a la reducción de las tensiones efectivas in situ debido a procesos de meteorización, ya que en la degradación de la roca hay una pérdida importante de masa; además, una de las peculiaridades de los suelos tropicales es que la historia de tensiones no tiene ninguna influencia cuantificable en el comportamiento geotécnico, y este tipo de tendencias están relacionadas con una pérdida irreversible de la estructura del suelo (Vaughan et al., 1988).

También en la Figura 19 se observa un comportamiento peculiar en el tramo de descarga de las muestras a la profundidad 16,7 y 18,0 m, estas presentan la misma trayectoria, lo que se puede relacionar con las características propias de las partículas, en cuanto a composición y tamaño, ya que al ser destruida la estructura a niveles de tensión de igual intensidad hace que la microestructura resultante sea prácticamente la misma.

6. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede concluir que la influencia de las fases minerales en las tendencias de los parámetros de resistencia en el Stock de San Diego en los perfiles estudiados, se encuentra asociada al papel cementante que poseen los óxidos (hematita) e hidróxidos (goetita) de hierro y a los recubrimientos de óxidos de manganeso que constituyen zonas de debilidad en la masa de suelo. Particularmente, en el perfil Terra Verde, por medio de ensayos de corte directo y compresión simple, la presencia de recubrimientos de manganeso es asociada a la disminución el valor de la cohesión.

Las posibles relaciones de las tendencias de los parámetros de resistencia en el perfil Altos del Poblado, se encuentran asociadas a la presencia óxidos e hidróxidos de hierro, éstos actúan como agentes cementantes, por lo cual se tiene que, con el aumento de la meteorización, se crea un incremento de la cohesión y en un comportamiento esfuerzo-deformación frágil. Resultados similares son reportados por Castaño (2002) en suelos tropicales del Batolito Antioqueño.

Las tendencias del comportamiento mecánico del ensayo de compresibilidad, no se escapan a los cambios microestructurales. Se concluye que el suelo en condiciones inalteradas presenta variaciones en la curva esfuerzo – deformación, mucho mayores que en condiciones reconstituidas, hasta antes de llegar a la pérdida de la microfábrica original; esto es debido, a la ganancia de resistencia por estructura que el suelo inalterado presenta. Los cambios en el esfuerzo de fluencia se pueden explicar porque parte de la energía de deformación se consumirá en la disminución del espacio poroso inter-particular, en este caso, cierre de los planos de clivaje de los cristales de biotita y microfisuras presentes en la masa de suelo, ambos producto de la alteración química.

Para el perfil Altos del Poblado se aprecia en los resultados, que el efecto en las trayectorias tensión – deformación puede atribuirse a la reducción de las tensiones efectivas *in situ* debido a procesos de meteorización, ya que en la degradación de la roca hay una pérdida importante de masa, esto es ratificado en estudios por además, estos autores plantean que una de las peculiaridades de los suelos tropicales es que la historia de tensiones no tiene ninguna influencia cuantificable en el comportamiento geotécnico, y este tipo de tendencias están relacionadas con una pérdida irreversible de la estructura del suelo las características propias de las partículas, en cuanto a composición y tamaño.

El índice de alteración caolinítico (IAC), propuesto en esta investigación, es un primer intento por encontrar la manera de realizar la valoración cuantitativa del grado de meteorización, buscando conocer cuales son los factores que afectan o controlan esta valoración, tratando de entender cuál es el factor que puede ser significativo para el grado de meteorización de nuestros suelos.

Una recomendación general para la continuación del estudio es considerar el agua en la estructura de suelo, en esta investigación esta fase no fue tenida en cuenta ya que las muestras fueron deshidratadas para poder ser estudiadas por medio del SEM y PLM. Para esto sería necesario equipos como el Environment Scanning Electrón Microscopy (ESEM, por sus siglas en inglés), el cual permite el estudio de muestras parcialmente saturadas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Área Metropolitana. 2002. Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá y definición de amenaza por movimientos en masa en el Valle de Aburrá. Medellín. Grupo de Sismología de Medellín - SIMPAD.

- Brewer, R. 1964. Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and Sons, New York. 470 pp.
- Castaño, N. 2002. Influencia de la microestructura en comportamientos anisotrópicos en los parámetros resistencia y compresibilidad de un suelo residual del Batolito Antioqueño. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Collins, K. 1985. Towards characterization of tropical soil microstructure. *Tropicals'85*. pp. 85-96.
- Dearman, W. 1978. Engineering grading of weathered granite. *Engineering Geology*. vol. 12, p 345 - 374.
- FitzPatrick, E. 1990. *Micromorfología de suelos*. chapman y hall, london. 457 pp.
- Geotechnical Control Office. 1988. Civil engineering services department Hong Kong: *Geoguide 3. Guide to rock and soil descriptions*. 1^a ed.
- Golstein, J. 1984. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. 820 pp.
- Irfan, T. y Dearman, W. 1978. Engineering classification and index properties of a weathered granite. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 17, pp. 79-90.
- Lumb, P. 1962. The properties of descomposed granite. *Geotechnique*. vol. 12, pp. 226-243.
- Machado, C. y Salazar, G. 2000. Caracterización petrográfica y geoquímica del Stock de San Diego. Tesis pregrado Geológica. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Smart, P. y Tovey, N. 1982. *Electron microscopy of soil and sediments: Techniques* Oxford University Press. 336 pp.
- Streckeissen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Sci. rev.* 12, pp. 1-33.
- Suárez, J. 1998. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga; publicaciones UIS. 50 pp.
- The Geological Society. 1997. *Tropical residual soils. Professional handbook*. London, ditorial the Geological Society Publishing, House.
- Vaughan, y otros 1988. Indexing the engineering properties of residual soil. *Quaterly Journal of Engineering Geology*, London. Vol. 21, pp. 69-84.

