

Determinación de parámetros geomecánicos en suelos metaestables, mediante el uso de ensayos de campo¹

Determination of geomechanical parameters in metastable soils, through the use of field tests.

Juan Carlos Ruge Cárdenas²
Renato Pinto da Cunha³

Resumen: El siguiente trabajo tiene como objetivo determinar mediante el uso de ensayos in situ valores adecuados de parámetros geomecánicos útiles en la aplicación práctica según el problema geotécnico que se necesite atender. En este caso, se analizarán los parámetros relacionados con el modelo elastoplástico Mohr-Coulomb, uno de los más utilizados actualmente por la consultoría especializada en el tema. Los resultados de estos ensayos fueron obtenidos mediante pruebas realizadas en el campo experimental de la Universidad de Brasilia (UnB) sobre arcillas porosas típicas del Centro Oeste brasilero, con características intrínsecas dependientes de la metaestabilidad de su estructura interna, así como de la parcial saturación. Los parámetros del suelo se estimaron por medio de ensayos de campo (CPT, DMT, PMT y SPT-T), con el fin de entender el comportamiento mecánico de este suelo residual laterítico. Los análisis de estos resultados de ensayos de campo permiten estimar propiedades geotécnicas de este suelo, así como parámetros de resistencia, deformabilidad e identificación estratigráfica. Este análisis brinda una oportunidad interesante al momento de seleccionar los parámetros necesarios para los diseños geotécnicos de la ingeniería básica y de detalle de un proyecto específico, ya que le da una coyuntura importante al proyectista para que deje de depender exclusivamente de los resultados de ensayos de laboratorio, que en ocasiones pueden no ser del todo confiables en un suelo de estas características.

Palabras clave: ensayos de campo, parámetros geomecánicos, SPT, CPT, DMT.

1. Este artículo de investigación científica y tecnológica, según Colciencias (2010), se da como producto de las líneas de investigación conjuntas de ensayos de campo (GPFees) y modelación de problemas geotécnicos reales (GIGUP), de las universidades involucradas; puede ser utilizada como herramienta adicional de análisis en otras áreas del grupo de investigación, ya que puede ofrecer soporte a la modelación e interpretación del comportamiento de estructuras geotécnicas, específicamente en lo relacionado con los aspectos geotécnicos de la interacción de las fundaciones y estructuras de contención abarcadas por este proyecto de investigación, el cual fue apoyado inicialmente por el GPFees de la Universidad de Brasilia.

Fecha de presentación: 24-Abril-2011

Fecha de aprobación: 1-Junio-2011

2. Juan Carlos Ruge Cárdenas: Ingeniero Civil - MSc en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia, candidato a Ph.D. en Geotecnia. Docente investigador del programa de Ingeniería Civil de la Universidad Piloto de Colombia. SCLN 413 Bloco C Ap.212 Asa Norte, Cep.70876-530. Brasília, D. F. - Brasil. Correo electrónico: jcruge@gmail.com

3. Renato Pinto da Cunha: Ingeniero Civil - MSc. en Geotecnia. Ph.D. en Geotecnia. Posdoctorado. Profesor Asociado 3 del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Facultad de Tecnología de la Universidad de Brasilia (UnB). Universidad de Brasilia. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Programa de Posgrado en Geotecnia. Cep. 70910-900 – Brasilia, D. F. - Brasil. www.geotecnia.unb.br/gpfees. Correo electrónico: rpcunha@unb.br

Abstract: *The following work aims to determine the appropriate values by using in situ testing of geomechanical parameters that are useful in practical geotechnical problems. In this case, the parameters related to the Mohr-Coulomb elastoplastic model will be analyzed, one of the most used by the consultancy specialized in the subject. The results of these trials were obtained through testing in the experimental field of the University of Brasilia (UnB) on porous clay typical of Brazilian Midwest, with dependent intrinsic metastability of its internal structure and the partial saturation. The soil parameters were estimated through field tests (CPT, DMT, PMT, and SPT-T), in order to understand the mechanical behavior of this residual lateritic soil. The analysis of these field tests allows estimating the geotechnical properties of soil and strength parameters, deformation and stratigraphic identification. This analysis provides an interesting opportunity when selecting the parameters required for geotechnical design of the basic and detail engineering of a specific project, as it gives the designer an important opportunity to stop relying solely on laboratory tests, which sometimes may not be entirely reliable in a soil with these characteristics.*

Keywords: *field testing, geomechanical parameters, SPT, CPT, DMT.*

Introducción

Se conoce de antemano que en la actualidad, incluso con los avances tecnológicos de las últimas décadas, la técnica invasiva para el estudio geotécnico sigue siendo la herramienta más efectiva para obtener con menos incertidumbre los parámetros geomecánicos (independiente del modelo constitutivo de análisis) de un suelo, esto se hace generalmente mediante el retiro de muestras del suelo usando métodos de perforación, muestreo y una etapa posterior de ensayos de laboratorio; en contraste con los procedimientos no invasivos que aún no logran una eficiencia suficientemente confiable cuando se quiere enfrentar un análisis de un problema geotécnico en particular. Sin embargo, existe una serie de ensayos de campo que, de acuerdo con el escenario que el proyectista geotécnico esté abordando, pueden ser de utilidad como complemento a los ensayos de laboratorio, en especial, en la determinación de parámetros en suelos con comportamientos distintivos que pueden presentar dispersión en la medición de los datos bajo estudio, como es el caso específico que se quiere analizar en este trabajo (Rodrigues, 2006).

En este caso, se va a destacar la geología del sitio, los ensayos in situ, las correlaciones de parámetros geomecánicos y los ensayos de laboratorio realizados en el campo experimental de la Universidad de Brasilia (UnB), localizado sobre una arcilla porosa típica del Centro Oeste brasileiro, que posee un comportamiento peculiar debido a las características colapsables dependientes de su estructura interna y de la parcial saturación (Cunha & Camapum de Carvalho, 1997).

Metodología

Características geotécnicas y geológicas del sitio

En el área donde se localiza el campo experimental (figura 1) se puede encontrar un perfil típico del estrato de suelo laterítico rojo arcilloso del Centro Oeste brasileiro, denominado arcilla porosa, que presenta una baja resistencia a la penetración (SPT entre 1 y 6 golpes), baja resistencia de punta (CPT que varía de 0,6 a 2,3 MPa), baja capacidad de soporte, bajo nivel de saturación y alta permeabilidad (de 10^{-3} a 10^{-4} m/s), como se puede consultar en Cunha, Jardim & Pereira (1999). Debido a su alta porosidad (similar a las arenas) y al tipo de cementación, presenta una estructura metaestable⁴ cuando es sometida a un aumento de humedad y/o alteración de su estado de tensiones (incluso en trayectorias de tracción), que muestra en la mayor parte de los casos una brusca variación de volumen conocida como colapso (Rodrigues, 2006). Este material suprayace a un estrato de suelo residual proveniente de la meteorización de ardósias, denominado limo arcilloso de comportamiento extremadamente anisotrópico (Cunha & Camapum de Carvalho, 1997).

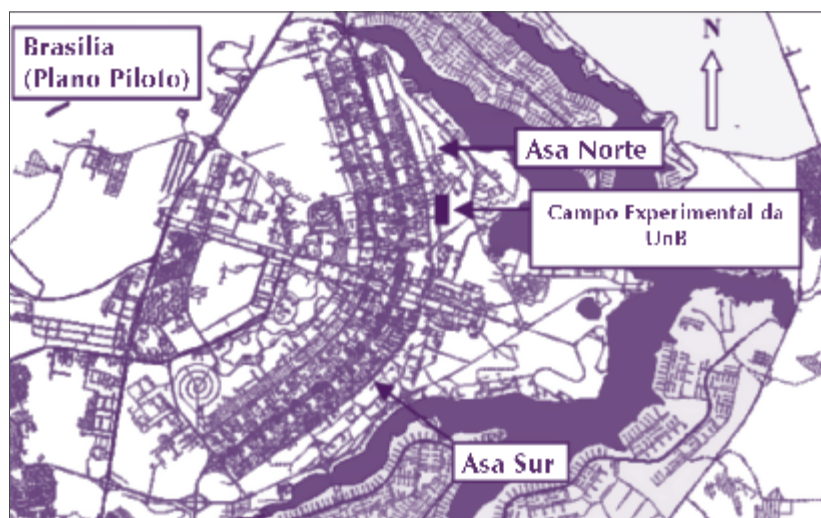


Figura 1. Localización del campo experimental en Brasilia.

El estrato de arcilla porosa finaliza cuando el registro de los sondeos indica un aumento súbito de los índices paramétricos de los ensayos SPT, CPT y DMT, esto se da cuando se alcanza el suelo residual. Se observa que hasta 18,00 metros (profundidad máxima lograda en los sondeos) no hay presencia de nivel freático en el campo experimental de la UnB.

Con el fin de conocer las propiedades del suelo, se hicieron dos perforaciones de inspección ejecutadas de modo manual para la toma de muestras alteradas e inalteradas. Fueron llevados a cabo ensayos de caracterización para la identificación de las propiedades físicas del suelo, ensayos para la determinación de la curva característica mediante la técnica del papel filtro, con medidas de succión matricial y total, ensayos de consolidación, corte directo y triaxiales K_o , $CU_{nat/sat}$ y $CKU_{o\ nat/sat}$, para la obtención del comportamiento mecánico del perfil de suelo. Para un análisis más amplio, se pueden consultar diferentes ensayos realizados por otros autores en Mota, Farias, Cunha & Parente (2003), Anjos & Cunha (2006) y Araujo, Palmeira & Cunha (2009).

4. La metaestabilidad en un sistema, en este caso en el suelo, se define como la pérdida temporal de estabilidad por la acción de una fuerza interna o externa, con la posterior recuperación de cierta parte de la estabilidad inicial.

Según Mota (2002), el perfil del suelo del campo experimental de la Universidad de Brasilia muestra horizontes bien diferenciados (ver la figura 2):

- De 0,00 a 8,80 m: horizonte de suelo residual laterítico, que experimentó procesos de intemperismo; constituido por una arcilla arenosa roja oscura (de 0 a 5,0 m) y una arcilla gravo-arenosa roja oscura (de 5 a 8,80 m).
- De 8,80 a 10,30 m: horizonte de transición, compuesto de un suelo laterítico (de 8,80 a 9,80 m) y pocas estructuras relictas (de 9,80 a 10,30 m).
- De 10,30 a 15,00 m: horizonte de suelo saprolítico de ardósia, constituido por intercalaciones de cuarzo (de 10,30 a 11,30 m) y un limo arcilloso rojo (de 11,30 a 15,00 m).

El estrato de arcilla porosa finaliza cuando el registro de los sondeos indica un aumento súbito de los índices paramétricos de los ensayos SPT, CPT y DMT, esto se da cuando se alcanza el suelo residual. Se observa que hasta 18,00 metros (profundidad máxima lograda en los sondeos) no hay presencia de nivel freático en el campo experimental de la UnB.

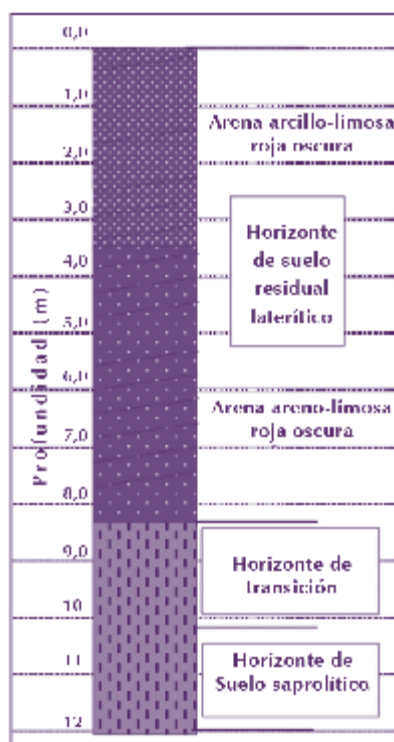


Figura 2. Perfil de suelo típico del campo experimental

Fuente: Mota, N., Farias, M., Cunha R, & Parente, R. (2002),

Ensayos in situ

En el campo experimental de la UnB, se ejecutaron cuatro campañas de ensayos de campo en diferentes épocas del año (seca y lluviosa). Para posibilitar un análisis comparativo de los resultados, se optó en cada campaña por la realización de ensayos: ensayo de penetración de cono eléctrico (CPT), dilatómetro de Marchetti (DMT), presiómetro de Menard (PMT) y ensayo de penetración estándar con torque (SPT-T), que serán explicados a continuación.

Durante la ejecución de las campañas se obtuvieron los perfiles de humedad a cada 0,50 m de profundidad, hasta el nivel límite de los sondeos del SPT-T. En ninguno de los ensayos de campo fue encontrado nivel freático; por tal razón, las correlaciones que se mostrarán más adelante están expresadas en términos efectivos, ya que la respuesta del suelo es de carácter drenado.

Ensayo de penetración de cono eléctrico (CPT)

Los ensayos de cono fueron ejecutados con un equipo de capacidad máxima de penetración de 200 kN, barras cilíndricas de 33 mm de diámetro y 1,00 m de longitud, con un cono eléctrico/piezocono de diámetro igual a 3,56 cm, área de 10 cm², ángulo de base igual a 60°, con capacidad máxima en la punta de 100 kN y 1.000 kPa de fricción lateral, acoplado a un sistema de adquisición de datos. Los datos de q_c y f_s (ver la figura 3) fueron medidos cada 10 cm con velocidad de penetración estática de 2,0 cm/s, conforme D-3441 (ASTM, 1995a), D-5778 (ASTM, 1995b) y NBR-12069 (ABNT, 1991a).

Dilatómetro de Marchetti (DMT)

Para adelantar este ensayo, se adoptó el mismo sistema de penetración del ensayo CPT hasta obtener rechazo por parte del material; el procedimiento para la realización de los ensayos fue el de la norma D18.02 (ASTM, 1986).

Se obtuvieron lecturas de las presiones A y B al introducir la lámina dilatométrica a una velocidad de 2,0 cm/s cada 20 cm, allí se interrumpió la inserción y se tomaron de manera conjunta con las profundidades de ensayo los datos iniciales, así como el cero y las presiones de calibración ΔA y ΔB . En la figura 4 se puede observar los resultados del ensayo: módulo dilatométrico (E_D), índice de esfuerzo horizontal (K_D) e índice del material (I_D).

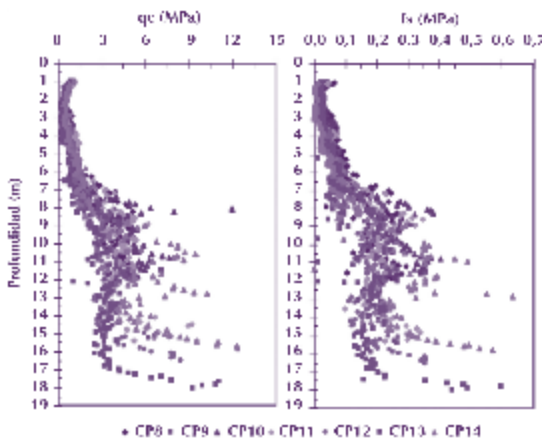


Figura 3. Resultados de ensayos CPT.

Fuente: Mota, N., Farias, M., Cunha R, & Parente, R. (2002),

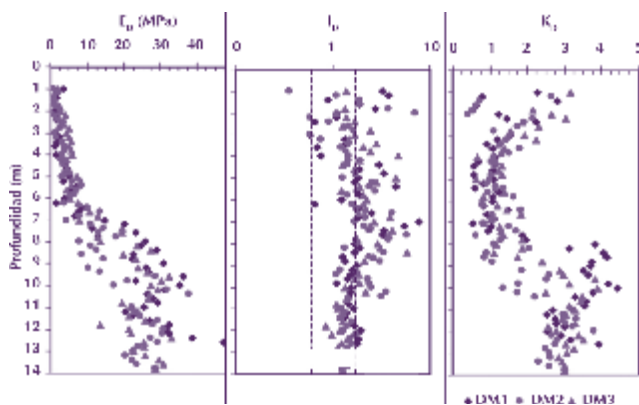


Figura 4. Resultados de ensayos DMT.

Fuente: Mota, N., Farias, M., Cunha R, & Parente, R. (2002),

Presiómetro de Menard (PMT)

Este ensayo fue ejecutado bajo los procedimientos de la norma D-4719 (ASTM 1987), y durante el mismo se midieron las presiones aplicadas y las variaciones volumétricas correspondientes a la expansión de la cavidad cilíndrica en la masa de suelo, con lo que se alcanzó la curva presiométrica necesaria para la determinación de los parámetros de resistencia y deformabilidad del suelo, así como la predicción del esfuerzo horizontal *in situ* presentado.

Los ensayos fueron ejecutados en perforaciones preexcavadas, abiertas cada metro, para la posterior inserción de la sonda presiométrica. La presión fue aplicada, en general, en escalones de 25 kPa.

En la figura 5 se presentan las curvas presiométricas obtenidas para los ensayos de PMT realizados en el campo experimental. Las curvas fueron corregidas (volumen y presión) y el tramo de recompresión fue removido hasta P_{oM} (presión inicial del tramo pseudoelástico), es decir, el punto de inflexión de la curva presiométrica o restablecimiento de las tensiones originales del terreno.

5, El fenómeno de tixotropía, exclusivo de suelos arcillosos, se presenta cuando después de un proceso de remoldeo la arcilla recupera cierto valor de la resistencia inicial, bajo determinadas condiciones, en especial, de humedad.

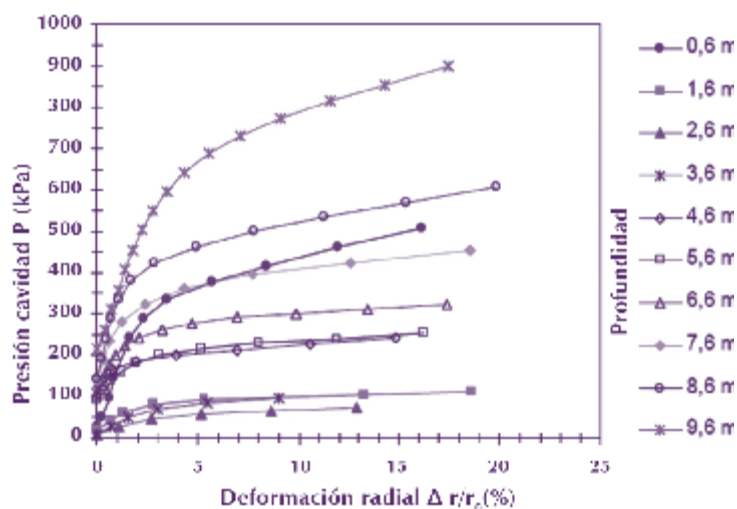


Figura 5. Valores de parámetros dilatométricos del ensayo DMT.

Fuente: Autores

Ensayo de penetración estándar con medición de torque (SPT-T)

Se hicieron cinco sondeos del tipo SPT-T de manera clásica, adicionando una medición de torque de acuerdo con la norma NBR-6484 (ABNT, 1980). El momento de fuerza o torque fue realizado después de la penetración del muestreador estándar (Raymond de 50,8 mm), retirando la punta retenedora y acoplado un pin adaptador del torquímetro.

Según Peixoto (2001), el torque debe ser medido inmediatamente después de la inserción, puesto que en algunos materiales existe una reestructuración del suelo, particularmente en arcillas con ciertas características tixotrópicas⁵. El momento de fuerza fue efectuado siempre por el mismo operador, con velocidad aproximada de una vuelta cada 10 s, con lo que registró una lectura de torque máximo de ¼ de vuelta y torque residual luego de una y dos vueltas completas. Además se verificó que la resistencia residual se estabilizara después de la primera vuelta (figura 6).

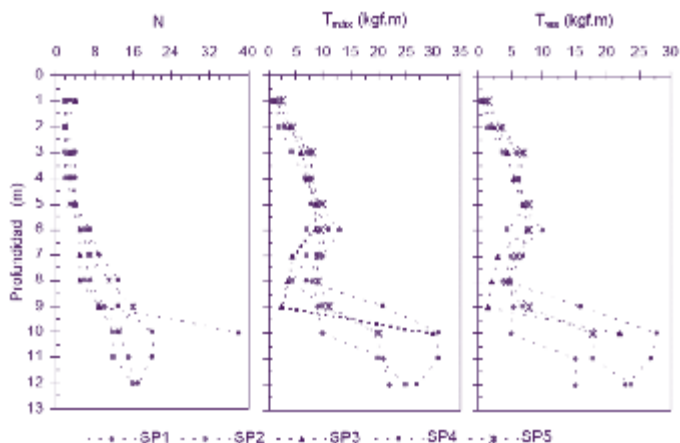


Figura 6. Número de golpes, torque máximo y torque residual del ensayo SPT-T.

Fuente: Autores

Análisis de parámetros de campo

Un aspecto importante cuando se intentan calcular parámetros mediante ensayos DMT y CPT es que el suelo poroso y metaestable de Brasilia, debido a su alta permeabilidad, tiende a tener un comportamiento similar a un suelo arenoso, es decir, es posible que cuando se someta a una carga exhiba una respuesta drenada por la característica mencionada anteriormente, sumado a la ausencia de agua freática en el campo experimental.

Los ensayos de campo reprodujeron de manera satisfactoria las condiciones de humedad y trayectoria de tensiones observadas en el campo, cuando se compara con valores determinados en el laboratorio, incluso cuando se involucró la succión en los ensayos, factor importante en el comportamiento de este tipo de suelos.

En la tabla 3 se puede observar la aplicación específica de cada uno de los ensayos de campo usados en esta investigación, con el fin de compararlos con las posibles correlaciones para encontrar los parámetros de resistencia hallados en los ensayos de laboratorio.

Tabla 3.
Aplicación de ensayos de campo usados.

Ensayo de campo	Designación	Parámetro	Aplicación
Presiómetro de Menard	PMT	G $\psi \times \varepsilon$	Módulo de corte G , resistencia al corte, esfuerzo horizontal <i>in situ</i> , propiedades de consolidación
Cono eléctrico	CPT	q_c, f_s	Estratificación, resistencia al corte, densidad relativa, propiedades de consolidación.
Dilatómetro de Marchetti	DMT	p_0, p_1	Rigidez, resistencia al corte.
Ensayo de penetración estándar	SPT	N	Estratificación, ángulo de fricción. ϕ'

Fuente: Modificado de Schnaid (2005).

Para una correcta interpretación de parámetros en los que se usa DMT, se recomienda Marchetti & Crapps (1981) para el ángulo de fricción (ϕ), Lunne, Robertson & Powell (1997) para coeficiente de empuje en reposo (K_0), Mitchell & Gardner (1975) para módulo oedométrico (M) y Robertson & Campanella (1988) para el módulo de Young (E) por medio del CPT, basado en la experiencia anterior obtenida por Mota (2003).

Correlaciones con los parámetros del modelo de referencia

Es importante destacar que para cada uno de los ensayos de campo existen diversas correlaciones convenientes al momento de hallar diferentes parámetros de suelo (resistencia, deformabilidad, flujo, entre otros), las cuales en algunos casos no representan debidamente las condiciones necesarias en el problema geotécnico que se debe afrontar, por tal razón, se analizarán las correlaciones de cada uno de los ensayos *in situ*, pero teniendo en cuenta el ensayo de laboratorio correspondiente.

Ensayo de cono eléctrico - ConePenetration Test (CPT)

Según Coutinho & Schnaid (2010), para estimar la historia de esfuerzos de suelos tropicales es recomendable usar la correlación

$$\text{OCR} = f(\Delta u_1 / \sigma_{v0}) \quad (1)$$

Donde Δu_1 es la presión de poros y σ_{v0} el esfuerzo vertical efectivo en la punta del cono, en relación con un ensayo en condiciones oedométricas para un esfuerzo de preconsolidación calculado a las 24 horas; sin embargo, en este tipo de suelo arcillo-poroso que muestra una respuesta drenada ante cargas, no es válida esta correlación, ya que no se generaría presión de poros en el lugar de la toma del ensayo. Con respecto al coeficiente de presión de tierras en reposo, es posible usar la recomendación de Mayne & Kulhawy (1982), $K_0 = (1 - \sin\phi') \text{OCR}^{\sin\phi'}$ con una variabilidad de $1,06 \pm 0,24$ para suelos tropicales (Sully & Campanella, 1992).

Con relación al ángulo de fricción drenado Mayne & Kulwahy (1990) propusieron una correlación entre σ'_v (esfuerzo vertical efectivo) y q_c (resistencia de punta de cono):

$$\phi' = \tan^{-1} \left[0.1 + 0.38 \log \left(\frac{q_c}{\sigma_v} \right) \right] \quad (2)$$

Una expresión adicional que toma en cuenta la normalización no lineal de q_c , con el nivel de esfuerzos y es consistente también con el número de golpes en el SPT, con una eficiencia de 60% normalizado a un nivel de esfuerzos de una atmósfera $[(N_1)_{60}]$, es según Mayne & Kulwahy (1990):

$$\phi' = 17,6^\circ + 11,0 \log(q_{c1}) \quad (3)$$

Donde $q_{c1} = q_c / (\sigma'_v / \sigma_{atm})^{0.5}$ es la resistencia de punta de cono normalizada.

Robertson & Campanella (1983) dan una idea interesante al correlacionar la relación de fricción F_r , con la resistencia de punta de cono y el tipo de suelo en análisis, como se puede observar en la figura 7.

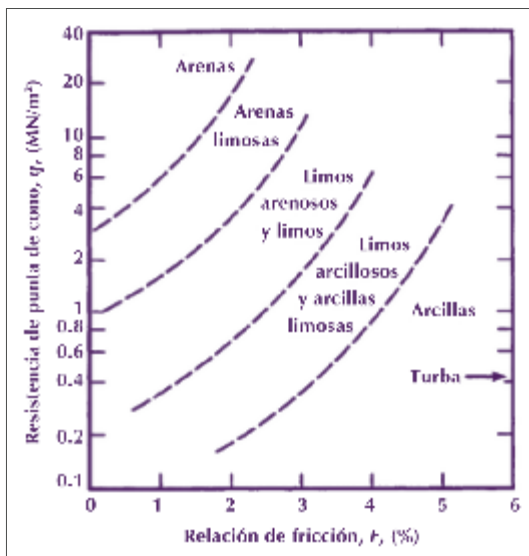


Figura 7. Correlación entre resistencia de cono y la relación de fricción.

Fuente: Robertson & Campanella, 1983.

Para el módulo de Young (figura 8) y el módulo de deformación confinado en condiciones efectivas (figura 9), sería razonable usar la correlación para arenas de Bellotti, Ghionna, Jamiolkowski, Robertson & Peterson (1989) y Eslaamizaad & Robertson (1996) respectivamente, ya que, como se mencionó anteriormente la arcilla porosa bajo estudio, presenta un comportamiento similar a un suelo arenoso, además de mostrar una respuesta drenada ante cargas, por la ausencia de saturación natural en el terreno del campo experimental.

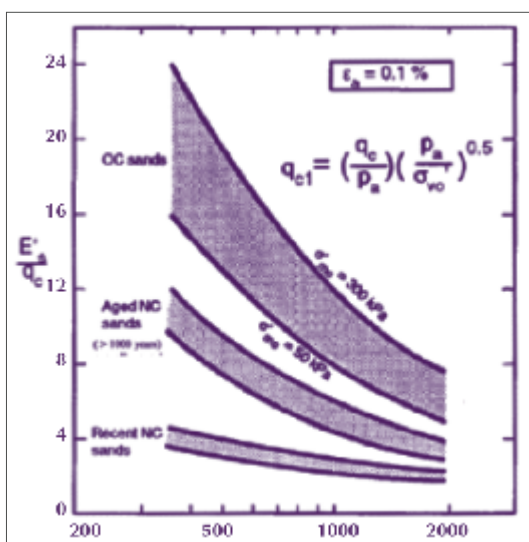


Figura 8. Correlación del módulo de Young drenado para el CPT.

Fuente: Bellotti et al., 1989.

Es importante destacar que para cada uno de los ensayos de campo existen diversas correlaciones convenientes al momento de hallar diferentes parámetros de suelo (resistencia, deformabilidad, flujo, entre otros), las cuales en algunos casos no representan debidamente las condiciones necesarias en el problema geotécnico que se debe afrontar, por tal razón, se analizarán las correlaciones de cada uno de los ensayos in situ, pero teniendo en cuenta el ensayo de laboratorio correspondiente.

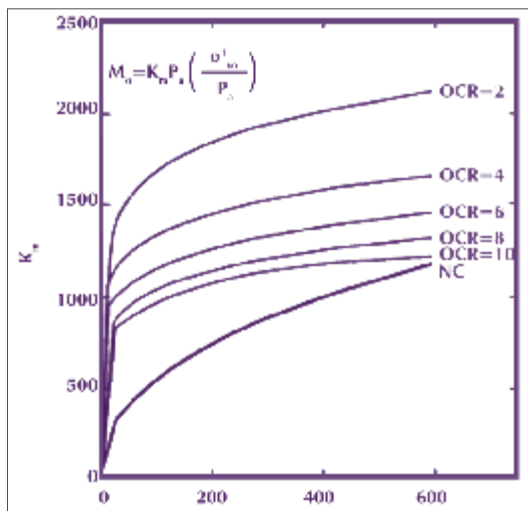


Figura 9. Correlación módulo de deformación confinado para CPT.
Fuente: Eslaamizaad & Robertson, 1996.

Dilatómetro de Marchetti (DMT)

Para obtener la relación de sobreconsolidación y coeficiente de presión de tierras en reposo, Lunne, Eidsmoen, Gillespie & Howland (1986) proponen utilizar con variabilidad de 10% para suelos lateríticos la ecuación $OCR = mK_D^{1.15}$, con valores de $m=0.3-0.33$ y $K_o=0.34K_D$ para arcillas normalmente consolidadas con una edad menor que 60.000 años.

Sin embargo, en la siguiente tabla se puede analizar con más detalle cada una de las correlaciones existentes según Marchetti *et al.* (2001).

Tabla 4.
Correlaciones básicas de parámetros geotécnicos del DMT.

Parámetro	Descripción	Correlación
K_o	Coficiente de presión de tierras en reposo	$K_{o,DMT} = (K_o / 1.5)^{0.47} - 0.6 \Rightarrow I_D < 1.2$
OCR	Relación de sobreconsolidación	$OCR_{DMT} = (0.5K_D)^{1.56} \Rightarrow I_D < 1.2$
ϕ'	Ángulo de fricción drenado	$\phi'_{DMT} = 28^\circ + 14.6^\circ \log K_D - 2.1 \log^2 K_D \Rightarrow I_D > 1.8$
γ	Peso específico	Carta de Marchetti & Craps (1981)
M	Módulo de confinamiento vertical drenado	$M_{DMT} = R_M E_D$ si $I_D \leq 0.6 \therefore R_M = 0.14 + 2.63 \log K_D$ si $I_D \geq 3 \therefore R_M = 0.5 + 2 \log K_D$ si $0.6 < I_D < 3 \therefore R_M = R_{Mo} + (2.5 - R_{Mo}) \log K_D$ con $R_{Mo} = 0.14 - 0.15(I_D - 0.6)$

Fuente: Marchetti, 2001.

Donde K_D es el índice de esfuerzo horizontal e I_D el índice dilatométrico del material.

Presiómetro de Menard (PMT)

Con respecto a la prueba de campo PMT, es importante resaltar la correlación aportada por Kulhawy & Mayne (1990), expresada como $p_c = 0.45 p_l$, donde p_c es el esfuerzo de preconsolidación del suelo y p_l la presión límite del ensayo explicada anteriormente.

También es posible correlacionar el módulo del presurímetro E_p (hallado mediante la teoría de la expansión de cavidades) con los números de golpes N_F del ensayo de penetración estándar por medio de la siguiente fórmula:

$$E_p (kN / m^2) = 908 N_F^{0.66} \quad (4)$$

Ensayo de penetración estándar con medición de torque (SPT-T)

A pesar de ser un ensayo muy criticado por las desventajas que presenta, como: diferencias en la repetición dependiente del operador, problemas en la estandarización del ensayo, obtención de muestras alteradas y operación manual, este todavía es aceptado en el ámbito geotécnico por su bajo costo, fácil ejecución y el plus de recolectar muestras de manera simultánea durante la operación del ensayo (Decourt L., 2002).

La historia de esfuerzos se puede obtener de forma aproximada en función directa del número de golpes en campo N_F , de acuerdo con una regresión con una base de 110 puntos realizada por Mayne & Kemper (1988), traducida en la ecuación $OCR = 0,193(N_F / \sigma_v)^{0,689}$.

Así mismo, el módulo de elasticidad drenado se puede obtener del número de golpes en campo, según Schmertmann (1970), de la siguiente manera:

$$E (kN / m^2) = 766 N_F \quad (5)$$

Kulhawy & Mayne (1990) aproximaron el ángulo de fricción en condiciones drenadas, con lo que lograron una de las correlaciones más aceptadas en el ámbito de los diseñadores geotécnicos, mediante:

$$\phi' = \tan^{-1} \left[\frac{N_F}{12.2 + 20.3 \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right)} \right]^{0.34} \quad (6)$$

Donde σ'_v es la presión efectiva por sobrecarga y P_a la presión atmosférica.

A pesar de ser un ensayo muy criticado por las desventajas que presenta, como: diferencias en la repetición dependiente del operador, problemas en la estandarización del ensayo, obtención de muestras alteradas y operación manual, este todavía es aceptado en el ámbito geotécnico por su bajo costo, fácil ejecución y el plus de recolectar muestras de manera simultánea durante la operación del ensayo (Decourt L., 2002).

Resultados

En la tabla 5 se pueden observar los parámetros definitivos obtenidos (modelo Mohr-Coulomb) para el área del campo experimental de la UnB, de acuerdo con los datos encontrados de las correlaciones de ensayos de campo.

Tabla 5.

Parámetros del modelo Mohr-Coulomb obtenidos del análisis de ensayos de campo y laboratorio.

Estrato	Parámetros ($\psi = 0$)				
	γ (kN/m ³)	E' (MPa)	ν'	C (kPa)	ϕ (°)
I (0-3 m)	13,88	20	0,2	7,0	24
II (3-8 m)	15,45	45	0,2	9,0	24
III (8-12 m)	17,66	80	0,2	4,0	20
IV (12-24 m)	19,00	120	0,2	-	-

Fuente: Autores

De otra parte, dado que el fenómeno de dilatación pertenece exclusivamente al comportamiento de suelos granulares, y por tratarse de un suelo que tiende a tener una consolidación baja, se recomienda usar el valor de cero ($\psi = 0$) grados (como se observa en la tabla 5) para este parámetro del modelo Mohr-Coulomb, de acuerdo con Nieto *et al.* (2009).

Los valores de peso específico y cohesión fueron tomados de Mota (2003), quien efectuó ensayos de caracterización en el campo experimental de la UnB, puesto que por las características de comportamiento similar a un suelo granular que muestra la arcilla porosa de Brasilia cuando es cargado, los valores de cohesión en condiciones efectivas tienden a ser bajos, por lo cual se decidió tomar los valores de cohesión para el modelo Mohr-Coulomb, directamente de los ensayos de laboratorio. Para el peso específico se puede usar también la carta de Marchetti & Craps (1981), según lo ya mencionado.

Con relación al módulo de Young, este fue correlacionado usando un factor de corrección F que establece una proporcionalidad entre el mismo y el módulo dilatométrico E_D . Según Robertson, Campanella, Gillespie & By (1988), el factor de corrección F es igual a 10 para suelos cohesivos y 2 para suelos arenosos.

Para el cálculo del ángulo de fricción drenado, las correlaciones con CPT y DMT tienden a tener una buena aproximación al valor real medido en el laboratorio, sin embargo, la dispersión obtenida con CPT fue relativamente alta, por lo que se decidió seleccionar las correlaciones con DMT mencionadas antes, que resultaron ser menos variables en toda el área del campo.

Conclusiones

Es claro que uno de los aspectos que posibilitan más los errores en un diseño geotécnico o inclusive en una modelación de tipo numérico es la obtención y selección correcta de los parámetros geomecánicos, no solo en el momento de la escogencia de los mismos, con el objeto de usar determinado modelo constitutivo, sino también cuando se pretende emprender un estudio paramétrico pormenorizado de calibración de cada uno de los parámetros (Ruge, 2009). En este caso en particular, es importante corroborar en los resultados, como se mencionó a lo largo del documento, que el suelo metaestable de Brasilia presenta características similares a un suelo arenoso y una respuesta drenada cuando es cargado.

Por tal razón, en este trabajo se consiguió comparar estos parámetros desde el marco de la eficiencia de cada ensayo de campo, de acuerdo con las correlaciones presentadas y el ensayo *in situ* que reproduce de mejor manera el parámetro estudiado, con el fin de reducir en un grado importante la incertidumbre de esos parámetros en las mediciones de laboratorio, cuando se sospecha que existieron problemas en la ejecución de las mismas, puesto que es importante contar con más de una herramienta de análisis, con el objeto de seleccionar los valores idóneos para el trabajo que se desea abordar, ya sea en un escenario de diseño geotécnico y/o simulación numérica.

Así, se puede concluir lo siguiente con base en los resultados obtenidos:

- Los ensayos CPT y DMT revelaron la capacidad de identificar variaciones en el perfil stratigráfico del suelo, al corroborar el registro de las perforaciones en el campo experimental.
- En los ensayos PMT y SPT-T, aunque presentan una tendencia correcta en los resultados desde el punto de vista cualitativo, las correlaciones no arrojaron los datos esperados, por lo cual se espera avanzar más en este sentido en próximas investigaciones.
- Para este tipo de suelo arcillo-poroso, los resultados muestran que los ensayos que presentan una penetración lenta (CPT y DMT), sin causar una respuesta no drenada en el suelo, son los que mejor se ajustan a las correlaciones de los autores referenciados.

Como se ya se mencionó, la escogencia de los parámetros para determinado modelo constitutivo debe hacerse con base en los ensayos de laboratorio, a partir de muestras inalteradas del suelo; en este caso, se deben usar los ensayos de campo como una opción meramente comparativa, con el fin de observar la dispersión de los resultados de las pruebas en el laboratorio, ya que las condiciones

Es claro que uno de los aspectos que posibilitan más los errores en un diseño geotécnico o inclusive en una modelación de tipo numérico es la obtención y selección correcta de los parámetros geomecánicos, no solo en el momento de la escogencia de los mismos, con el objeto de usar determinado modelo constitutivo, sino también cuando se pretende emprender un estudio paramétrico pormenorizado de calibración de cada uno de los parámetros (Ruge, 2009).

invasivas de los ensayos de campo no permiten el uso de éstas, exclusivamente para este trabajo de elección de parámetros.

En los cálculos de las correlaciones para cada parámetro, se recomienda evidenciar que los ensayos de campo presenten valores con tendencias similares, incluso también desde un punto de vista cualitativo, en comparación con los experimentos, con el objeto de tener una idea global de los valores obtenidos en el laboratorio. En la etapa siguiente de esta investigación, se buscará, mediante programas basados en el MEF, simular numéricamente el comportamiento del suelo, cuando se ejecuta un ensayo de campo de estas características.

Referencias bibliográficas

- Anjos, G. & Cunha, R. (2006). Uso do ensaio dilatométrico na avaliação da capacidade de suporte de fundações escavadas em solo não saturado no Distrito Federal. *XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Cobramseg, Curitiba*, Vol. 2, pp. 631-636.
- Araújo, G., Palmeira, E. & Cunha, R. (2009). Geosynthetic encased columns in a tropical collapsible porous clay. *17th. Int. Conference Soil Mechanics and Geot. Engineering-Icsmge, Alexandria*, Vol. 1, pp. 889-892.
- Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Robertson, P.K., & Peterson, R.W. (1989). Interpretation of moduli from self-boring pressuremeter tests in sand. *Geotechnique*, 39(2): 269-292.
- Coutinho, R. & Schnaid F. (2010). CPT regional report for South America. *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA*.
- Cunha, R. & Camapum de Carvalho, J. (1997). Analysis of the behavior of a drilled pier foundation in a weathered, foliated and folded slate. *XIV International Congress of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburgo, Alemanha*, pp. 785-786.
- Cunha, R., Jardim, N. & Pereira, J. (1999). Characterization of a tropical clay via dilatometer test. *GeoCongress 1999 on behavioral characteristics of residual soils. ASCE Geotechnical Special Publication 92*, pp.113-122.
- Decourt, L. (2002). SPT, SPT-T a prática Brasileira. vantagens, limitações e críticas. *Associação Brasileira de Mecânica dos Solos*.
- Eslaamizaad, S. & Robertson, P. K. 1996. Cone penetration test to evaluate bearing capacity of foundations in sands. *Proceedings of 49th Canadian Geotechnical Conference, St. John's, NF: 429-438*.
- Lunne, T., Eidsmoen, T., Gillespie, D. & Howland, J. D. (1986). Laboratory and field evaluation of cone penetrometers. *Use of In-Situ Tests in Geotechnical Engineering (GSP6), ASCE, Reston/VA: 714-729.6), ASCE, Reston/VA: 714-729*.

- Lunne, T., Robertson, P.K. & Powell, J. J. M. (1997). Cone penetration testing, geotechnical practice. *Blackie Academic e Professional*, New York, USA, 312 p.
- Marchetti, S. & Crapps, D. K. (1981). Flat dilatometer manual. *International Report of GPE Inc.*, Gainesville, Florida, USA.
- Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G. & Calabrese, M. (2001). The flat dilatometer test in soil investigations. *Proc. Intl. Conf. on In-Situ Measurement of Soil Propertie & Case Histories*, Bali: 95-131.
- Mayne, P. W. & Kulhawy, F. H. (1982). Ko-OCR relationships in soil. *Journal of Geotechnical. Engineering*. 108(6): 851-872.
- Mayne, P. W. & Kulhawy F. G. (1990). Manual of estimating soil properties for foundation design. Electric Power Research Institute. Palo Alto, California.
- Mayne, P. W. & Kemper, J. B. (1988). Profiling OCR in stiff clays by CPT and SPT. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 11, No. 2, pp. 139-147.
- Mitchell, J. K. & Gardner, W. S. (1975). In situ measurement of volume change characteristics, *Proceedings, Conference on in situ measurement of soil properties, ASCE speciality conference, state-of-the-art-paper*, Raleigh, N.C., Vol. 2, pp. 279-345.
- Mota, N. (2003). *Ensaio avançados de campo na argila porosa não saturada de Brasília: interpretação e aplicação em projetos de fundação*. Tese de Doutorado em Geotecnia. Universidad de Brasília.
- Mota, N., Farias, M. Cunha, R. & Parente, R. (2002). Avaliação de ensaios de CPT e DMT obtenção do perfil estratigráfico de solos lateríticos de Brasília, D. F. *XVI Congresso Argentino de Mecânica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG)*. Trelew-Chubut- Patagônia-Argentina, Sessão VII, CD-Rom.
- Mota, N., Cunha, R. & Mestnik, Y. (2003). Avaliação da estratigrafia de um solo residual tropical do Centro Oeste Brasileiro via ensaios de Campo. *I Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro Oeste*, Brasília, pp. 165-173.
- Nieto, A., Camacho, J. & Ruiz, E. (2009). Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardeningsoil en suelos arcillosos. *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín*, Vol. 8, Núm. 15, julio-diciembre, 2009, pp. 75- 91. Universidad de Medellín, Colombia.
- Peixoto, A. S. P. (2001). Estudo do ensaio SPT-T e sua aplicação na prática de engenharia de fundações, tese de doutorado. *Faculdade de Engenharia Agrícola – Feagri, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp*, Campinas, SP, 468 p.
- Robertson P.K. & Campanella, R.G. (1988). Guidelines for geotechnical design using CPT and CPTU data, report FHWA, 340 p.
- Robertson P.K. & Campanella, R. G. (1983). Interpretation of cone penetration tests, part I: Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20. No. 4, pp. 718-733.

- Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D. & By, T. (1988). Excess pore pressures and the flat dilatometer test. *Penetration Testing 1988*, Vol. 1 (ISOPT-1, Orlando), Balkema, Rotterdam: 567-576.
- Rodrigues, F. (2006). *Comportamento de túneis superficiais escavados em solos porosos o caso do metro de Brasília/DF*. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra. Portugal.
- Ruge, J. C. (2009). *Análise de escavações urbanas suportadas mediante estruturas em balanço tipo estacas justapostas assente em solos metaestáveis, usando um modelo constitutivo hipoplástico*. Tese em andamento Doutorado em Geotecnia. Universidade de Brasília. Brasil.
- Schmertmann, J. H. (1975). Measurement of in situ shear strength. *Proceedings, Specialty Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, ASCE, Vol. 2, pp. 57-138.
- Snaichd, F. (2009). *In-situ testing in geomechanics: the main tests*. New York: Taylor & Francis.
- Sully, J. P. & Campanella R. G. (1992). An approach to evaluation of field CPTU dissipation data in over consolidated fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 36:369-381, 10.1139/t98-105.