

Influencia de la microestructura en el comportamiento dinámico de los suelos residuales de esquistos en Sabaneta.



2011 Pan-Am CGS
Geotechnical Conference

Influence of microstructure in the dynamic behavior of residual soils in Sabaneta shale.

Rivas Perea, Diana Dixa

Msc Universidad Nacional de Colombia

Villarraga Herrera, Manuel Roberto

Profesor Asistente, Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín)

Resumen

Investigaciones realizadas para estudiar el comportamiento dinámico de suelos derivados de diversas formaciones geológicas han demostrado que existe un umbral de deformación, a partir del cual el suelo empieza a incrementar la tasa de degradación. Este umbral se ha denominado deformación de cedencia y está influenciado entre otros factores por la composición mineralógica, el nivel de meteorización y la presión de confinamiento. Esta investigación estuvo encaminada a establecer el umbral en el cual el suelo empieza a perder rigidez y a estimar los cambios en la microestructura de los suelos por efecto de los ensayos dinámicos. Los suelos estudiados corresponden a suelo residual y saprolito del perfil de meteorización de los Esquistos de Sabaneta, localizados en el Área Metropolitana de Antioquia, Colombia.

Muestras representativas de estos suelos fueron sometidas a ensayos de caracterización estática, dinámica y microestructural. Los resultados obtenidos indican que dependiendo del grado de meteorización de los suelos, se presentan diferencias importantes en la composición microestructural del suelo, lo cual influye en la deformación de cedencia, la respuesta ante cargas cíclicas y los niveles de daños sufridos por el suelo.

Palabras claves: suelos tropicales residuales, dinámica de suelos, microestructura del suelo.

Abstract

Research conducted to study the dynamic behavior of soils derived from various geological formations have shown that there is a strain threshold, above which the soil begins to increase the rate of degradation.. This threshold has been called the yield strain and is influenced among other factors by the mineralogical composition, the level of weathering and confining pressure. This research was aimed to establish the threshold at which the soil begins to lose stiffness and estimate changes in the microstructure as a result of the dynamic tests. The studied soils correspond to, profile soil weathering schist of Sabaneta, located in the Metropolitan Area of Antioquia, Colombia.

Representative samples of these soils were tested for characterization, dynamic and static microstructural. The results indicate that depending on the degree of weathering of soils, there are major differences in microstructural composition, which affects the yield strain, the response to cyclic loading and levels of damage to the soil.

Key words: tropical residual soils, soil dynamics, microstructure soil.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios realizados para analizar el comportamiento dinámico de suelos residuales han mostrado que éstos tienen una deformación de cedencia y a partir de la cual el suelo sufre una pérdida abrupta de la rigidez. Sanín (1999) analizó el efecto del esfuerzo de confinamiento, la plasticidad y la humedad en las propiedades dinámicas de los suelos transportados y residuales originados de los diferentes materiales parentales presentes en el área urbana de Medellín como rocas ígneas, metamórficas, depósitos aluviales, depósitos recientes, y meteorizados, encontrando que la velocidad de propagación de ondas de corte de los suelos de Medellín presentan una amplia

variación, la cual depende principalmente del origen del suelo, el grado de meteorización y la humedad natural.

En este estudio se concluyó que los suelos residuales derivados de rocas ígneas exhiben una degradación de su rigidez en términos de G/G_{max} menor que los suelos originados de rocas metamórficas. Por lo tanto, se espera que tengan una mayor amplificación durante un sismo.

Otálvaro (2005) presentó un estudio sobre la caracterización de la respuesta del sitio del gabro de Medellín. En una parte de este trabajo mostró como los cambios que sufren los minerales presentes en el suelo producto del proceso de meteorización influyen de manera importante en el comportamiento dinámico y en el módulo de rigidez del suelo. Para cada grado de meteorización corresponde una deformación de cedencia diferente. Además, concluyó que es posible definir en las curvas de

degradación del módulo de rigidez normalizado (G/G_{max}) la deformación de cedencia, γ_y , que corresponde a la zona donde se produce súbitamente la pérdida de rigidez. Comportamiento dinámico análogo al observado en los suelos estructurados derivados de gabra en las pruebas de compresión confinada, en el cual se pueden definir tensiones de cedencia, σ_y , que corresponden a cambios en la trayectoria tensión deformación, y que han sido denominadas por algunos autores presiones aparentes de preconsolidación. El módulo de rigidez a cortante y la deformación de cedencia de los suelos tropicales in situ son función de la intensidad de meteorización y el estado de esfuerzos, así como del proceso de formación. Okur en el 2007, en su estudio sobre el comportamiento dinámico de los suelos de diversos sitios de Turquía, concluye que la pérdida de rigidez que sufre el suelo, está en función del índice de plasticidad, es decir que dos suelos del mismo origen geológico pero con diferentes grado de meteorización presentan deformaciones de cedencia diferentes.

El objetivo de este trabajo es hacer un aporte en el conocimiento del comportamiento ante sollicitaciones cíclicas de los suelos residuales, donde el objeto principal es determinar la deformación de cedencia para los suelos estudiados, y determinar el efecto de la microestructura en su comportamiento.

El procedimiento seguido en esta investigación constó de tres etapas: en la primera etapa se realizaron ensayos de clasificación física de las muestras y estudio de la fábrica, donde se determinó la composición mineralógica y microestructural de los especímenes. La segunda etapa correspondió a la caracterización dinámica de los suelos y por último en la tercera se estudió el efecto en la microestructura de los suelos sometidos a ensayos dinámicos, con el objeto de tratar de establecer el efecto de la aplicación de la carga cíclica en la microestructura.

2. LOCALIZACIÓN Y ENTORNO GEOLÓGICO DE LA ZONA

El área de estudio se sitúa en el sur oriente del Departamento de Antioquia, en el Valle del Aburrá, en el Municipio de Sabaneta. Esta zona se ubica en la unidad geomorfológica Cm-Ca que corresponde a las colinas medias a altas, modeladas en el perfil de meteorización del Esquisto Cuarzo- Micáceo (Figura 1). De acuerdo con la información de la geología de la zona se espera que los minerales de mayor participación presentes en los suelos sean el cuarzo y moscovita.

Del perfil de meteorización se escogió el suelo residual y el saprolito, clasificación acorde con Geotechnical Control Office de Hong Kong (1988). Las muestras se extrajeron de dos apiques, las del suelos residual en las coordenadas planas "Origen Bogotá" N 1'171059- E 830.389 a una profundidad de 4.0 m y las muestras del saprolito en la coordenada N 1'171076- E 830.453 a una profundidad de 9,0 m.

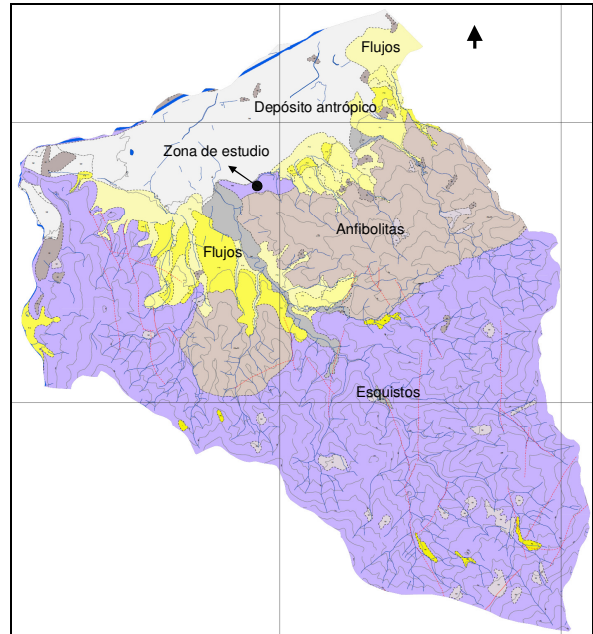


Figura 1. Mapa geológico de la zona de estudio

3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS

La clasificación primaria de los suelos que se hizo mediante los ensayos de humedad natural (ASTM D2216-92), peso específico de los sólidos (ASTM D854-92), límites de Atterberg (ASTM D4218) y análisis granulométrico (ASTM D422). Los resultados de límites se muestran en la grafican en la Tabla 1. Como es de esperarse y de acuerdo con el grado de meteorización las propiedades índices varía, el suelo residual tiene un porcentaje de finos (pasa T # 200) muy superior al saprolito.

Tabla 1. Resultado de Clasificación

LÍMITES DE CONSISTENCIA	SUELO RESIDUAL		SAPROLITO		
	APC 1	APC 2	APC 4	APC 5	APC 6
Límite líquido (%)	57,00	52,00	31,00	32,50	28,50
Límite plástico (%)	36,00	36,00	28,00	27,30	25,30
Índice de plasticidad	21,00	16,00	3,00	5,20	3,20
Pasante malla 200 (%)	96,28	95,46	39,88	59,37	49,55
Clasificación unificada	MH	MH	ML	ML	ML
Humedad (%)	29,3	27,82	15,26	25,44	18,01

Se analizaron muestras de la roca original, el saprolito y el suelo residual mediante la técnica de Difracción de Rayo X para determinar la composición mineralógica. La roca está compuesta principalmente por Cuarzo y Moscovita, en el Saprolito persiste la existencia de Cuarzo, Moscovita, Biotita y se empiezan a desarrollar las Caolinitas. En el suelo residual se preserva el cuarzo, se generan Caolinita y disminuyen la Biotita y la Moscovita.

Finalmente, los análisis realizados con microscopio óptico, (ver Figuras 2 y 3) además de corroborar la composición mineralógica obtenida de la DRX, presentan la textura y mayor información sobre la estructura los

suelos. De acuerdo con lo observado en el microscopio óptico, se tiene que los suelos estudiados son originarios de una roca metamórfica con orientación clara, oxidada, con cuarzo predominante. El saprolito se define como suelo color café claro de tamaño de arena con un contenido importa de fragmentos de cuarzos y el suelo residual es masivo y de matriz arcillosa.

En la roca el porcentaje de fragmentos (cuarzo, moscovita) es del 75%, en el saprolito es del 44% y se genera una matriz que corresponde al 56% (arcillas y limonitas) y en el suelo residual el porcentajes del fragmentos es del 7% y el de matriz del 93%.

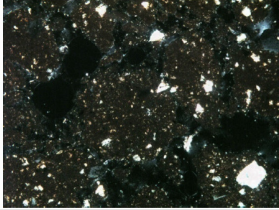
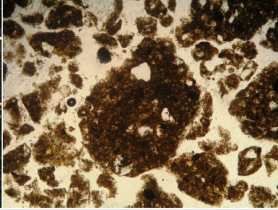
SUELO RESIDUAL			
Minerales Principales			
	%		%
Fragmentos	7,0	Matriz	93
Cuarzo	4%	Aspecto masivo, color rojizo, aunque con luz reflejada es de color amarillo, lo que implica que su composición predominante es limonita.	
Plagioclasas	2%		
Fragmentos de Roca	Tr		
Minerales Opacos	Tr		
Descripción Macroscópica			
Suelo residual rojizo amarillento (5YR 6/4), arcilloso, masivo.			
			

Figura 2. Suelo Residual (Microscopio óptico-Aumento de 20X)

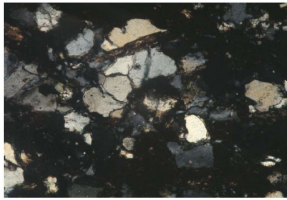
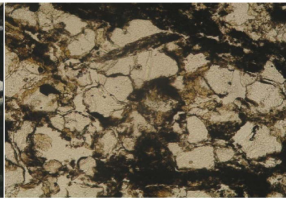
SAPROLITO			
Minerales Principales			
	%		%
Fragmentos	44,0	Matriz	56,0
Cuarzo	42,0	Arcillas	27,0
Mica	Tr	Limonita (Óxido de hierro hidratado amorfo)	29,0
Circón	Tr	Materia Orgánica	Tr
Plagioclasa	Tr		
Descripción Macroscópica		Análisis Microscópica	
Suelo alterado de colores café claro (5yr 5 / 6) a café moderado (5yr 4/4) con venillas de espesores milimétricos de materia orgánica, oxidada, deleznable, tamaño arena.		Textura: Clástica, tamaño de grano promedio: 0,2 mm alcanzado hasta tamaños hasta de 0,4 mm. Mal seleccionada y de formas subangulares a subredondeados. Estructura: Hay ligera orientación de granos pero no es estratificación.	
			

Figura 3. Saprolito (Microscopio óptico-Aumento de 20X)

4. PROPIEDADES DINÁMICA DE SUELOS Y DEFORMACIÓN DE CEDENCIA

Con el objeto de conocer el comportamiento del suelo ante cargas cíclicas, se realizaron, ensayos de columna resonante y triaxial cíclico, en muestras inalteradas. Los ensayos se realizaron sobre dos muestras inalteradas en el suelo residual y tres muestras en el saprolito. La curva de degradación del módulo describe la variación del módulo de corte con la deformación angular. Esta curva es

normalizada con respecto a la rigidez máxima (G/G_{max}) y depende, además de los factores que afectan el módulo de corte, de la velocidad y forma de la carga (cíclica o monotónica).

El modelo hiperbólico utilizado en esta investigación fue propuesto por Otálvaro (2005) y corresponde a una modificación del modelo propuesto por Hardin & Drnevich (1972), el cual presenta una similitud considerable en la forma con el modelo propuesto por Van Genuchten (1980) para la curva característica humedad-succión del suelo. El modelo es descrito por la ecuación 1:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_y}\right)^n\right]^m} \quad [1]$$

Donde:

- γ_y : nivel de deformación por cortante donde empieza la pérdida de la estructura y el suelo comienza un comportamiento inelástico.
- n : parámetro de ajuste que controla la tasa con la cual ocurre la pérdida de rigidez del suelo con el incremento de la deformación por cortante.
- m : parámetro de ajuste que controla la pérdida de rigidez del suelo a grandes deformaciones.

La variación de la fracción de amortiguamiento con el nivel de deformación se ajustó mediante el modelo hiperbólico propuesto por Romo en 1987. La ecuación para determinar la fracción de amortiguamiento crítico (ecuación 2) es función del γ_m (deformación de referencia) obtenido del ajuste de G/G_{max} . El amortiguamiento mínimo (β_{min}), para deformaciones muy pequeñas ($1 \times 10^{-4}\%$) controla la tendencia de la curva hasta la deformación de referencia (γ_m) y el amortiguamiento máximo (β_{max}), limita el crecimiento de la curva para valores mayores a γ_m y equivale al amortiguamiento para una deformación teórica de 100%.

$$\beta = \beta_{min} + \frac{\frac{\gamma}{\gamma_m}}{\frac{1}{\beta_{min}} + \frac{\gamma}{\beta_{max} - \beta_{min}}} \quad [2]$$

Las curvas de degradación se muestran en la Figura 4 y la Figura 5.

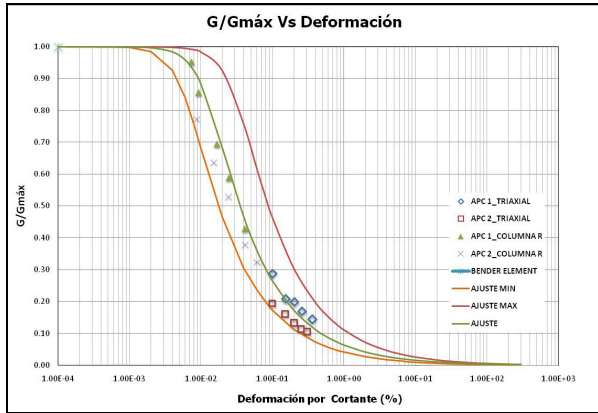


Figura 4. Curva de degradación del suelo residual

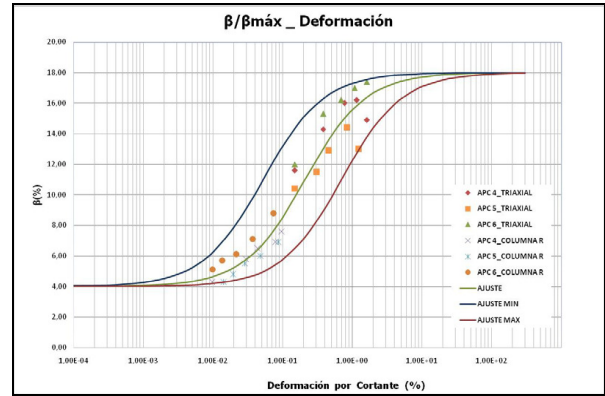


Figura 7. Curva de amortiguamiento del saprolito

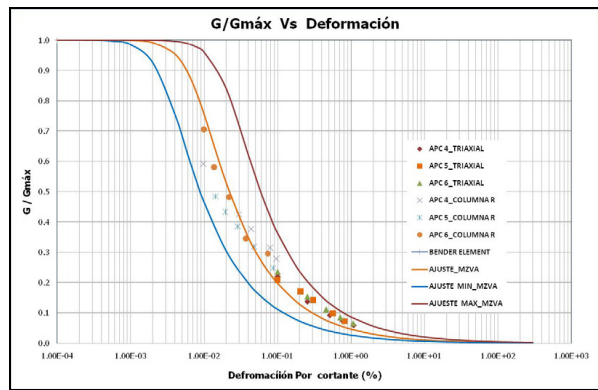


Figura 5. Curva de degradación del saprolito

Umbral de deformación

De acuerdo con Okur et al (2005), los umbrales de deformación elástico y viscoplastico tienen la forma de la ecuación 3 y 4. Estos umbrales, como sus nombres los expresan, indican hasta que deformación el suelo presenta un comportamiento elástico y plástico respectivamente.

$$\gamma^E = \frac{0.035}{1 + 11.92 \exp(-0.11IP)} \quad [3]$$

$$\gamma^P = \frac{1}{1.39 - 0.33IP^{0.28}} \quad [4]$$

Las curvas de fracción de amortiguamiento crítico se muestra en de acuerdo con los planteamiento mostrados se muestran de la Figura 6 y la Figura 7.

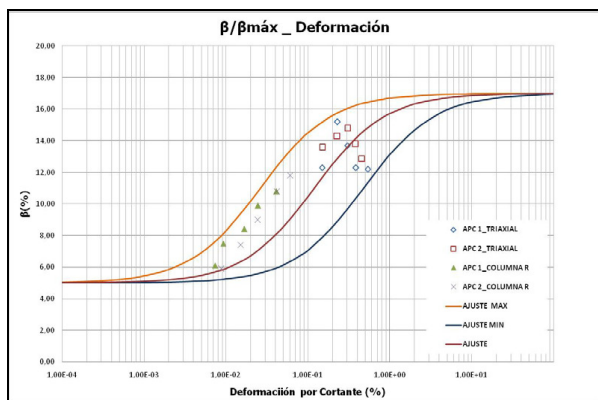


Figura 6. Curva de amortiguamiento del suelo residual

El valor de índice de plasticidad a utilizar será el promedio de los obtenidos (ver Tabla 1). Mediante la aplicación de estas ecuaciones, se obtienen los umbrales de deformaciones para el suelo residual y el saprolito. Los valores obtenidos se compararon con la deformación de cedencia (γ_y) obtenida mediante el concepto que corresponde a la zona donde se incrementa súbitamente la pérdida de rigidez (Otálvaro 2005, Betancur (2006) y Sanin(1999)). Los resultados muestran que el método de Okur, sobreestima la deformación de cedencia especialmente en el suelo residual, para el saprolito hay una mejor coincidencia, debido al menor valor del IP obtenido en estos materiales.

Tabla 2. Umbrales de deformación según Okur(2005)_Suelo Residual

IP	γ ^E (%)	γ ^P (%)
18,5	1,22E-02	1,55

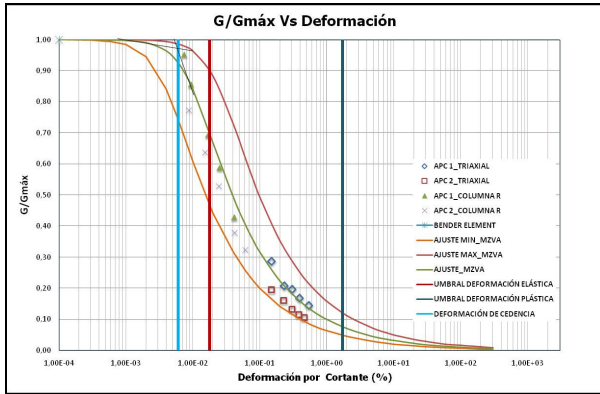
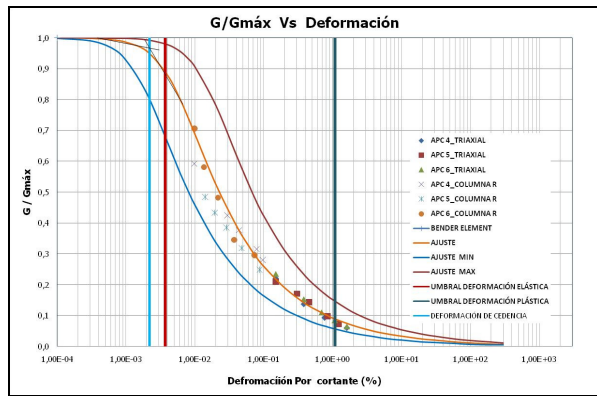


Figura 8. Umbrales de deformación _ Suelo Residual

Tabla 3. Umbrales de deformación según Okur(2005)_Saprolito

IP	γ^E (%)	γ^P (%)
3.8	3,82E-03	1,1E+00



5. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL POST-ENSAYOS DINÁMICOS

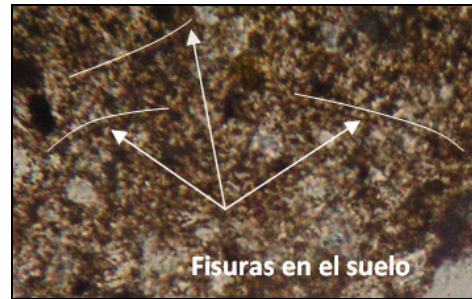
Una vez realizados los ensayos cíclicos se hicieron observaciones microscópicas de la microestructura de los suelos, con el objeto de determinar la presencia de deformaciones o cualquier alteración que se genere en la micro-estructura producto de los ensayos realizados, en el suelo residual y en el saprolito.

Suelo Residual

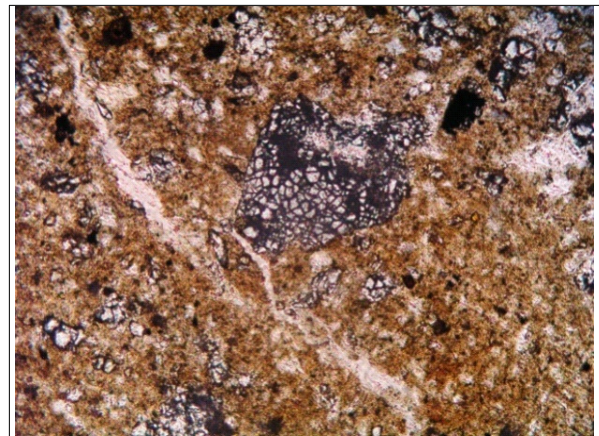
En las muestras que fueron sometidas al ensayo de la columna resonante, se observó que en la matriz existen evidencias de deformaciones que se reflejan en microfisuras (Fotografía 1). Sin embargo, el mineral más deteriorado fue el cuarzo, es evidente su fracturación. El hecho que la matriz presente menos afectación que el cuarzo se debe a que la matriz está compuesta principalmente por minerales producto de la meteorización de la moscovita, que se comporta como un material

plástico, y puede absorber deformaciones de grandes magnitudes sin fallar, cuando los esfuerzos son transmitidos de manera perpendicular a la laminación que ésta presenta, como ocurre en este caso.

De acuerdo con lo observado, se infiere que cuando los esfuerzos son transmitidos, la parte más rígida de la estructura del suelo es quien termina soportándolos y es en donde se observa la mayor afectación. Esto quedó demostrado en las fotografías tomadas en el microscopio óptico (Fotografía 2).



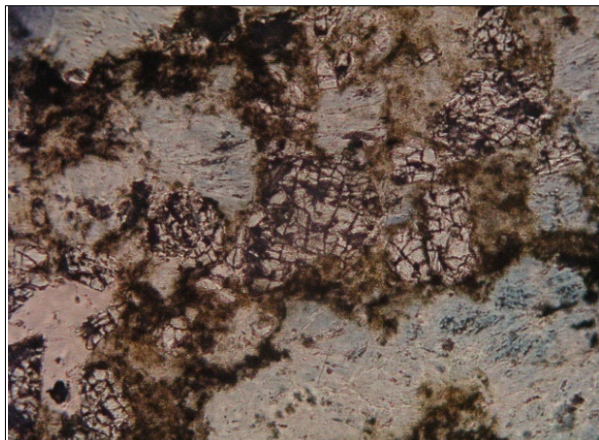
Fotografía 1. Microfisuras cortas _ Suelo Residual (Microscopio óptico-Aumento de 20X)



Fotografía 2. Post Ensayos dinámicos _ Suelo Residual (Microscopio óptico-Aumento de 20X)

Saprolito

En el Saprolito el mayor componente corresponde a fragmentos de cuarzo. En la observación realizada en el microscopio óptico sobre muestras sometidas al ensayo de triaxial cíclico, se observan fragmentos de cuarzo altamente fracturados, los cuales tienden a disgregarse por los planos de debilidad que se generaron cuando el suelo fue sometido a esfuerzos mayores.



Fotografía 3. Post Ensayos dinámicos – Sapolito (Microscopio óptico-Aumento de 20X)

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos, se concluye que a mayor índice de plasticidad, más grande es el rango elástico del suelo, situación que se reportó tanto para el umbral de obtenido mediante las ecuaciones de Okur como por umbral de cedencia, así como el hecho que el suelo presente menor índice plasticidad hace que tenga un intervalo de comportamiento plástico más amplio y de igual forma se alcance a más temprana deformación, el umbral de deformación plástica. El umbral de deformación elástica en el suelo residual es del orden de $6E-03\%$, pero mediante la ecuación de Okur, se obtuvo $1,77E-02\%$ de umbral elástico. En el sapolito la diferencia entre el umbral elástico calculado ($3,69E-03\%$) y real ($2,2 E-03\%$) es menor. Se puede concluir que el umbral elástico propuesto por Okur, muestra un valor más acertado para el sapolito que para el suelo residual, debido a la menor plasticidad de los sapolitos.

De acuerdo con Okur y otros investigadores antecesores a éste, la deformación de cedencia tiene una relación directa con el índice de plasticidad. En el suelo más rígido, en este caso específico el sapolito, la deformación de cedencia puede alcanzarse a más temprana deformación, así como los umbrales plásticos; sin embargo, los análisis microestructurales evidenciaron que para los suelos estudiados los umbrales de deformación de Okur no son representativos del comportamiento debido a que los suelos presentaron deformaciones importantes (fisuras) antes de alcanzar el umbral elástico definido por este autor, donde se supone que el suelo no ha alterado su microestructura.

Los resultados indican que el rango elástico de estos suelos (suelos residuales y sapolito), donde no se alcanzan a desarrollar roturas de las partículas, está por debajo de deformaciones del orden de $5.50 \times 10^{-2}\%$. Se concluye lo anterior porque a partir de esa deformación el suelo ya sufre afectaciones de la estructura.

7. CONCLUSIONES

Los suelos estudiados en esta investigación se derivan de la meteorización de las rocas esquistosas del norte de Sabaneta, estas rocas están compuestas principalmente por cuarzo y moscovita, la acción de la meteorización en los perfiles estudiados, se refleja en la composición mineralógica. En el Sapolito persisten grandes fragmentos de cuarzo y se alcanza a observar en algunos sitios moscovitas. En el suelo residual se observan fragmentos de cuarzoes de tamaño muy inferiores a los que se observaron en el Sapolito, en este caso la matriz es la fase predominante de la masa de suelo.

Los análisis micro estructurales demostraron que es evidente que existe una diferencia entre el suelo residual y el sapolito, que permite ser correlacionada con el comportamiento del suelo. Como punto de partida se realizaron pruebas índices. Las muestras de sapolito presentaron índice de plasticidad en el rango entre 2% y 5%, las muestras extraídas del suelo residual el intervalo estuvo entre 16.5 y 39%. La importancia de este índice es que se ha asociado con el comportamiento dinámico de los suelos y que es un reflejo de la mineralogía presente en él. Los minerales como las caolinitas y los óxidos de hierro que se generan en el suelo residual, forman una estructura de poros muy grandes, que los hace más compresibles y más deformables, lo que se traduce en un horizonte más plástico.

Al ajustar los datos obtenidos de los ensayos cíclicos con la propuesta por Otálvaro (2005) dentro del marco de la Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá, se observa que el sapolito presenta mayor rigidez que el suelo residual y menor amortiguamiento, así mismo se obtuvo una correlación superior al 90% lo que indica que esa curva hace una representación adecuada del comportamiento dinámico de los suelos residuales.

Analizando los resultados obtenidos en esta investigación, se observa en la curvas de degradación de los suelos estudiados, que para un mismo nivel de deformación el suelo residual presenta una mayor rigidez normalizada que el sapolito.

Haciendo la comparación de los umbrales obtenidos con las ecuaciones propuestos por Okur, se concluye que éstas ecuaciones no son representativas para los suelos residuales de la roca metamórfica estudiada en esta investigación. Los umbrales propuestos por Okur presentaron un valor más acertado para suelos poco meteorizados (bajos índices de plasticidad) como los sapolitos. Las deformaciones de cedencia que se definieron como zona donde el suelo sufre una pérdida abrupta de la rigidez hacen una mejor representación del comportamiento del suelo.

El grado de alteración microestructural que presenta el suelo es el factor más decisivo para determinar el comportamiento del suelo cuando es sometido a esfuerzos cíclicos. Estos se concluye porque los suelos aquí estudiados presentaron planos de debilidad en los minerales más rígidos, es decir la mineralogía determino las superficies de falla.

En esta investigación se comprueba que existe una destrucción de la estructura del suelo cuando es sometido a

esfuerzos cíclicos, aunque no queda claro en que deformación exactamente se empieza a presentar esta destrucción.

AGRADECIMIENTOS

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín en especial *Al laboratorio de Suelos y de Caracterización de Materiales de la Universidad Nacional. Al laboratorio de Suelos, Concretos y Pavimentos de la Universidad EAFIT.*

REFERENCIAS

- BETANCUR, G.A. (2006). Caracterización dinámica de suelos residuales en el Stock de Altavista. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- CONSORCIO MICROZONIFICACIÓN 2006 (2009). Microzonificación sísmica detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.
- DOBRY, R. (1998). Informe de asesoría estudio de Instrumentación y Microzonificación Sísmica de Medellín. Reporte interno al Grupo de Sismología de Medellín, Diciembre de 1998.
- DOBRY, R. ; VUCETIC , M. (1987). State-of-the-art report: Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits. Proceedings International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Ciudad de México, Vol. 2.
- DOBRY, R. ; VUCETIC M. (1991). Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117(1).
- GEOTECHNICAL CONTROL OFFICE. CIVIL ENGINEERING SERVICES DEPARTMENT HONG KONG. (1988). Geoguide 3. Guide to rock and soil descriptions. 1ª Ed.
- GRUPO DE SISMOLOGÍA DE MEDELLÍN. (2005). Microzonificación sísmica de los Municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el Valle de Aburrá. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- HARDIN, B. (1978). "The nature of stress-strain behavior for soils." Proc., ASCE Geotech. Engrg. Div. Specialty Conf. On Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol. 1, pp. 3-90.
- HARDIN, B. O. ; DRNEVICH, V. P. (1972). Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 98 (SM6), pp. 603-624.
- HARDIN, B. O., ; BLACK, W. L. (1968). Vibration modulus of normally consolidated clay. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 94 (2), pp. 353-369.
- JAIME, A. ; ROMO, M. P. (1987). Degradación del módulo de cortante en arcillas del Valle de México. Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Querétaro, México, E 31-44.
- OKUR, D.V. ; ANSAL A.(2007). Stiffness degradation of natural fine grained soils during cyclic loading. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 27, pp. 843–854.
- OTÁLVARO, I.F. (2005). Caracterización de la respuesta dinámica del sitio del gabro de Medellín. Tesis para optar el título de M.I.G. Universidad Nacional de Colombia.
- SANÍN, M. V. (1999) Comportamiento dinámico de algunos suelos del área urbana de Medellín.TDG, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- VAN GENUCHTEN, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, pp. 892-898