

Caracterización mecánica de coluviones arcillosos de la formación Chipaque

Mechanical characterization of coluvial deposits derived from the Chipaque formation

Jorge A. Rodriguez O.

*Ingeniero Civil, MSCE, PhD. Director, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad
Javeriana Bogotá (PUJ)*

Lina Andrea Morales.

Ingeniero civil, PUJ

Resumen

Se presentan los resultados de una amplia recopilación de datos de propiedades mecánicas de suelos arcillosos residuales o coluviales de la formación Chipaque obtenidos de estudios geotécnicos realizados en el campo Guandó, al oriente de Melgar, Tolima. La información recopilada incluye ensayos de campo (SPT principalmente) clasificación y ensayos de corte directo. Estos se complementaron con ensayos triaxiales y de corte directo realizados para el presente estudio. La información analizada permitió identificar la tendencia general de variación de las propiedades de estos suelos en función del grado de meteorización y su relación con la profundidad. También se estableció una relación entre la resistencia y el estado del material en términos de condición de preconsolidación y relación de vacíos. Se aprecia la gran variación de la resistencia en función del tipo y estado del material, así como un comportamiento frágil en la movilización de la resistencia a bajas deformaciones, especialmente en la reactivación de fallas preexistentes. La información analizada es útil para la selección de parámetros y la evaluación de estabilidad de laderas en este tipo de materiales.

Abstract

Soil data from a large number of studies in the Guandó oil field was compiled and analyzed. The area correspond mainly to clayey coluvial deposits derived from the Chipaque Formation, in the area east to the town of Melgar, Tolima. Data gathered includes SPT, soils classification data, and results from direct shear and triaxial compression tests. The general trend of variation with depth of the soil properties as they vary with the degree of weathering was obtained. A relationship was developed relating the state of the material in terms of void ratio and its strength. This soils show a wide range of variation of strength and a fragile behavior showing peak strength that is mobilized at low strains. The data is important to evaluate the behavior of soil slopes in these materials and the relations with the instability processes that are very common in this type of soils.

1 INTRODUCCION

La formación Chipaque se encuentra aflorando a lo largo de los flancos de la Cordillera Oriental de Colombia, por lo que las condiciones geotécnicas asociadas con esta formación, o formaciones de características similares, afectan una buena cantidad de municipios, vías e infraestructura petrolera y energética entre otros. Estas rocas, de edad Cretácica, se formaron en ambiente marino y están constituidas principalmente por arcillolitas con algunas intercalaciones de areniscas. Son rocas que se meteorizan muy fácil y rápidamente y producen suelos arcillosos de baja resistencia y muy susceptibles a cambios de humedad. Debido a la actividad tectónica del área las rocas presentan un alto grado de fracturamiento y una orogenia muy

intensa. Por esta razón la topografía es en general de pendientes fuertes que favorecen el transporte en masa de los suelos arcillosos dando lugar a coluviones arcillosos muy extensos que son los materiales sobre los que finalmente se emplazan las obras y las poblaciones. Las condiciones hidrogeológicas, determinadas por la pendiente de los estratos, la estratificación, y las condiciones hidrológicas se constituyen en un factor determinante de la forma como se producen los procesos de inestabilidad.

Los problemas de inestabilidad asociados con este tipo de situaciones son bastante frecuentes y de alto impacto. Solo en el departamento de Cundinamarca se pueden mencionar problemas de este tipo en proyectos hidroeléctricos como El Guavio, Chivor y Mesitas del Colegio. Municipios que son afectados por grandes problemas de

estabilidad como Tena, Villeta, Albán, San Juan de Rioseco, Caparrapí, Yacopí, Pacho, La Palma, Cáqueza y Gachetá entre otros, y proyectos de infraestructura petrolera, como los campos de Guando y Guaduas, y el poliducto Puerto Salgar - Bogotá.

Los procesos de inestabilidad se deben a las características de suelos y rocas que se tienen en la zona. Esta condición favorece el flujo de aguas subterráneas, las cuales influyen de dos maneras: en primera instancia ejercen una presión considerable sobre el contacto depósito-roca, disminuyendo de esta manera la resistencia al corte de los materiales y en segundo lugar el reblandecimiento causado por el aumento en la humedad de los materiales arcillosos, tanto en la roca como en la matriz del depósito, produce una disminución en la cohesión de los mismos, favoreciendo la inestabilidad del terreno (Rodríguez, 1999, Rodríguez y Barragán, 2004).

Dada la importancia del problema se hizo un estudio para la caracterización de las propiedades de los suelos que intervienen en los procesos de inestabilidad en los coluviones de la formación Chipaque, utilizando como información de base estudios realizados para este tipo de problemas en el campo petrolero de Guandó, al oriente de Melgar.

2 GEOLOGIA

La Formación Chipaque fue referenciada originalmente por Hubach en 1931 y descrita por el mismo autor en 1957. Aflora en grandes áreas de los flancos de la cordillera oriental colombiana. La Formación Chipaque está constituida por una secuencia de lutitas grises oscuras a negras, carbonosas, piritosas y laminadas, en bancos hasta de 10 m de espesor, con intercalaciones de areniscas cuarzosas, de grano fino a medio, en estratos de 0,2 a 0,8 m de espesor, y calizas arenosas, principalmente hacia la parte intermedia, en estratos de 0,05 a 1,0 m de espesor.

La Formación Chipaque presenta un espesor variable entre 130 y 1300 m, el cual para la parte aflorante en el anticlinal de Bogotá, es 130 m y, para el anticlinal de Cheba, de 205 m (Caro & García, 1988). El espesor total de la formación hacia el sur del área (sector de Chipaque) varía entre 400 y 500 m (Renzoni, 1968), mientras que para la parte noroccidental, el espesor total sobrepasa los 1.300 m (Lobo Guerrero, 1992). La unidad se depositó en un ambiente marino poco profundo y se considera de edad Coniaciano - Santoniano.

3 PERFILES DE SUELOS RESIDUALES DE ARCILLOLITAS

Una revisión de la literatura indica que la información sobre perfiles de meteorización está diseminada y es aún muy incompleta. Blight (1997) reporta que los suelos residuales se forman más comúnmente de rocas ígneas y metamórficas pero que los de rocas sedimentarias también son comunes. Sin embargo a estos últimos no se les ha prestado mucha atención, a pesar de que estos son la principal fuente de suelos arcillosos en la tierra (Potter et al., 1980) y las rocas sedimentarias están ampliamente distribuidas en América y Europa.

Generalmente se acepta que tanto la roca parental como las condiciones ambientales juegan roles importantes en la formación de suelos residuales. Además se ha sugerido que su importancia relativa es función del tiempo (Macias y Chesworth, 1992; Righi y Meunier, 1995), con las características parentales dominando los suelos jóvenes, y las condiciones ambientales (clima y vegetación en particular) tomando más importancia relativa si el tiempo de meteorización aumenta. En el caso de los suelos Colombianos la pendiente topográfica juega un papel importante debido a que en zonas de alta pendiente, muy por encima de la que pueden soportar los suelos arcillosos reblandecidos o saturados, predominan suelos residuales de reciente formación en el marco de procesos muy activos de denudación por fenómenos de remoción en masa. En zonas de baja pendiente los espesores de meteorización son mucho mayores pues el tiempo permite el avance del proceso de meteorización en profundidad.

El proceso de formación de suelos en el tiempo incluye la formación transformación y liberación de arcillas. Millot (1970) reconoce que los minerales arcillosos pueden ser alogénicos (heredados durante el proceso de formación del suelo), o autigénicos (formados en el suelo), y que las arcillas autigénicas se pueden transformar a partir de filosilicatos de diferente mineralogía heredados (lo cual puede resultar como consecuencia de difusión de partículas sólidas), o formados por precipitación de minerales en solución (neoformación). Las arcillas en suelos residuales derivados de rocas cristalinas tienden a ser predominantemente autigénicas y no tienen oportunidad de que se hereden o transformen arcillas pre-existentes. Por el contrario suelos derivados de rocas sedimentarias pueden contener arcillas de ambos orígenes pero la mayor parte tienden a ser heredadas (a menos que el suelo sea muy antiguo ya que los procesos de difusión son

muy lentos). Las características mineralógicas de suelos derivados de rocas de grano fino son las más difíciles de evaluar pues estos tienen el potencial de contener minerales de cualquier origen.

Fityus y Smith (2004) presentan resultados de caracterización detallada de un perfil residual de suelos arcillosos en Maryland, Australia, derivados de la meteorización in situ de rocas arcillosas (limolitas o arcillolitas) laminadas (Hawkins and Pinches, 1992). Estas rocas son de edad Pérmica tardía formadas en facies continentales a terrestres. Las condiciones locales son de clima costero moderado en Australia, con precipitación de 1000 a 1200 mm/año. El perfil de meteorización de Maryland reportado por Fityus y Smith se presenta en la Figura 1.

DEPTH (m)	USCS Description	Soil Profile Description	Soil Horizons
0.0	(CL) sandy silty CLAY, dark brown	topsoil: dark and organic in upper 100mm, becoming pale with depth, low plasticity	A1 and A2 horizons
0.5	(CH) silty CLAY, high plasticity, pale orange-brown becoming	homogenous, residual clay, no relict rock structure, desiccated when dry, shrinkage cracks coated with silty/sandy topsoil material	B horizon
1.0	mottled pale brown/grey with some red-orange staining	some development of thin ironstone bands mats of tightly packed roots in thin cracks	
1.5	(CL-CH) silty CLAY, medium to high plasticity, pale grey-brown with some iron staining (some residual rock structure)	relict rock structure evident in undisturbed soil, but remolds readily to clay with little effort, no roots or desiccation cracks.	C horizon
2.0	SILTY CLAY/EXTREMELY WEATHERED SILTSTONE brown grey, laminated	Extremely weathered siltstone rock; brown-grey, may still be parted along original laminations, crumbles when remoulded	weathered rock
2.5	HIGHLY WEATHERED SILTSTONE light and dark grey laminations	Highly weathered siltstone rock; original colour still evident in light and grey laminations	
3.0			

Figura 1 – Perfil de meteorización de Maryland, tomada de Fityus y Smith (2004)

Se nota que la meteorización produce un perfil transicional sin cambios claros distinguibles de horizontes, y del orden de 3 m de espesor. Se aprecia como cambia la plasticidad de los suelos arcillosos aumentando con el grado de meteorización. En la Figura 2 se muestra la variación de los parámetros de clasificación, el potencial de expansión y la capacidad de intercambio catiónico. Una característica importante de estos suelos es que normalmente se encuentran parcialmente saturados y tienen altas presiones de succión que determinan de manera importante su comportamiento mecánico en cuanto a rigidez, resistencia y expansibilidad. En la Figura 3 se presenta la variación de la presión de succión medida con un psicrómetro de transistores con la humedad del suelo en donde se aprecia un aumento significativo de la succión al disminuir la humedad lo cual tiene un alto impacto en el comportamiento del suelo, tanto desde el punto de vista de potencial de expansión como de resistencia. Los análisis mineralógicos de este

perfil de suelo mostraron muy pocos cambios a excepción de la reducción del contenido de potasio y aumento de carbono hacia la superficie. Las diferencias de comportamiento en perfil parecen estar más asociadas a la desagregación de la roca que a cambios mineralógicos.

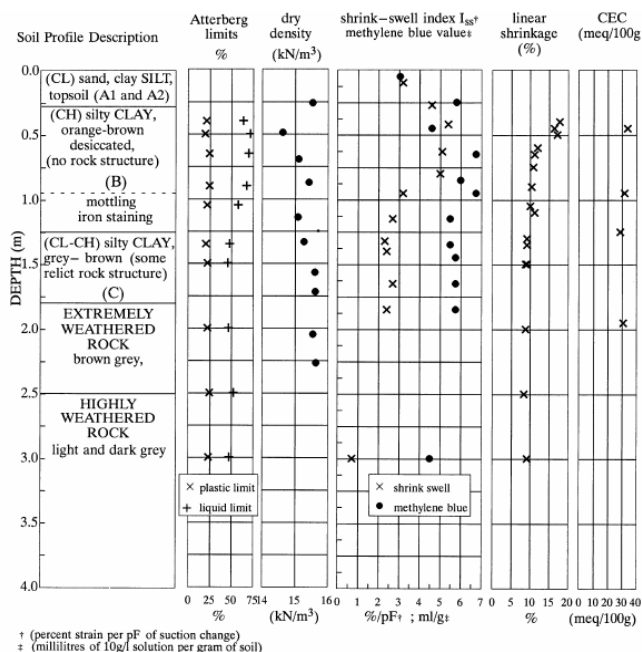


Figura 2 – Propiedades de suelos residuales de Maryland, tomada de Fityus y Smith (2004)

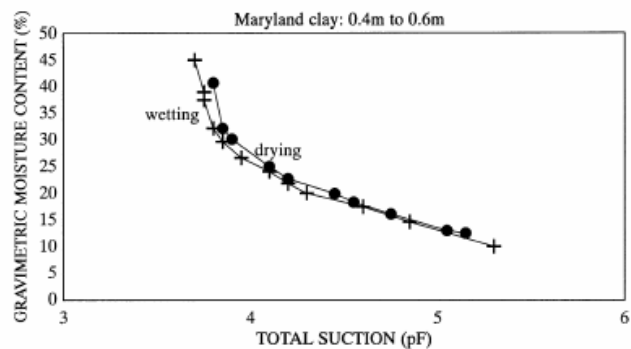


Figura 3 – Presión de succión del suelo residual de Maryland, tomada de Fityus y Smith (2004)

4 ESTADO DE LOS SUELOS EN EL TERRENO

Morales (2005) recopiló la información geotécnica de 14 estudios para explanaciones en el área de estudio, varias de estas correspondieron a casos donde se han presentado problemas de inestabilidad. Las muestras corresponden a suelos residuales in situ o coluviales derivados de las rocas arcillosas de la formación Chipaque en el área de estudio. La información se presenta en general con el propósito de tener una visión del espectro de valores de parámetros geotécnicos de

clasificación de suelos, estado y resistencia, y su variación general con la profundidad con el fin de establecer patrones generales de comportamiento.

La información provino principalmente de sondeos con ensayos de penetración estándar en los que se obtuvieron muestras alteradas y se realizaron ensayos de clasificación. También se contó con algunos resultados de ensayos de corte directo.

En la Figura 4 se presentan los resultados de plasticidad en la carta de plasticidad. Se aprecia que la mayoría de las muestras clasifican como arcillas, con un amplio rango de variación de plasticidad. Esto puede ser indicio de que se tienen diferentes tipos de arcillas, o que la arcillolita ha sufrido diferente grado de desagregación que hace que se obtengan diferentes valores de plasticidad. Dentro del estudio no se realizaron análisis de mineralogía, por lo que no fue posible discernir con certeza este interrogante. Sin embargo los resultados de las figuras 5 y 6 muestran la variación con la profundidad tanto de los límites de consistencia como de la relación de vacíos.

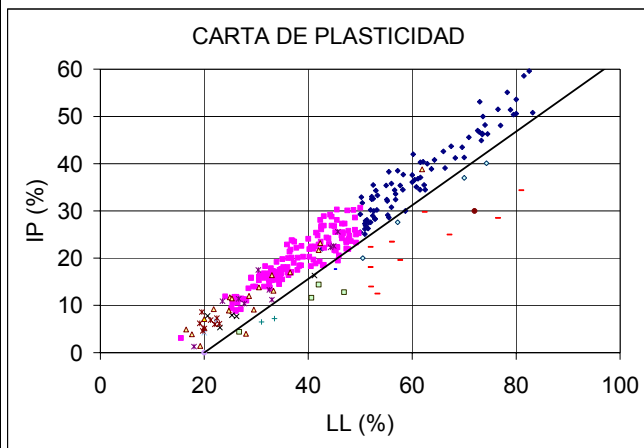


Figura 4 – Carta de plasticidad para los suelos del área.

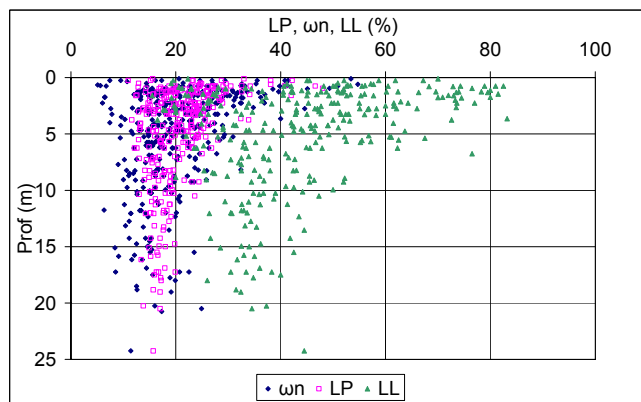


Figura 5 – Distribución de los límites de consistencia y la humedad natural con la profundidad

En dichas figuras se aprecia una clara tendencia de disminución de la plasticidad, la humedad natural y la relación de vacíos con la profundidad. Esto es indicativo del desarrollo de un perfil de meteorización en el que cerca de la superficie el material se encuentra más desagregado. Como ya se indicó, en la zona se tienen condiciones de topografía de pendiente relativamente fuerte con respecto a la resistencia reblandecida o residual de estos suelos, así como una alta precipitación. Los fenómenos de remoción en masa son muy frecuentes en la zona y por lo tanto se considera que los suelos son relativamente jóvenes y los cambios de plasticidad, como en el caso reportado por Fityus y Smith (2004) no son debidos a cambios químicos sino físicos.

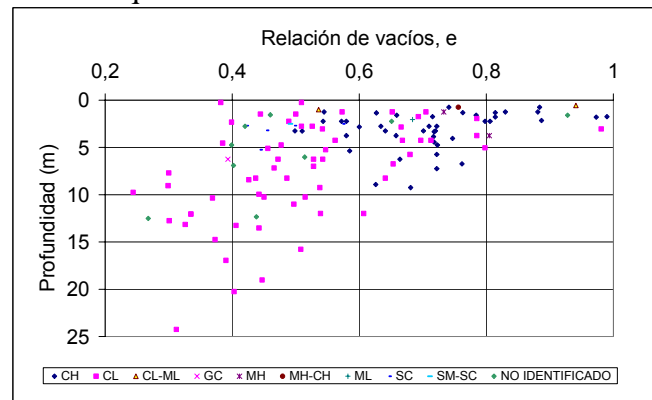


Figura 6 – Distribución de la relación de vacíos con la profundidad

En las figuras 7 y 8 se presenta la variación de resistencia medida en los ensayos de corte directo en función de la profundidad y en función de la humedad respectivamente. Prácticamente todos los datos corresponden a resistencia en condiciones no drenadas de suelos parcialmente saturados. Sólo para humedades del orden de 35% o mayores se encuentran estos suelos saturados. Estas condiciones son muy determinantes de la resistencia como se discute más adelante. En la figura 7 se aprecia una tendencia según la cual los suelos desecados superficialmente tienen una alta resistencia que disminuye notablemente con la profundidad hasta unos 5m donde se tienen valores mínimos y luego aumenta bastante de manera más o menos lineal con la profundidad. Esta tendencia está asociada con la presencia de suelos desecados en superficie, en la mayoría de los casos correspondientes a depósitos coluviales que tienen del orden de 5 m de espesor. Los valores mínimos de resistencia corresponden con la base de los depósitos o el contacto con los suelos residuales de la arcillolita, y el posterior incremento de resistencia con la profundidad está asociado con el perfil de suelo residual de las

arcillolitas. Esta variación de la resistencia con la profundidad determina los procesos de inestabilidad en el área que se caracterizan por deslizamientos predominantemente traslacionales del orden de 5 m de espesor reactivados por temporadas de alta pluviosidad, cortes o terraplenes. Esto es indicativo de una situación general marginal de estabilidad de las laderas.

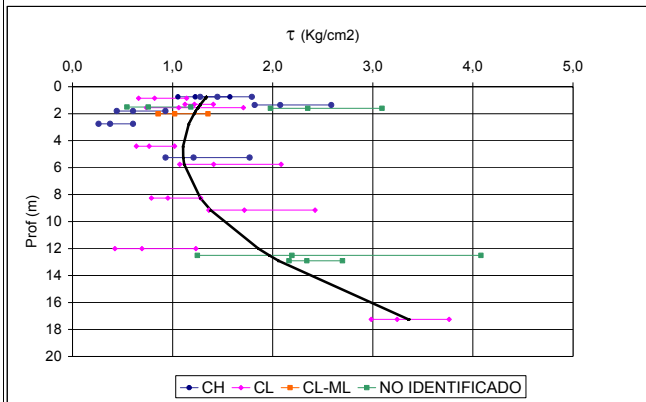


Figura 7 – Resultados de ensayos de corte de directo en función de la profundidad

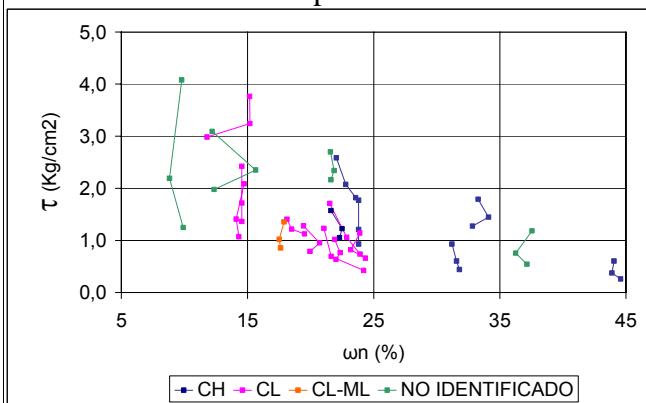


Figura 8 – Resultados de ensayos de corte de directo en función de la humedad

Los resultados de la Figura 8 muestran una clara relación de la resistencia que disminuye de manera significativa con la humedad. Esto se debe fundamentalmente a la reducción de las presiones de succión al saturarse el suelo. Esto tiene una gran ingerencia sobre la forma como se producen o se reactivan los procesos de inestabilidad en el área ya que por efecto de saturación debida principalmente al aumento de la presión en los acuíferos durante períodos de alta pluviosidad o también por saturación superficial, se produce un descenso muy grande de la resistencia que hace que se produzcan fallas en taludes que algún tiempo antes estaban estables.

5 CARACTERIZACIÓN DE RESISTENCIA

Dentro del trabajo de Morales (2005) se obtuvieron dos muestras en bloque de taludes de excavación en plataformas para pozos y facilidades sobre las que se hicieron ensayos de corte directo y compresión triaxial consolidadas isotrópicamente seguidas de etapa de carga en condición no drenada midiendo presiones de poros con el propósito de lograr un mejor entendimiento del comportamiento de estos suelos.

Los ensayos de corte se hicieron reconstituyendo las muestras con diferentes contenidos de agua en el rango encontrado en el terreno. Las muestras se consolidaron inicialmente a una presión de $0,25 \text{ kg/cm}^2$ y se ensayaron al corte hasta un desplazamiento de 2,5 mm. Posteriormente se regresó la caja a su condición inicial y se reconsolidó la muestra a $0,5$ y luego a $1,0 \text{ kg/cm}^2$ repitiendo la fase de corte. Se decidió actuar de esta forma para mantener las condiciones de la muestra y poder comparar más confiablemente los resultados, a pesar de que los procesos de corte sucesivos producen un cambio en la estructura de la muestra. Sin embargo, este cambio no alcanza a ser suficiente para movilizar la resistencia hasta su estado crítico y mucho menos a condiciones residuales en este tipo de suelos, y al regresar la caja a su condición inicial en alguna medida se revierte el efecto.

Los resultados de los ensayos mostraron que el comportamiento fue el de un material bajo carga no drenada y por lo tanto se interpretaron los datos con la teoría correspondiente a este concepto. Lancellota, (1995), Terzaghi et al, (1996) y otros han demostrado, tanto desde el punto de vista empírico así como aplicando los principios de la mecánica de suelos de estado crítico, que la resistencia no drenada de los suelos de baja permeabilidad responde a una relación lineal entre el esfuerzo de corte y el esfuerzo normal normalizados por una presión equivalente efectiva de “preconsolidación” (pe). Esta presión está relacionada con la relación de vacíos del material con respecto a la relación de vacíos en condición de compresión primaria. Por lo tanto la resistencia no drenada del suelo dependerá del estado de esfuerzos y de la relación de vacíos (o de su peso unitario o gravedad y específica y de la humedad). En el caso de los suelos ensayados casi todas las muestras se encontraban parcialmente saturadas por lo que el efecto de la succión mátrica es un componente determinante del comportamiento. Esta succión depende de la humedad o del grado de saturación como se muestra en la Figura 3 a

partir de la información reportada por Fityus y Smith (2004).

En la Tabla 1 se presentan los datos básicos y los resultados de los tres ensayos realizados a cada una de dos muestras de suelo. En las Figuras 9 y 10 se presentan los resultados de esfuerzo cortante movilizado en estos ensayos normalizado por el esfuerzo normal en función del esfuerzo normal y se indican las curvas que corresponden a una misma humedad. En las figuras se indican además los datos de clasificación de estos suelos.

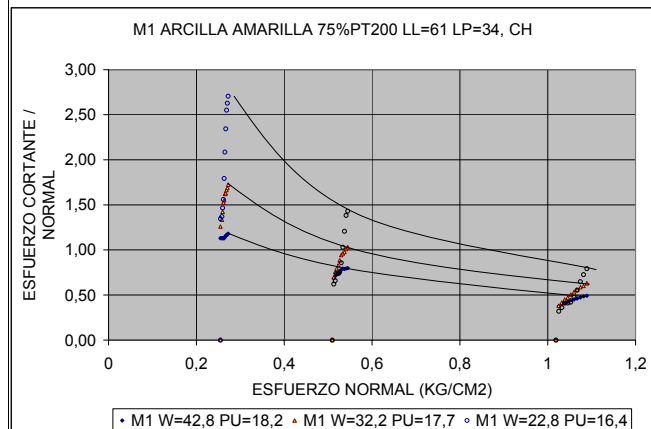


Figura 9 – Resultados de ensayos de corte directo, muestra 1 (Morales, 2005)

Se aprecia una tendencia decreciente de la resistencia normalizada en función del esfuerzo normal, así como una correlación entre los valores

obtenidos de resistencia para los diferentes valores de humedad. Con el propósito de enmarcar este comportamiento con respecto a la teoría ya mencionada de la resistencia no drenada se buscó una presión de normalización, p_e , para cada ensayo de manera que se obtuviera la relación lineal esperada entre la resistencia y el esfuerzo normal. Debido a que las muestras se encontraban parcialmente saturadas se esperaba que esta presión de normalización fuera mayor en la medida que el grado de saturación sea menor.

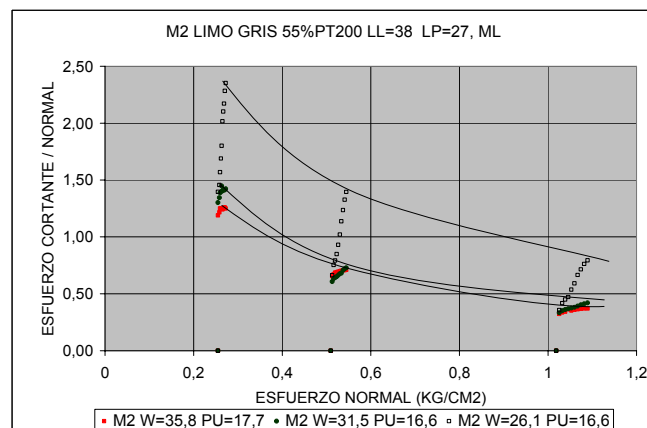


Figura 10 – Resultados de ensayos de corte directo, muestra 2 (Morales, 2005)

Tabla 1 Resultados de ensayos de corte directo

Mtra	GS	Humedad W	Peso unitario PU	Saturación S	Relación de vacíos e	Esfuerzo Normal, σ kg/cm2	Esfuerzo Cortante, τ			
							kg/cm2	pe	τ/pe	σ/pe
1	2,67	22,8	16,4	0,60	1,015	0,272	0,737	5,592	0,132	0,049
1	2,67	22,8	16,4	0,60	1,015	0,544	0,779	4,847	0,161	0,112
1	2,67	22,8	16,4	0,60	1,015	1,089	0,863	4,332	0,199	0,251
1	2,67	32,2	17,7	0,86	1,000	0,272	0,469	3,469	0,135	0,078
1	2,67	32,2	17,7	0,86	1,000	0,544	0,561	3,469	0,162	0,157
1	2,67	32,2	17,7	0,86	1,000	1,089	0,685	3,469	0,197	0,314
1	2,67	42,8	18,2	1,00	1,143	0,272	0,322	2,665	0,121	0,102
1	2,67	42,8	18,2	1,00	1,143	0,544	0,434	2,665	0,163	0,204
1	2,67	42,8	18,2	1,00	1,143	1,089	0,535	2,665	0,201	0,409
2	2,71	26,1	16,6	0,67	1,040	0,272	0,640	4,943	0,130	0,055
2	2,71	26,1	16,6	0,67	1,040	0,544	0,760	5,145	0,148	0,106
2	2,71	26,1	16,6	0,67	1,040	1,089	0,865	5,356	0,162	0,203
2	2,71	31,5	16,6	0,75	1,121	0,272	0,387	3,023	0,128	0,090
2	2,71	31,5	16,6	0,75	1,121	0,544	0,397	2,733	0,145	0,199
2	2,71	31,5	16,6	0,75	1,121	1,089	0,458	2,854	0,160	0,382
2	2,71	35,8	17,7	0,90	1,062	0,272	0,340	2,630	0,129	0,104
2	2,71	35,8	17,7	0,90	1,062	0,544	0,387	2,630	0,147	0,207
2	2,71	35,8	17,7	0,90	1,062	1,089	0,404	2,575	0,157	0,423

En la Tabla 1 se indican las presiones de normalización obtenidas, y en las Figuras 11 a 14 se presentan las curvas de resistencia no drenada normalizadas, así como la variación de la presión equivalente de normalización para las dos muestras ensayadas. Se aprecia una perfecta correspondencia con el comportamiento

esperado y una gran similitud en la forma como varía la presión de normalización con el grado de saturación y la forma como varía la presión de succión con la humedad en los datos reportados por Fityus y Smith (2004).

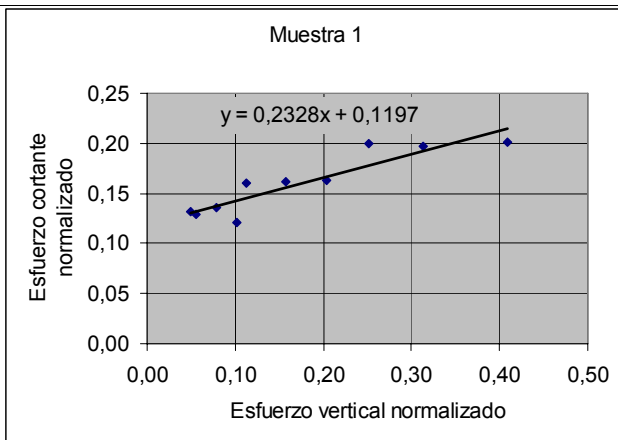


Figura 11 – Resistencia no drenada en ensayos de corte directo, muestra 1.

Los resultados permiten hacer una interpretación racional y clara de los factores que afectan la resistencia de estos suelos. En primera instancia se confirma para estos suelos la teoría que relaciona la resistencia no drenada del suelo con su estado de esfuerzos y relación de vacíos, observándose comportamiento y valores similares a los reportados para otros suelos (Terzaghi et al , 1996). Por otra parte se aprecia el gran efecto que tiene la presión de succión en el comportamiento, no solo de expansividad sino también en este caso sobre la resistencia.

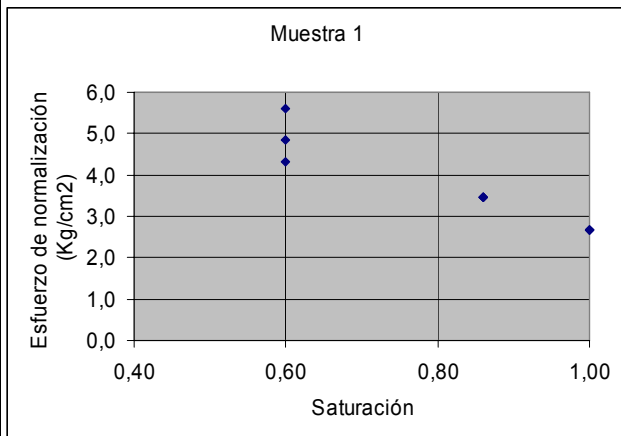


Figura 12 – Presión de normalización, en función de la saturación, muestra 1 (Morales, 2005)

Se aprecia que las presiones efectivas equivalentes son bastante altas, entre 5 y 6 kg/cm^2 para grados de saturación del orden de 60%, y decrecen a valores del orden de 2 kg/cm^2 para los suelos saturados. Esto implica que al aumentar la saturación se encontrarán variaciones muy importantes de resistencia. Esta es una de las razones de las fallas de taludes en estos suelos durante temporadas de fuertes lluvias.

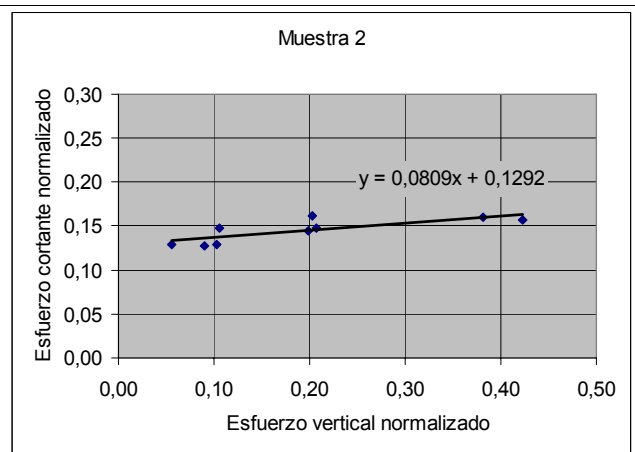


Figura 13 – Resistencia no drenada en ensayos de corte directo, muestra 2.

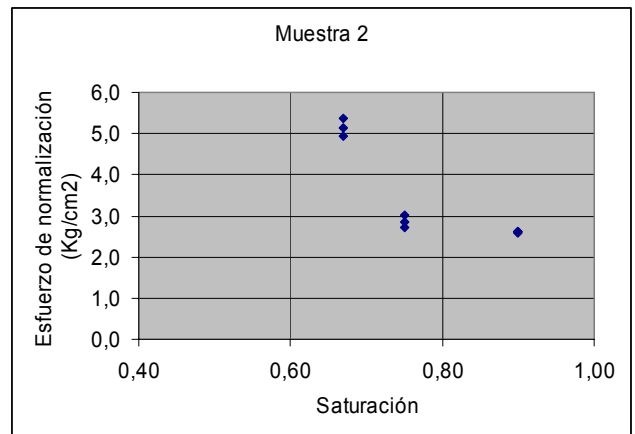


Figura 14 – Presión de normalización, en función de la saturación, muestra 1 (Morales, 2005)

Dentro del trabajo de Morales (2005) también se hizo un ensayo triaxial consolidado isotrópicamente inicialmente a una presión de 50 kPa, posteriormente se aplicó carga axial hasta una deformación de 2%, se reconsolidó a 100 kPa, se sometió a una deformación del 2% de nuevo y finalmente se reconsolidó a 200 kPa y se llevó hasta una deformación de 10%. De esta manera se pudo evaluar la degradación de la resistencia con la deformación y el efecto de ciclos sucesivos de cambios de esfuerzos de consolidación y de corte, que representan de manera aproximada la secuencia de formación de los depósitos coluviales en estas formaciones.

En la Figura 15 se muestran las curvas esfuerzo deformación obtenidas en este ensayo. Se aprecia como en los tres casos, a pesar de las deformaciones acumuladas la muestra presenta un comportamiento frágil caracterizado por un pico de resistencia a deformaciones del orden de 1%. Sólo en el tercer ensayo a deformaciones acumuladas de 14% se alcanzó una condición de estado crítico con una caída de resistencia de más del 50% con respecto al pico.

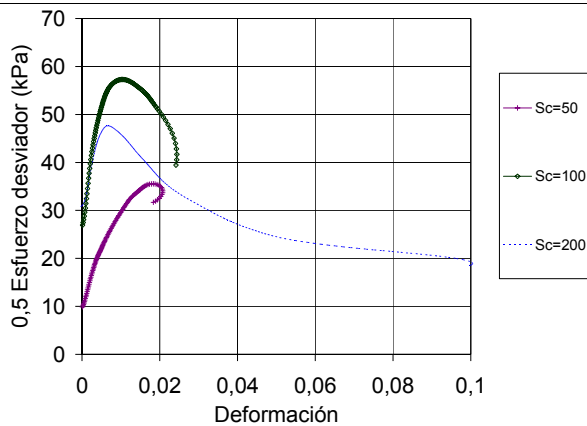


Figura 15 – Curvas esfuerzo-deformación en las fases de corte del ensayo triaxial realizado (Morales, 2005)

En la Figura 16 se muestran las trayectorias de esfuerzos efectivos en los tres ensayos y la forma como en los dos primeros se alcanza una envolvente de resistencia pico con pendiente de 31 grados, pero en el tercero sólo se logró movilizar una resistencia del orden de 11 grados, que al final del ensayo llegó a un valor de tan solo 7 grados. Esta gran caída de resistencia es un factor muy importante en la movilidad de los flujos de tierras que se presentan en la zona una vez se presenta una falla nueva o se reactiva una existente.

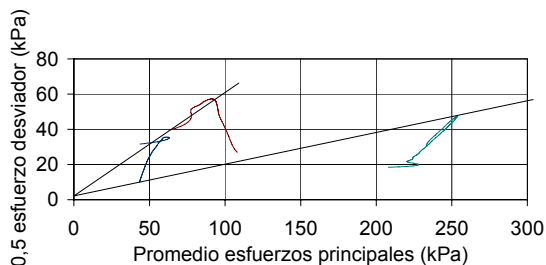


Figura 16 – Trayectorias de esfuerzos en el ensayo triaxial realizado (Morales, 2005)

6 CONCLUSIONES

El estudio realizado permite conocer el estado en que se encuentran los suelos residuales y coluviones en la región de estudio, así como aspectos fundamentales de su comportamiento relevantes para entender los procesos de inestabilidad que son muy importantes en este tipo de suelos en amplias zonas de la cordillera oriental de Colombia. Se ha podido identificar el papel de la succión y su efecto sobre la resistencia, explicando los grandes cambios de resistencia que se observan en estos materiales con cambios de humedad, así como también el carácter frágil del comportamiento esfuerzo

deformación y la gran pérdida de resistencia que se presenta por deformaciones acumuladas en estos suelos. Esta situación explica la movilidad y el desarrollo que tienen los fenómenos de remoción en masa en el área luego de que ocurren por primera vez.

REFERENCIAS

- Blight, G.E., (1997). “*The Mechanics of Residual Soils*”. Balkema, Rotterdam.
- Geoingeniería Ltda. (2002) “*Asesoría geotécnica durante la construcción de obras de emergencia en los taludes de corte de Terraza 3*”. GI 885-1. Petrobrás, Bogotá.
- Hawkins, A.B., Pinches, G.M., (1992). “*Engineering description of mudrocks*”. Quaterly Journal of Engineering Geology 25, 17– 30.
- Hubach, E. (1957). “*Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores*”. Inst. Geol. Nal., Bol. Geol., 5(2):93-112. Bogotá.
- Lobo-Guerrero, A. (1992). “*Geología e Hidrogeología de Santa Fe de Bogotá y su Sabana*”. 7 Jornadas Geotecnicas Ing. Col. Bogotá.
- Renzoni, G. (1967). “*Geología del Macizo de Quetame*”. U. Nal., Geol. Col., (5):75-127. Bogotá.
- Fityus, S.G., Smith, D.W. (2004) “*The development of a residual soil profile from a mudstone in a temperate climate*”, Engineering Geology 74 39– 56
- Lancellotta, R. (1995). “*Geotechnical Engineering*”. Balkema, 436pp.
- Macias, F., Chesworth, W., 1992. “*Weathering in humid regions*”. en: Martini, I.P., Chesworth, W. (Eds.), Weathering, Soils and Paleosoils. Elsevier, Amsterdam, pp. 283–306.
- Millot, G., 1970. “*The Geology of Clays*”. Masson, Paris.
- Morales L., (2005) “*Caracterización de procesos de inestabilidad en coluviones arcillosos de la formación Villeta*”, Proyecto de grado en ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana Bogotá.
- Potter, P.E., Maynard, J.B., Pryor, W.A., 1980. “*Sedimentology of Shale: Study Guide and Reference Source*” Springer, New York.
- Righi, D., Meunier, A., 1995. “*Origin of clays by rock weathering and soil formation*”. en: Velde, B. (Ed.), Origin and Mineralogy of Clays. Springer, Berlin, pp. 43– 157.
- Rodríguez. J.A. (1999) “*Geotechnical Aspects of the Colombian Piedmont related to the Development of BP's Oil field infrastructure*”. BP Exploration Company, Bogotá.
- Rodríguez. J.A., Barragán N. (2004) “*Procesos de Inestabilidad en Depósitos Coluviales en los Taludes de una Plataforma Petrolera*” X Congreso Colombiano de Geotecnia, Paipa.
- Terzaghi, K., Peck R.B, Mesri G., (1996). “*Soil Mechanics in Engineering Practice*”. Jhon Wiley and Sons.