

Caracterización geo-mecánica de un perfil de meteorización residual

Gustavo Orlando Bogado^{1, 2, 3}, Franco Matías Francisca^{2, 3}

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Misiones, Oberá, Misiones, Argentina

² Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Argentina

³ Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT, UNC-CONICET), Argentina.

Fecha de recepción del manuscrito: 14/07/2016

Fecha de aceptación del manuscrito: 09/01/2017

Fecha de publicación: 15/03/2017

Resumen—En este artículo se presenta un estudio sobre la variación de las propiedades físicas, mineralógicas, compresibilidad y dinámicas a lo largo de un perfil de meteorización de la ciudad Oberá- Misiones. Se analiza la influencia del intemperismo mediante ensayos de laboratorio en muestras obtenidas de suelos residuales característicos de la región. Las propiedades físicas analizadas fueron; caracterización del suelo, humedad, límites de Atterberg, granulometría, ensayo MCT (método expeditivo) y superficie específica. En cuanto a los ensayos mineralógicos se efectuaron mediciones por difracción de rayos X para determinar los minerales presentes en la matriz del suelo. Los ensayos dinámicos consistieron en la medición del módulo G_{max} en compresión confinada mediante la técnica de *Bender Elements*, en muestras inalteradas. Con los resultados obtenidos, fue posible cuantificar la influencia de la meteorización en el perfil analizado.

Palabras clave—suelos residuales, meteorización, compresibilidad, módulo de corte máximo

Abstract— This paper presents a study on the variation of physical, mineralogical and dynamical properties along a weathering profile from Oberá-Misiones. The influence of weathering is analyzed by laboratory test on representative samples. The physical properties analyzed are: soil characterization, moisture content, Atterberg limits, grain size, MCT, specific surface. Mineralogical tests were measured by X-ray diffraction to determine the minerals present in the soil. The dynamic tests included measurements of maximum shear modulus in confined compression modulus through Bender Elements technique on undisturbed specimen. The results obtained to establish the effect of weathering on the analyzed profile.

Keywords— residual soils, weathering, compressibility, maximum shear modulus

INTRODUCCIÓN

Los suelos residuales son característicos en diversas regiones del mundo y principalmente constituyen la mayor cobertura en zonas tropicales. Es muy común que se utilicen las teorías de la mecánica de suelos clásicas, que fueron desarrolladas en ambientes no tropicales, para este tipo de materiales. Por esta razón, el estudio de suelos residuales ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación alrededor del mundo, dado las diferencias encontradas entre la teoría y el comportamiento observado en campo.

El departamento de Oberá, Misiones cuenta en gran parte de su superficie con suelos residuales derivados de la meteorización del basalto. Las características de los perfiles de meteorización de la zona son generalmente; una capa de suelos cercanas a la superficie del terreno con significativa

cantidad de materia orgánica, las cuales están sujeta a efectos de humedecimiento y secado por las variaciones en el clima. Al aumentar la profundidad, disminuye el contenido de materia orgánica y se reduce la influencia de las fluctuaciones estacionales.

Los suelos colorados típicos de la región, son denominados en la literatura como maduros (Vargas, 1953), son ricos en óxidos férricos y aluminio predominan en gran parte del territorio Misionero. Estos suelos son utilizados en diversos proyectos geotécnicos, tales como; taludes, terraplenes, rellenos de muros de sostenimiento, bases para pavimentos, etc. Los saprolitos, denominados comúnmente “suelo joven”, se destacan como materiales cuyas propiedades dependen de la alteración sufrida por el intemperismo, específicamente por cambios climatológicos, poseen características heredadas de procesos físico-químicos y que hacen del mismo un material anisotrópico. En su estructura es muy fácil de encontrar diaclasas y heterogeneidades, lo cual dificulta su caracterización. El saprolito se utiliza en la región del Norte de Argentina para la estabilización de caminos y últimamente es un material común para las bases de pavimentos.

Dirección de contacto:

Gustavo Bogado, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria,
X5016 CGA., gustavobogado777@gmail.com

La meteorización de los suelos es un fenómeno complejo, ampliamente estudiado por (Fredlund y Rahardjo, 1993; Fookes, 1997; Mitchell y Soga, 2005; Blights y Leong, 2012). La meteorización es producto de procesos de alteración físicos, químicos y biológicos, que generalmente actúan en forma simultánea. Por otro lado, es fundamental en el cambio de algunas propiedades del suelo, tales como; la distribución granulométrica (Rahardjo et al. 2004), relación de vacíos (Wesley, 2009; 2010), mineralogía (Rahardjo et.al 2004, Blights y Leong, 2012), y módulos de deformación y resistencia al corte. Además, en el caso de los suelos tropicales, no es posible generalizar y/o extrapolar las tendencias obtenidas por distintos investigadores ya que el clima y geografía de cada sitio afecta significativamente las características físicas, mineralógicas y mecánicas de estos suelos. Por lo tanto, es necesario realizar un estudio pormenorizado de cómo influye el grado de meteorización en las distintas propiedades. Existen diferentes perfiles pedogenéticos de meteorización para los suelos residuales Misioneros, adaptados de autores como (Little, 1967; Deere y Patton, 1971; De Salvo, 1990). Sin embargo, los mismos no definen índices o parámetros para determinar qué grado de meteorización posee el perfil, dado que la clasificación es meramente visual, lo cual conlleva a que la clasificación final resulte altamente dependiente del juicio de la persona o criterio del especialista que realiza la evaluación. Otra particularidad de los suelos residuales es la dificultad en determinar el límite existente entre la roca y el suelo. En el caso del suelo saprolítico, muchas veces es confundido con la roca. Unos de los principales fenómenos en los suelos residuales son los efectos diagenéticos significativos, que evolucionan en el tiempo, y producen modificaciones en su comportamiento (por ejemplo desintegración gradual del basalto) (Blights y Leong, 2012).

La variación de los módulos de deformación con el grado de meteorización es posiblemente uno de los aspectos que despierta mayor interés en la ingeniería práctica. El estudio de las propiedades tenso-deformacionales de los suelos residuales medidas a grandes niveles de deformación ha sido objeto de estudio de diversos investigadores en los últimos años (Vargas, 1953; Vaughan, 1988; Souza Martin, 2005; entre otros). Sin embargo, los módulos a bajos niveles de deformaciones y las propiedades dinámicas de estos geomateriales han sido estudiados en menor relación que los módulos a deformaciones medias y elevadas. Por otro lado, las propiedades mecánicas a bajo niveles de deformación permiten conocer aspectos fundamentales de los suelos. A modo de ejemplo, el módulo de corte G_{max} proporciona valiosa información sobre el suelo y puede obtenerse a partir de mediciones de velocidad de onda de corte con transductores piezoeléctricos en ensayos de laboratorio. Este parámetro es relevante para una amplia gama de trabajos dentro de la ingeniería, incluyendo el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas, monitoreo de procesos, evaluación de licuación y control de calidad en suelos mejorados (Lee y Santamarina, 2005).

El módulo de Corte G_{max} en geomateriales depende de las fuerzas de contacto entre partículas y la rigidez de los contactos y es independiente de la rigidez del fluido en los poros del suelo (Kwon y Cho, 2005). Entre los parámetros que pueden afectar la G_{max} del suelo, se encuentran; además

el estado y la historia de tensiones efectivas, el grado de saturación, la relación de vacíos y el tipo de material. A través de mediciones de velocidad de ondas de corte diversos autores han podido estudiar diversos fenómenos, tales como: evolución de procesos geotécnicos (Fam y Santamarina, 1997), determinación de módulos a bajos niveles de deformación (Viggiani y Atkinson, 1995), compresibilidad y colapso (Clariá, 2003), cementación (Rinaldi y Santamarina, 2002; Yun y Santamarina, 2005), anisotropía Pennington et.al (2001), y grado de saturación (Cho y Santamarina, 2001; Clariá, 2003). De igual forma, a través de mediciones de velocidad de ondas de corte sería posible avanzar significativamente en el conocimiento de la evolución del grado de meteorización de un suelo residual y mejorar así lo que se conoce en la actualidad sobre el comportamiento de estos materiales. La velocidad de ondas de corte se relaciona de manera directa con el módulo de corte G_{max}

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad del material.

Aunque existen gran cantidad de trabajos científicos, aún falta información sobre diversos aspectos de estos suelos que puedan contribuir a un mejor entendimiento del comportamiento que presentan frente a diferentes estados tensionales, variaciones ambientales, grado de meteorización, etc. Es razonable concluir que actualmente hay una brecha considerable entre el conocimiento científico y técnico en el comportamiento de estos materiales para el uso de los mismos como material de construcción en obras de ingeniería civil. En la práctica de la ingeniería, en general no se considera la naturaleza particular de los suelos residuales, y esta situación ocurre con frecuencia en la provincia de Misiones. Debido a que la provincia se encuentra cubierta principalmente por este tipo de suelo todos los grandes proyectos de ingeniería se encuentran condicionados por el comportamiento de los suelos residuales. Por lo tanto, resulta de interés avanzar en el conocimiento de la mecánica de los suelos tropicales del norte de Argentina.

En este artículo se ha desarrollado un programa experimental destinado a profundizar el estudio del comportamiento mecánico de suelo residual derivados del basalto de la ciudad de Oberá-Misiones. En particular se abordan aspectos relacionados con el comportamiento de estos materiales a bajos niveles de deformación.

Índices de la meteorización

Los índices de meteorización químicos son utilizados para evaluar el grado de descomposición producido en una roca. Estos índices cuantifican la movilidad de algunos minerales y algunas relaciones moleculares, sin embargo, no es fácilmente posible encontrar correlaciones con las propiedades geotécnicas. Existen escasas correlaciones para cuantificar el grado de intemperismo químico mediante: difracciones de rayos X, métodos químicos, análisis petrográficos, etc.

La relación sílice/sesquióxidos (ecuación 2) indica si el material posee características particulares de un suelo laterítico (Fookes, 1997).

$$Kr = \left(\frac{\frac{\%SiO_2}{60}}{\frac{\%Al_3O_2}{102}} + \frac{\%Fe_2O_3}{160} \right) \quad (2)$$

Esta expresión es usada frecuentemente para indicar la intensidad de meteorización y para diferenciar tipos de suelo. Los valores de $Kr < 2.0$ son típicos de suelos ferralíticos ricos en óxidos, ferrisoles y algunos suelos ferruginosos, en tanto que, los suelos fersialíticos y algunos suelos ferruginosos tienen valores de $Kr > 2$.

Parker (1970) formuló el WIP (índice de meteorización de Parker) (Ecuación 3) que considera la movilización de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Los diferentes valores del WIP reflejan la probabilidad que posee un elemento al ser movilizado en el proceso de meteorización, tienen un rango entre 0 a 100, valores de WIP cercanos a 0 indican mayor meteorización y cercanos a 100 menores efecto de la meteorización.

$$WIP = \left(\frac{Na^+}{0.35} + \frac{Mg^{2+}}{0.9} + \frac{K^+}{0.25} + \frac{Ca^+}{0.7} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Los óxidos de hierro y aluminio y los óxidos hidratados liberados por la meteorización subsuperficial tropical no se disuelven tanto como en los ambientes de suelos más ácidos que caracterizan las regiones templadas y, consecuentemente, tienden a permanecer in situ. (Fookes, 1997). Bahlburg y Dobrzinski (2011) indican que el WIP no considera una fase de inmovilización importante como Al_2O_3 .

Kramer (1968) propuso el índice de alteración química que relaciona la fase Al_2O_3 y los cationes móviles como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y otros óxidos. (Ecuación 4).

$$CIA = \left(\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

El CaO es la cantidad de óxido de calcio incorporado en la fracción silicato de la roca madre, el índice se asume que el Al es inmóvil, por lo tanto el CIA refleja los cambios en la proporción de minerales de arcillas desarrollados en un perfil considerado.

Nesbitt y Young (1982) reportaron valores para distintos tipos de rocas meteorizadas, los autores indicaron que altos valores de CIA indican la pérdida de elementos y en cambio los bajos valores, indican la ausencia de meteorización química. Las rocas y minerales frescos, sin importar su composición poseen valores de CIA entre 40-50, en tanto que muestras completamente meteorizadas tienen valores de CIA alrededor de 100. (Fedó et al., 2005)

CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL ESTUDIADO

El perfil estudiado se encuentra ubicado en la Ciudad de Oberá-Misiones, cuyas coordenadas geográficas son ($27^{\circ}30'40.24''S$ y $55^{\circ}6'58.70''O$).

Los primeros 0.30 m del perfil estudiado, se observaron muestras de un color rojo oscuro, con una gran cantidad de materia orgánica en su interior, característica propia de suelos residuales lateríticos, tal como lo indica diversos

autores (Little, 1967; De Mello, 1992; Wesley, 2010; Blights y Leong, 2012). Desde los 0.50 m hasta los 4 m de profundidad, se evidenció suelo laterítico de coloración rojiza o también denominado suelo maduro (Vargas, 1953) y su color es rojo más oscuro debida a la presencia de hematita. A los 4m, la coloración comenzó a disminuir, fenómeno que nos evidencia la transición de la arcilla roja a saprolito (De Salvo, 1990) y a que la presencia de los óxidos férricos disminuye prevaleciendo la caolinita. A los 6.30m, se encontró el suelo residual joven (Vargas, 1953), o saprolito (Deere y Patton, 1971), el mismo presentaba en la matriz de suelo partículas de diferente coloración, además, al ser manipulado el suelo era destruido fácilmente, el cual aparentaba una arena-arcillosa-limosa.

ESTUDIOS REALIZADOS

Se realizaron ensayos de caracterización físico, químicos y mecánicos para evaluar el efecto de la meteorización. Los ensayos de caracterización consistieron en: determinación de la humedad, peso unitario, granulometría, límites de consistencia, gravedad específica, superficie específica (en fase gaseosa y líquida) y el ensayo MCT caracterización expeditiva. Se obtuvieron los minerales existentes mediante difracción de rayos X (DRX). Además, fueron efectuados ensayos de compresión confinada en un edómetro modificado con cristales piezocerámicos (Bender Elements) de similares características a los utilizados por (Fam y Santamarina, 1997; Clariá y Rinaldi, 2007; Yun y Santamarina, 2005).

La velocidad de la onda de corte se midió al final de cada período de carga antes de realizar el posterior aumento de carga. Para generar las señales es utilizado un generador de señales Marca RIGOL DG1002 por medio del cual se excita el BE inferior. Para acondicionar la señal de entrada al osciloscopio, se utilizó un filtro amplificador SRS (Stanford research system). Las señales fueron digitalizadas por medio de un osciloscopio Rigol DS432, para la eliminación de ruidos las señales fueron promediadas 256 veces. Los registros fueron bajados por medio de un dispositivo USB para posterior procesamiento, se descargaron imágenes de la pantalla en formato JPG. En todos los casos, las señales fueron descargadas para su posterior análisis, sin embargo, por medio de los cursores que posee el osciloscopio fue posible medir directamente sobre la señal y anotarla, para después compararlas.

RESULTADOS

Caracterización Geotécnica

La Figura 1 muestra la variación de la humedad y gravedad específica en función de la profundidad. La humedad posee una tendencia a aumentar con la profundidad y su rango de variación oscila entre 20 y 30 %.

La gravedad específica, un parámetro de gran significancia para la estimación de la relación de vacíos, e_0 , posee una variación entre 2.65-2.85. Los valores se encuentran dentro del rango característico reportado en la literatura para suelos residuales derivados del basalto

(Sandroni, 1985). El valor de G_s disminuye ligeramente con la profundidad

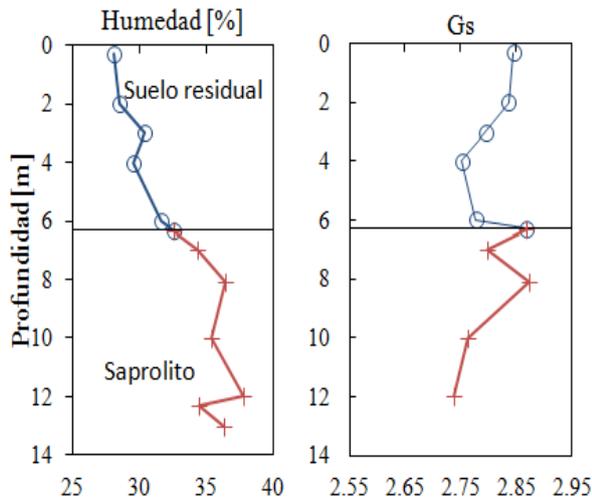


Fig. 1. Variación de la humedad, Gravedad Especifica con la profundidad.

Las capas más superficiales cuentan con valores mayores de relaciones de vacíos, aproximadamente $e_0=1.60$, por otro lado, la relación de vacío disminuye hacia las mayores profundidades hasta valores cercanos a $e_0=0.9$, estos valores concuerdan con lo descrito por Wesley (2010).

En cuanto a las propiedades granulométricas, la Figura 2, presenta la distribución granulométrica obtenida en ensayos realizados en cada estrato identificado en el perfil de suelo. Los resultados obtenidos permiten identificar una evolución de las partículas con la profundidad, producto del intemperismo. Estos resultados fueron corroborados por diversos investigadores (Gidigasú, 1979; Rahardjo *et al.* 2004), los cuales indicaron que el aumento de la meteorización produce una disminución del tamaño de las partículas.

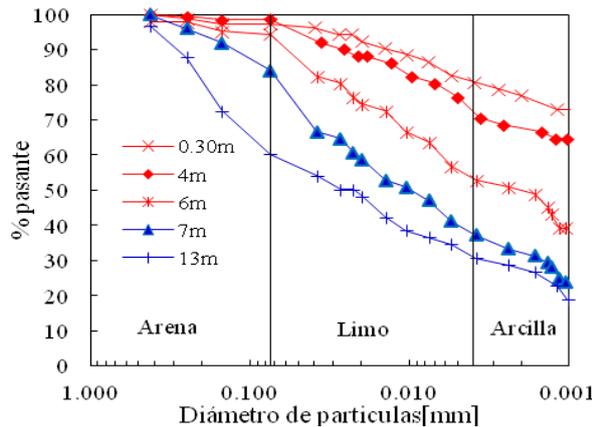


Fig. 2. Distribución granulométrica de las muestras ensayadas a diferentes profundidades

Los resultados de límite líquido obtenidos varían entre 26 y 48%, el límite plástico de 18 a 35% y el índice de plasticidad del 2 al 15%.

La Figura 3, muestra los resultados obtenidos en los índices de Atterberg graficados en la carta de plasticidad. A partir de estos resultados y las principales características granulométricas del suelo a cada profundidad ensayada, se

realizó la clasificación de las muestras de acuerdo al Sistema de Clasificación Unificado de Suelos para propósitos ingenieriles (SUCS) bajo los lineamientos de la norma ASTM D2487). Para las muestras ensayadas cercanos a la superficie hasta los 6.30 metros de profundidad la clasificación según SUCS corresponde en general con limos de baja plasticidad y suelo orgánico de baja plasticidad (ML-OL), mientras que según la clasificación HRB con suelos tipo A-6 con índices de grupo mayor a 9. Desde los 6.30 metros de profundidad, los suelos se clasifican según el SUCS como limos arcillosos y arcillas de baja plasticidad ML-CL y CL según el SUCS y A7-A6 según HRB con índices de grupo inferior a 8, con excepción de la muestra de 12 m de profundidad. Estos resultados demuestran que la clasificación SUCS no resulta satisfactoria para los suelos residuales, ya que para las profundidades 10, 12 y 12.30 m, lo especifica como CL, el cual no se concuerda con la variación del tamaño de partículas, el cual podría esperarse un material con mayor granulometría.

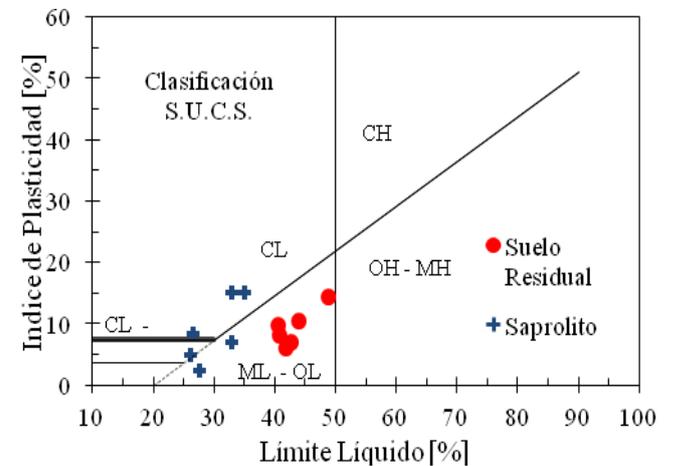


Fig. 3. Carta de plasticidad.

Por otro lado, se realizó la clasificación de suelos de acuerdo al método cualitativo MCT de Nogami y Villibour (1994). Este método se basa en los resultados de penetración y contracción lateral C' . A partir de los resultados obtenidos se puede establecer que los suelos residuales lateríticos se clasifican como LG' (arcillas lateríticas) mientras que los suelos saprolíticos profundos se clasifican como NG' (arcillas limosas-suelos de comportamiento no lateríticos) (Figura 4).

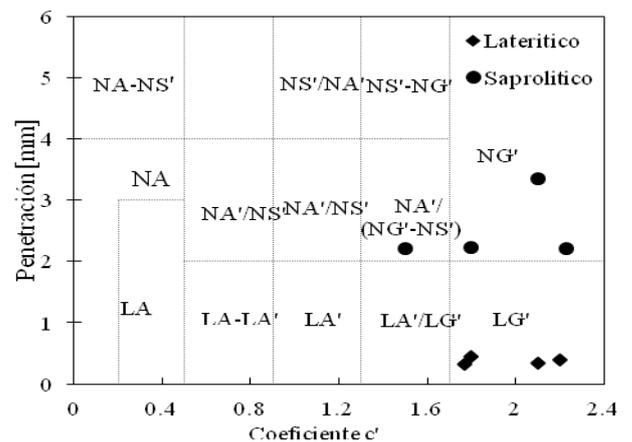


Fig. 4. Gráfico MCT (Nogami y Villibour 1994)

Los resultados obtenidos en las clasificaciones de suelo confirman lo reportado en la literatura, los sistemas SUCS o HRB no permiten obtener una caracterización adecuada para los suelos residuales, sin embargo, con la propuesta MCT se obtuvo valores más representativos con respecto a las variaciones del perfil observadas en campo.

MINERALOGÍA

Con el objeto de determinar los principales minerales presentes a lo largo del perfil ensayado se realizaron ensayos de difracción de rayos X sobre la muestra total y en la fracción arcillosa. Estos ensayos se realizaron en muestras a distintas profundidades en el perfil de meteorización detallado anteriormente. Los análisis realizados en muestras de la fracción arcilla permitieron identificar picos bien definidos de caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), esmectita y illita. La caolinita resulto ser el mineral con mayor proporción, y aumenta su contenido con la profundidad.

La Tabla 1 resume los contenidos de los principales minerales encontrados en cada una de las muestras ensayadas. En todas las muestras ensayadas el mineral principal encontrado fue la caolinita. En las muestras de suelos provenientes de profundidades inferiores a los 6,3 metros se encontró un 12% de esmectita y cuarzo. En el suelo saprolítico, a profundidades mayores, se encontró de manera característica arcillas del tipo de las illitas con un porcentaje aproximado del 5% y presencia significativa de goethita con un contenido aproximado del 8%. La presencia de caolinita, esmectita, illita fueron también corroboradas mediante la saturación de las muestras con etilenglicol. En la calcinación de las muestras no se mostraron picos de caolinita debido a la destrucción del mineral a temperaturas de 500 °C, en el caso de illita se identificó en la calcinación de las muestras. Los análisis de muestra total en el suelo residual indicaron la presencia cuarzo, goethita ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$) y hematita (Fe_2O_3). El contenido de hematita presentó una tendencia a disminuir con el aumento de la profundidad.

TABLA 1. Resumen de minerales presentes obtenidos mediante DRX

Prof [m]	Cuarzo [%]	Hematita [%]	Caolinita [%]	Esmectita [%]	Goetita [%]	Illita [%]
2	15	20	53	12	-	-
4	9	21	58	12	-	-
6.3		12	74	-	9	5
8		13	75	-	8	4
12		10	76	-	9	5

En la Tabla 2 la medición de la S_e (superficie específica) y se realiza una comparación entre los valores obtenidos mediante el método de azul de metileno y la técnica basada en la calibración de isotermas y absorción de gas nitrógeno. Los valores registrados por ambos métodos se condicen bastante en las profundidades de 2 y 4 metros, sin embargo, para las profundidades 6.30, 8.10 y 12m el método de azul de metileno proporciona valores alrededor del 50 % mayor que BET. Del análisis de los mismos, se desprende que al resultar parecidos los valores obtenidos para el suelo laterítico por ambos métodos, al ser uno de los métodos

húmedo permitiendo medir la superficie completa en el caso de existir minerales expansivos y el otro por medio de vía seca, se concluye que la presencia de minerales con alto poder de expansión como la montmorillonita serán muy escasos o no se encontrarían presentes. Por otro lado, el aumento de los valores de superficie específica con la profundidad se atribuye principalmente a la presencia de sesquióxidos en el material, en el suelo laterítico fundamentalmente. Al poseer valencias positiva hacen que la adsorción de moléculas del azul de metileno sea influenciada con una menor adsorción. El rango de valores obtenido indicaría que se trata de arcillas de bajo poder de expansión y actividad, lo que se condice con la presencia de caolinita.

Tabla 2. Comparación de medición en superficie específica

Profundidad [m]	BET [m^2/gr]	Azul de metileno [m^2/gr]
2	58.01	59.33
4	60.53	62.39
6.3	51.37	63.00
8.1	63.13	85.63
12	63.25	94.81

Índice de Meteorización

La relación de sílice/sesquióxidos (Kr) fue calculada mediante la ecuación 1. Para ello, de manera simplificada se asumió que el silicio se encuentra formando SiO_2 , el hierro se encuentra en forma de Fe_2O_3 y el aluminio en forma de Al_2O_3 . A partir de esta relación (Kr) se puede determinar si el material posee características particulares de un suelo laterítico (Fookes, 1997). Esta expresión es usada frecuentemente para indicar la intensidad de meteorización y para diferenciar tipos de suelo. Los valores de $\text{Kr} < 2.0$ son típicos de suelos ferralíticos ricos en óxidos, ferrisoles y algunos suelos ferruginosos, en tanto que, los suelos fersialíticos y algunos suelos ferruginosos tienen valores de $\text{Kr} > 2$. Para todos los suelos ensayados en esta publicación las relaciones Kr resultaron mayores a dos, lo que se correspondería con suelos residuales del tipo fersialítico.

Los índices de meteorización químicos (CIA) y el índice de meteorización de Parker (WIP) fueron calculados a partir de las ecuaciones descriptas anteriormente. Estos índices permiten cuantificar el grado de meteorización del suelo. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3. Los valores del CIA varían entre 91,4 y 98,71, en cambio los del WIP entre 45 y 90.

TABLA 3. Índices de Meteorización

Profundidad [m]	CIA	WP
0.3	98.71	45.33
3	98.90	59.11
6.3	92.73	81.56
8.1	90.31	87.94
12.3	91.39	90.00

Los valores del CIA aumentan con el aumento de la profundidad, indicando que los estratos de suelo residuales (0.30 m y 2m) sufrieron mayor meteorización química que

los estratos de suelos saprolítico (6.30 m, 8.10 m y 12 m). Similares resultados se obtienen con el índice WIP, el cual disminuye con la profundidad.

COMPRESIBILIDAD

Los ensayos edométricos con medición de velocidad de onda de corte se realizaron en muestras inalteradas y también en estado saturado previa inundación de las muestras.

Las Figura 5 y 6 presentan la deformación de las muestras en función de la raíz cuadrada del tiempo, para los saltos de cargas indicados, en distintas condiciones de ensayo.

La Figura 5 corresponde a los ensayos realizados en muestras inalteradas que fueron saturadas previamente al inicio del ensayo. Se observa que las muestras que sufrieron mayores deformaciones fueron las del suelo laterítico, ya que para iguales niveles de tensión vertical efectiva las deformaciones resultaron mayores que las observadas en el saprolito (las deformaciones medidas en la muestra de 12m de profundidad resultaron menores que las de la muestra de 0.30m de profundidad para todas las tensiones verticales ensayadas). A la presión efectiva de 51 kPa, considerada presión de asiento, las deformaciones registradas fueron similares en todos los ensayos, excepto para 0.30m.

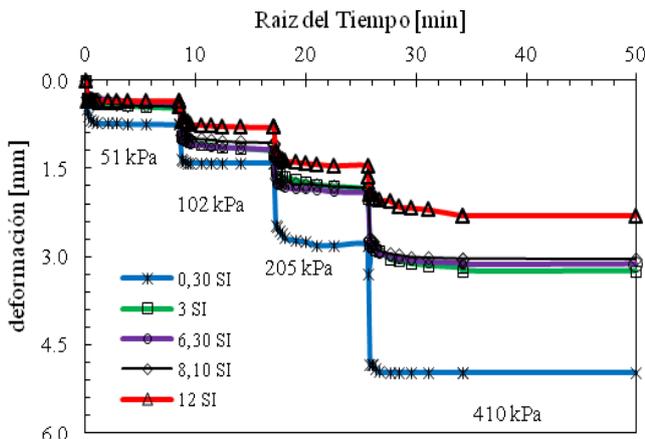


Fig. 5. Curva deformación-tiempo muestras inalteradas saturadas

En la Figura 6 se detallan las deformaciones de las muestras ensayadas a humedad natural. Las deformaciones siguen una tendencia a disminuir con el aumento de la profundidad, de manera similar a lo observado en las muestras inalteradas saturadas. Si se comparan ambos resultados, los resultados obtenidos indican que las muestras a humedad natural poseen una mayor resistencia

En la Figura 7 se presenta la relación existente entre el coeficiente de compresibilidad C_c y la relación de vacíos inicial de las muestras. En la misma se presentan los rangos de valores reportados en la literatura para suelos residuales con características similares a los ensayados en este trabajo (Coutinho *et al.* 1998). Se observa que los valores obtenidos se sitúan dentro de los límites fijados por Sower (1985).

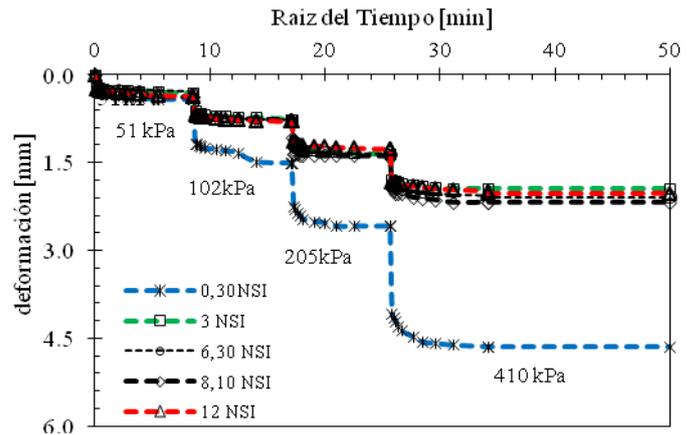


Fig. 6. Curva deformación-tiempo muestras inalteradas a humedad natural

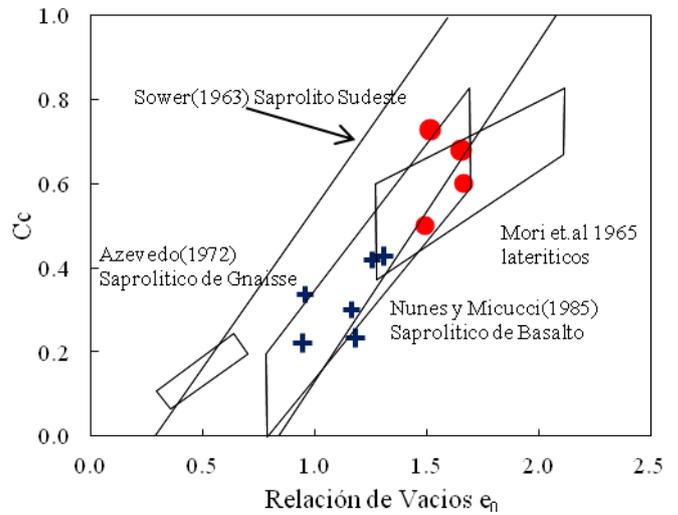


Fig. 7. Relación entre el coeficiente de compresibilidad y la relación de vacíos inicial del suelo.

Efecto de la Meteorización en la compresibilidad

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten confirmar que el grado de meteorización afecta las propiedades tenso-deformacionales en condiciones edométricas. Si bien este aspecto no es tenido en cuenta en la práctica de la ingeniería en el norte de Argentina, resulta importante tener en cuenta el cambio de las propiedades edométricas a grandes niveles de deformación de suelos residuales con diferente grado de meteorización. A bajos niveles de presión, los niveles de deformación resultan similares independientemente del grado de meteorización, pero ni bien el suelo es sometido a presiones cercanas o superiores a la presión virtual de preconsolidación las deformaciones se incrementan significativamente en los estratos con mayor grado de meteorización. Este comportamiento puede atribuirse a dos causas principales. Por un lado, la macro fábrica de estos materiales no evidencia un cambio significativo a tensiones bajas ya que la rigidez producida por los puentes de óxidos y sesquióxidos contribuyen a formar un esqueleto rígido, en términos relativos, independientemente de la densidad o relación de vacíos inicial de las muestras. Por otro lado, al incrementar la presión efectiva actuante y romperse los vínculos que aportan esta rigidez inicial, las deformaciones

aumentan de manera directamente proporcional con el grado de meteorización, observándose mayores valores en las muestras con mayor relación de vacíos inicial.

MODULO DE CORTE MÁXIMO

La Figura 8 y 9 presenta la influencia de la presión vertical efectiva en el módulo G_{max} en muestras inalteradas saturadas tanto inalteradas.

Se observa que para presiones efectivas verticales mayores en el suelo residual presenta valores menores de G_{max} que el saprolito (a cada presión la velocidad medida resultó mayor a medida que aumenta la profundidad, o disminuye el grado de meteorización del suelo). Además, tanto en condiciones saturadas como no saturadas, la velocidad de ondas posee un quiebre coincidente con la presión virtual de consolidación.

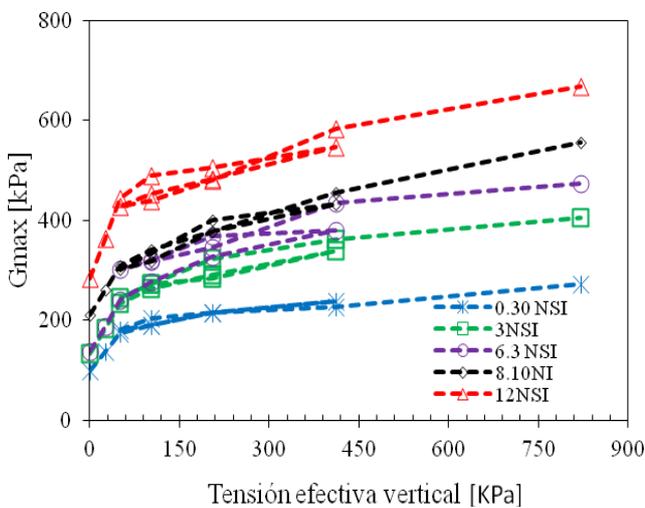


Fig. 8. Curva deformación-tiempo para distintos niveles de presión en muestras de saprolito y suelo residual

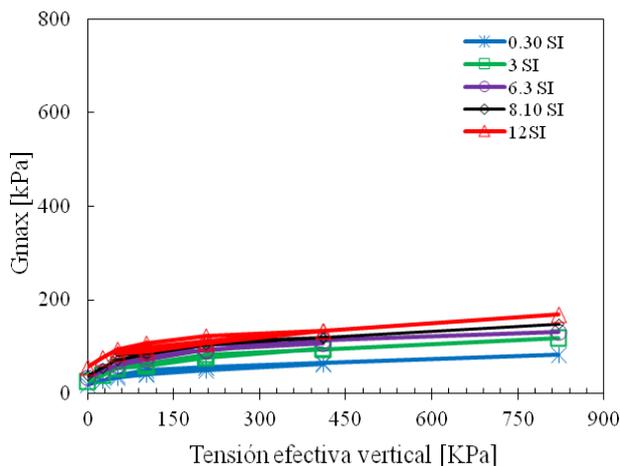


Fig. 9. Curva deformación-tiempo para distintos niveles de presión en muestras de saprolito y suelo residual

Influencia del Confinamiento en el Módulo de Corte G_{max}

A mayor presión de confinamiento mayor resulta la velocidad de propagación de onda de corte y por lo tanto

mayor debería ser el módulo G_{max} . La Figura 10 presenta la variación del módulo de corte G_{max} en función de la profundidad, a la presión de confinamiento determinada por la tapada in situ. Se observa que tanto para las muestras no saturadas como saturadas G_{max} aumenta con la profundidad consecuencia del mayor confinamiento. En el caso de las muestras ensayadas saturadas, G_{max} aumenta desde 20 a 75 kPa, mientras que las muestras no saturadas mostraron un aumento desde 170 kPa hasta 280 kPa para el suelo residual y saprolito respectivamente.

El aumento del módulo elástico con la profundidad para las condiciones de humedad natural generalizarse por medio de la ecuación de Gibson (1967) como $G_s = G_0 + Kz$, donde el valor $G_0 = 109$ es el valor que toma el módulo en la superficie y el la pendiente de incremento lineal es $K = 7$.

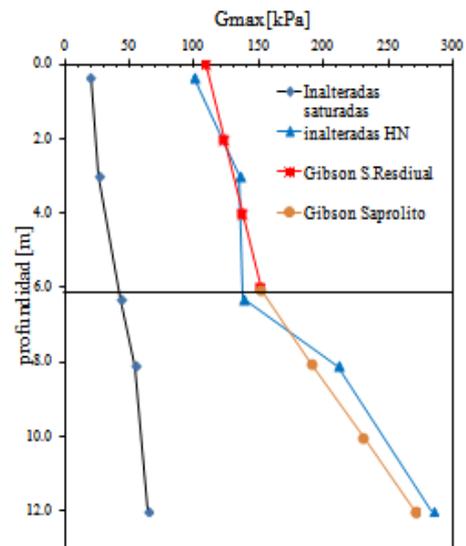


Fig. 10. Variación G_{max} con la profundidad

Existen diferentes modelos del G_{max} , entre los más utilizados esta el propuesto por (Hardin y Drnevich, 1972), el cual fue desarrollado para arcillas saturadas. La ecuación relaciona el G_{max} con la relación de vacíos e , el grado de sobreconsolidación OCR y la tensión efectiva σ'_c de la siguiente manera:

$$\left(\frac{G_{max}}{P_a}\right) = A \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} OCR^M \left(\frac{\sigma'_c}{P_a}\right)^N \quad (5)$$

Donde, e =relación de vacíos debe ser < 2 , M es un parámetro de ajuste que varía entre 0 y 0.5 dependiendo de la plasticidad del suelo, $N \approx 0.5$ para arcillas y arenas, y P_a es la presión atmosférica.

La Figura 11 presenta los resultados experimentales de variación de G_{max} con el nivel de presión vertical efectiva en el edómetro y la predicción ajustando los resultados con la ecuación (5) para las muestras de 2 m y 12 m de profundidad. Los valores de cada termino fueron obtenidos por medio de mínimos cuadrados y cuyos valores de $A=241$ para el caso del suelo residual y $A=321$ para el saprolito, utilizando $N=0.3$

Se observa que fue posible ajustar la ecuación y que el comportamiento general predicho. El modelo permite capturar con precisión los valores determinados de manera experimental.

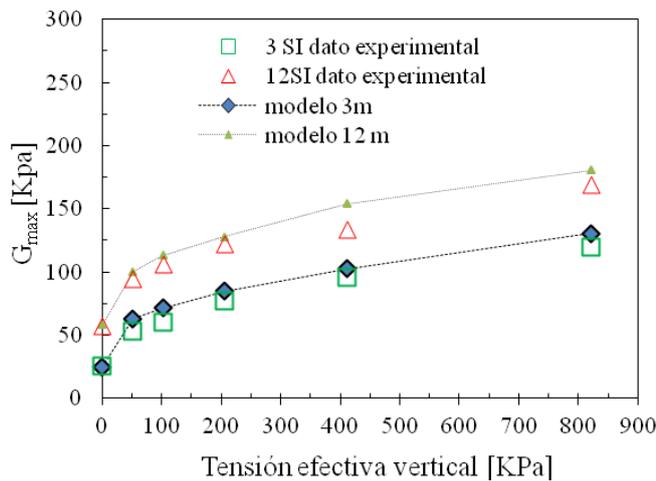


Fig. 11. Variación de G_{max} con la presión vertical efectiva

Efecto de la Saturación

Los ensayos indican que la rigidez a pequeña deformaciones obtenida en condiciones de deformaciones edométricas tiende a disminuir con el aumento de la saturación. Debido a que, en los suelos no saturados el nivel de succión se encuentra relacionado con la humedad volumétrica o grado de saturación, al disminuir la saturación existen un aumento en la succión, el cual se refleja en el aumento de la rigidez del esqueleto. (Fredlund y Rahardjo 1993, Cho y Santamarina 2006)

Efecto de la meteorización en el G_{max}

Respecto del comportamiento a bajos niveles de deformación determinado mediante medición de velocidad de propagación de ondas, se determinó que las muestras más meteorizadas poseen una menor rigidez que el saprolito. Este resultado evidencia que los módulos de deformación disminuyen a medida que la meteorización aumenta, tal como lo muestra la Figura 11, lo cual se atribuye a los cambios de la fábrica y/o micro-estructura producidos en el intemperismo. Esta tendencia concuerda con mediciones realizadas mediante la columna resonante realizadas por Macari y Hoyos (1996)

CONCLUSIONES

En el presente artículo se presentaron los resultados obtenidos en los ensayos físicos, químicos y mineralógicos realizados en las muestras de suelo residual del perfil de meteorización ensayado. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir de la siguiente manera:

- Se realizó ensayos que permitieron clasificar las muestras de suelo a distintas profundidades mediante las metodologías MCT, HRB, SUCS. El ensayo MCT resultó ser de gran utilidad ya que permitió aportar mayor información respecto de la clásica provista por el sistema de clasificación unificada de suelos, resultando el perfil de suelo residual como LG' y el perfil de saprolito como NG, lo cual se correlacionó de manera directa con la aproximación visual.
- A partir de la distribución granulométrica de las muestras ensayadas se puede afirmar que existe una clara

variación de la misma con la profundidad. Esta variación en el contenido de finos y la forma de las curvas granulométricas se atribuye a la existencia de distintos grados de intemperismo. Los suelos lateríticos superficiales poseen una mayor cantidad de finos que el saprolito.

- La superficie específica obtenida con el ensayo de azul de metileno o BET posee un valor característico a la caolinita, aproximadamente $60 \text{ m}^2/\text{gr}$. Estos resultados se corresponden de manera apropiada con las características del suelo y los índices de Atterberg medidos ya que el suelo presentó una baja plasticidad, típica de la presencia de finos arcillosos del tipo caolinita.

- Los ensayos mineralógicos, realizados a través de difracciones de rayos X, permitieron confirmar que en todo el perfil de suelos el mineral principal es la caolinita. En general más del 50% del suelo en peso se encuentra compuesto por este mineral. En menor proporción se identificaron también illita, goethita, esmectita, cuarzo y hematita. El contenido de hematita tiende a disminuir con la profundidad.

- La relación de sesquióxidos presentes en el suelo es mayor a 2, por lo tanto, estamos en presencia de suelos residuales del tipo fersialíticos.

- Los índices de meteorización calculados varían conforme al aumento de la meteorización. Sus valores oscilan entre 91,4 a 99 para el CIA y el índice WIP entre 45 y 90. Los mismos indican en aumento de la meteorización química desde el saprolito hacia el suelo residual.

- El comportamiento tenso-deformación del perfil estudiado depende del grado de meteorización. La capa menos meteorizada (saprolito) presentó niveles de deformación específico mucho menores que el suelo residual laterítico.

- Los ensayos saturados mostraron una disminución en la compresibilidad, consolidación como así también en la V_s y G_{max} en comparación a los realizados a humedad natural.

- Los minerales presentes en la matriz influyen en el comportamiento mecánico de los suelos residuales analizados. Es posible atribuir que la rigidez para este caso particular, depende del mineral principal la caolinita, sin embargo estudios posteriores podrán identificar los efectos de los minerales como la esmectita, illita y otros minerales.

- La variación G_{max} -tensión vertical efectiva puede modelarse por medio de la ecuación de (Hardin y Drnevich 1972) para arcillas, considerando el OCR obtenido mediante la presión virtual de consolidación.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible gracias al aporte económico de CONICET, SECyT-UNC y ANPCyT.

REFERENCIAS

- [1] Bahlburg, H., y Dobrzinski, N. (2011). A review of the Chemical Index of Alteration (CIA) and its application to the study of Neoproterozoic glacial deposits and climate transitions. Geological Society, London, Memoirs, 36(1), 81-92.
- [2] Blights, G. E., y Leong, E. C. (2012). Mechanics of Residual Soils, Second Edition. Taylor & Francis.

- [3] Cho, G.-C. y Santamarina, J. C. (2001). "Unsaturated Particulate Materials - Particle Level Studies." ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 1, pp. 84-96
- [4] Clariá J. J. (2003). Caracterización y Comportamiento del Módulo de Elasticidad Dinámico de Loess en Estado Natural y Compactado. Tesis Doctoral presentada en la Universidad Nacional de Córdoba. Mayo de 2003.
- [5] Clariá J.J., y Rinaldi V.A., (2007) Shear wave velocity of compacted clayey silt. Geotechnical Testing Journal of the American Society of Testing Materials (USA) Volume 30, Issue 5, ISSN: 0149-6115.
- [6] Collins K. (1985). Towards characterization of tropical soil microstructure. 1st conference in Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brazil. Vol.1, pp. 85-96
- [7] Coutinho, R. Q., Souza Neto, J. B., Barros, M. L. S., Lima, E. S. & Carvalho, H. A. (1998). Geotechnical characterization of a young residual soil/gneissic rock of a slope in Pernambuco, Brazil. 2nd International Sy
- [8] De Campos, T. M. P. (2006). Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR.
- [9] De Mello, V.F.B. 1972. Thoughts on soil engineering applicable to residual soils. Proc. Third Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Hong Kong
- [10] De Salvo, O. E. (1990). "El Perfil de Meteorización de las Rocas Basálticas y su Importancia en la Ingeniería de Fundaciones". Revista Técnica de las Asociaciones Paraguayas de Estructuras y Geotecnia (APE y APG). Ediciones y Arte SRL. Año 1, Nro 1.
- [11] Deere, D.U., y Patton F.D. 1971. Slope stability in residual soils. En Proc., Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico. Vol. 1, Pág. 87-170
- [12] Fam, M. y Santamarina, J. C. (1997). "A Study of Consolidation Using Mechanical and Electromagnetic Waves." Geotechnique, Vol. 47, No. 2, pp. 203-219
- [13] Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., y Young, G. M. (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. Geology, 23(10), 921-924.
- [14] Fookes, P. G. (Ed.). (1997). Tropical Residual Soils: A Geological Society Engineering Group Working Party Revised Report. Geological Society of London.
- [15] Fredlund y H. Rahardjo (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley and Sons, INC., New York.
- [16] Gibson, R.E. (1967) Some Results Concerning Displacements and Stresses in a Nonhomogeneous Elastic Half-Space. *Geotechnique*, 17, 58-67.
- [17] Gidigas, M. D. (1976). Laterite Soil Engineering: Pathogenesis and Engineering Principles. Elsevier.
- [18] Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972). Shear modulus and damping in soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 98(7), 667-692. In: Proceedings of the 10th ECSMFE, vol. 3, Florence, pp. 915-956.
- [19] Kramer, J. R., (1968). Mineral water equilibria in silicate weathering. International Geological Congress, Report of the 23rd Session, section 6, 149-160.
- [20] Kwon T.H y Cho G.C. (2005). Smart geophysical characterization of particulate materials in a laboratory. Smart Structures and Systems 1 (2), 217-233
- [21] Kramer, J.R. 1968. Mineral-water equilibria in silicate weathering. International Geological Congress, 23rd session, Section 6, 149-160.
- [22] Lee, J. S., y Santamarina, J. C. (2005). Bender elements: performance and signal interpretation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(9), 1063-1070.
- [23] Little, A. L. (1967). The engineering classification of residual tropical. In Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1, págs. 1-10. Mexico.
- [24] Macari, E. and Jr., Hoyos. (1996). "Effect of Degree of Weathering on Dynamic Properties of Residual Soils." J. Geotech. Engrg., 122(12), 988-997
- [25] Mitchell, J. K. y Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behaviour. 3rd Ed. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- [26] Nesbitt H.W. y Young G.M (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature. 299. 715-717
- [27] Nogami, J. S.; Villibor, D. F. (1994). "Identificação Exedita dos Grupos da Classificação MCT para Solos Tropicais". X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Volume 4. Foz do Iguacu, Brasil.
- [28] Parker, A. 1970. An index of weathering for silicate rocks. Geological Magazine 107, 501-504.
- [29] Pennington, D. S., Nash, D. F., & Lings, M. L. (2001). Horizontally mounted bender elements for measuring anisotropic shear moduli in triaxial clay specimens. ASTM geotechnical testing journal, 24(2), 133-144.
- [30] Rahardjo, H., Aung, K., Leong, C., & Rezaur, R. (2004). Characteristics of residual soils in singapore as formed by weathering. Journal of Engineering Geology , Vol. 73, No. 1-2, pp. 157-169.
- [31] Reis, R. M. (2004). Comportamento tensão-deformação de dois horizontes de um solo residual de gnaiss (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- [32] Rinaldi V.A, y Santamarina J.C (2002) " Cemented Soils, small strain stiffness" Proc. Fourth International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials. Ed. S. Burns., P. Mayne, C. Santamarina, IOS Press, Georgia , Atlanta, USA. ISBN 978-1-58603-908-0
- [33] Sandroni, S. S. 1985. Stress relief effects in gneissic saprolite soils. In: Proceedings of the First International Conference on the Geomechanics of Tropical, Laterite and Saprolite Soils, Brasilia, 3, 290-6.
- [34] Souza Martins A.P. (2005). Estudo da Influência das Interações Físico-Químicas no Comportamento Mecânico De Dois Solos Tropicais do Município de Ouro Preto-MG [Rio de Janeiro] 2005 XV, 321 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2005).
- [35] Sowers, G.F. (1985). "Residual soils in the United States." Sampling and Testing of Residual Soils: A Review of International Practice, Scorpion Press, Hong Kong, 183-191
- [36] Suzuki, S. (2004). "Propriedades Geomecânicas de Alguns Solos Residuais e Colúviais ao Longo do Oleoduto Curitiba - Paranaguá". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, Brasil. 346 p.
- [37] Vargas, M. (1953). "Some Engineering Properties of Residual Clay Soils Occurring in Brazil". Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering., (pags. 67-71). Switzerland.
- [38] Vaughan (1988). Mechanical and hydraulic properties of in-situ residual soils. General Report, Session 2, First International Conference on Geomechanics in Tropical, Lateritic and Saprolitic Soil, Brasilia, 3, 231-63.
- [39] Viggiani G. y Atkinson J. H. (1995), "Interpretation of Bender Element Tests". Technical Note. Geotechnique 45, No 1, pp. 149-154.
- [40] Wesley, L. (2009). Fundament of soil Mechanics For Sedimentary and Residual Soils. John Wiley & Sons, Inc.
- [41] Wesley. (2010). Geotechnical Engineering in Residual soils. New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC.
- [42] Yun, T.S y Santamarina, J. C. (2005). " Decementation, Softening, and Collapse: Changes in Small-Strain Shear Stiffness in k0 Loading