

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil



GUÍA PARA LA PREPARACIÓN DE CAMPAÑAS GEOTÉCNICAS

CARLOS MANUEL LEMUS CALDERÓN

Guatemala

2006

GUÍA PARA LA PREPARACIÓN DE CAMPAÑAS GEOTÉCNICAS

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil

GUÍA PARA LA PREPARACIÓN DE CAMPAÑAS GEOTÉCNICAS

Trabajo de investigación presentado por Carlos Manuel Lemus Calderón para optar al
grado de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala
2006

Vo. Bo.:

(f) _____
Ing. Ricardo Rodas Cordón

Tribunal:

(f) _____
Ing. Alejandro Maldonado

(f) _____
Ing. Ricardo Rodas Cordón

(f) _____
Ing. José Carlos Leal España

Fecha de aprobación:

RESUMEN

Este trabajo de graduación es una guía que intenta proporcionar la información necesaria para llevar a cabo una campaña de investigación, que proporcione los parámetros que deben utilizarse para poder diseñar una cimentación adecuada para diferentes obras de construcción.

Para diseñar una campaña adecuada y eficiente es necesario caracterizar el suelo donde se desea construir, tomando en cuenta la topografía del terreno, las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Es necesario conocer el tipo de estructura que está prevista construir y que parámetros del suelo son necesarios para su diseño.

Para ello, están descrita las formas en que se puede investigar un suelo, ya sean perforaciones a cielo abierto o según las condiciones lo requieran, sondeos mecánicos. Están descritos lineamientos para elegir la ubicación, cantidad y profundidad a la que deben de realizarse estas perforaciones según el tipo de estructura a construir. Estas obras pueden ser residencias, edificios, obras lineales y muros de contención.

Se describen los ensayos que pueden realizarse a una muestra de suelo, los parámetros que se obtienen de cada uno de ellos y el tipo de muestra que se requiere para su ejecución. Basado en esto, se describen los tipos de muestra que se pueden obtener y la forma de obtenerlas.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE CUADROS	vii
 Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
III. GENERALIDADES	3
IV. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS SUELOS	4
V. TIPO DE EXPLORACIÓN	19
VI. OBTENCIÓN DE MUESTRAS EN CAMPO	25
VII. ENSAYOS EN CAMPO	35
VIII. TIPOS DE ESTRUCTURAS	41
IX. CAPACIDAD DE CARGA Y ESTABILIDAD	48
X. DISEÑO DE LA CAMPAÑA	51
XI. CONCLUSIONES	62
XII. RECOMENDACIONES	63
XIII. BIBLIOGRAFÍA	64

LISTA DE FIGURAS	Página
Ecuación de Coulomb	15
Calicata	20
Excavación de pozos a mano	21
Muestras alteradas	25
Tipos de barrenas helicoidales	26
Muestras inalteradas	27
Detalle camión Auger	29
Detalle perforación Auger	29
Tomamuestras bipartido	30
Tomamuestras Shelby	32
Tomamuestras de pistón fijo	33
Cuchara de ensayo SPT	35
Sonda de molinete	37
Obturador sencillo y doble	39
Ensayo Lefranc	40
Detalle muros de contención	46
Aplicación de cargas sobre distintos cimientos	48

LISTA DE TABLAS

Cantidad de muestra retenida en tamiz de 2.00 mm	7
Saturación en arenas	10
Ángulos de fricción para suelos no cohesivos	17
Sondeos de reconocimiento de terreno	51
Separaciones máximas entre sondeos	59

LISTA DE CUADROS

Curva granulométrica	6
Tipos de suelos	8

I. INTRODUCCIÓN

En el Valle de Guatemala existe una gran diversidad de tipos de suelo, combinado con una creciente expansión poblacional en toda el área metropolitana, lo que lleva a que aumente la cantidad y dimensiones de las obras civiles. Esta situación hace que sea más importante disponer de una guía para un buen conocimiento geotécnico acerca del medio en donde se cimentarán estas obras.

La falta de conocimiento del subsuelo, ha producido, en numerosos casos, fallas importantes en obras, aumentos considerables de los costos por reparaciones e incluso pérdidas de vidas. En nuestro medio son frecuentes los problemas asociados con asentamientos importantes, empujes excesivos, baja capacidad de soporte, que se debe a la mala administración de la información y de los recursos con que se cuenta.

Los lineamientos que existen para diseñar estas campañas son limitados, por lo que es indispensable contar con una guía que contenga más información para que las campañas de investigación nos provean de más información útil. Esta guía describe los parámetros que son necesarios para caracterizar un suelo, los parámetros que definen física y mecánicamente un suelo, los tipos de ensayos que se pueden hacer para obtener estos parámetros, y los tipos de obras que requieren un diseño de elementos de cimentación o contención. Basado en esta información, se propone una serie de lineamientos y recomendaciones que ayudarán a que la información que se obtiene de una campaña de investigación sea útil y suficiente.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general.

- Redactar una guía de investigaciones geotécnicas que sirva para obtener información adecuada y suficiente, para el diseño de cimentaciones y elementos de contención.

B. Objetivos específicos.

- Determinar cuál es la información geomecánica necesaria para el diseño de los diferentes tipos de cimentación así como para el diseño de muros de contención, basada en la teoría propuesta en la metodología.
- Describir los ensayos de laboratorio en campo y de laboratorio que se deben realizar para obtener la información requerida para realizar el diseño de una cimentación o elemento de contención.

III. GENERALIDADES

Un estudio de suelos involucra la aplicación de procedimientos y técnicas que se encuentran dentro del área de la geotecnia. La tarea principal que se debe realizar consiste en la evaluación de las características geo-mecánicas del suelo con el fin de ofrecer las recomendaciones geotécnicas necesarias para la factibilidad técnica, diseño, construcción o mantenimiento de una obra civil.

Es definitivamente necesaria la realización de estudios de suelos para edificaciones, viviendas, edificios para comercio o industria de cualquier tamaño, movimientos de tierra, rellenos, muelles, estructuras de contención, puentes, viaductos, excavaciones, caminos y en general cualquier obra que modifique el entorno donde se localiza.

Para realizar un estudio de suelos es indispensable realizar diferentes procesos para identificar las condiciones del suelo, los cuales incluyen la caracterización geotécnica del suelo, que incluye la descripción de los tipos de suelos, la estratigrafía del terreno, las propiedades geomecánicas del suelo y la ubicación del nivel freático.

También es importante conocer cómo se obtienen las muestras en el campo y cómo se almacenan las mismas, ya sean alteradas e inalteradas. Ya obtenidas las muestras se debe conocer qué tipos de ensayos se le deben aplicar a las muestras o los ensayos que se pueden realizar en campo, si se necesitaran.

Por último, se requiere la información necesaria para los tipos de cimentaciones que se deben realizar, y la capacidad de soporte y estabilidad que el suelo puede soportar al aplicarle cualquier tipo de carga. A continuación se describen estos procesos y las condiciones que se requieren para realizarlos.

IV. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS SUELOS

Para caracterizar un suelo, es necesario conocer su naturaleza y sus propiedades físicas. Esto permite separarlos en grupos que se caracterizan por tener comportamientos similares.

A. NATURALEZA DEL TERRENO

1. **GEOLOGÍA.** En las áreas de mayor desarrollo, se puede generalizar que las topografías inclinadas en su mayoría corresponden con suelos residuales originados por la alteración de la roca madre y en menor grado con depósitos aluviales producto de la erosión y deslizamientos, de terrenos más elevados. Los sectores con topografía plana o plano-ondulada corresponden con depósitos aluviales, flujos de barro, llanuras de inundación de ríos importantes, mesetas o valles formados por rellenos materiales provenientes de sectores montañosos. Los suelos formados por tales procesos se pueden enmarcar como suelos transportados.

Dentro de estas dos categorías, es muy importante tomar en cuenta los factores geológicos como por ejemplo la edad de las formaciones de las rocas y suelos, los restos volcánicos y las condiciones climáticas de la región.

B. ESTRATIGRAFÍA DEL TERRENO.

Los tipos de rocas y algunos factores externos, como el clima y las condiciones de drenaje, condicionan la formación de los suelos. Por ejemplo, como producto de la alteración de capas, predominan los limos arcillosos de alta plasticidad y en menor proporción los limos arenosos y arenas limosas. También a causa de una geomorfología muy reciente, principalmente de origen volcánico y bajo clima tropical, aparecen casos especiales de suelos arcillosos orgánicos de alta expansividad, limos colapsables, limos arcillosos blandos, igualmente pueden aparecer como producto de la actividad humana, rellenos y botaderos heterogéneos.

C. NIVEL FREÁTICO

Es una superficie de contacto irregular, entre las zonas de saturación y aeración. Bajo el nivel freático se encuentra el agua subterránea. El espesor de la zona de saturación difiere de un lugar a otro y el nivel de las aguas freáticas fluctúa conformemente.

En general el nivel freático tiende a seguir las irregularidades de la superficie del terreno, alcanzando sus elevaciones más altas bajo los cerros y lomeríos y sus puntos inferiores debajo de los valles.

D. PROPIEDADES GEO-MECÁNICAS DE LOS SUELOS

Los suelos, sin importar su naturaleza, son generalmente clasificados por sus propiedades geomecánicas. Las propiedades geomecánicas del suelo, tales como la granulometría, la plasticidad, la compresibilidad y la resistencia al cortante, pueden determinarse mediante pruebas apropiadas de laboratorio. Aún más, recientemente se ha puesto énfasis en la determinación *in situ* de las propiedades de resistencia y deformación del suelo, debido a que así se evita la perturbación de las muestras durante la exploración de campo y los resultados son más representativos.

Sin embargo, bajo ciertas circunstancias, no todos los parámetros necesarios pueden determinarse o están determinados, debido a motivos económicos o de otra índole. En tales casos, se deben formular ciertas hipótesis respecto a las propiedades del suelo. Para estimar la exactitud de los parámetros del suelo, sin importar si fueron determinados en el laboratorio y en el campo o si fueron supuestos, se debe tener un buen entendimiento de los principios básicos de la mecánica de suelos.

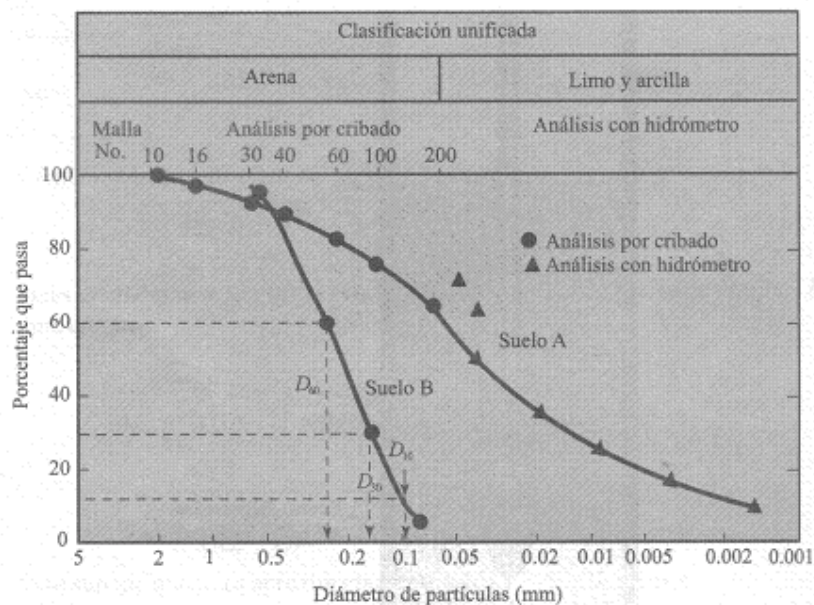
Asimismo, se debe estar consciente que los depósitos de suelo natural sobre los que se construyen las cimentaciones, no son homogéneos en la mayor parte de los casos. En consecuencia, se debe tener un conocimiento pleno de la geología de la zona, es decir, del origen y naturaleza de la estratificación del suelo, así como las condiciones del agua del subsuelo.

Las propiedades geo-mecánicas de los suelos son:

1. **GRANULOMETRÍA.** En cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían en forma considerable. Para clasificar de manera apropiada a un suelo se debe conocer su distribución granulométrica. La distribución granulométrica de suelos de grano grueso generalmente se determina mediante el análisis granulométrico por tamices.

Un análisis granulométrico por tamices se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una columna de mallas de abertura cada vez más pequeña y con un recipiente en el fondo. Se mide la cantidad de suelo retenido en cada tamiz y se determina el porcentaje acumulado de suelo que pasa a través de cada malla. Esta cifra se designa generalmente como el *porcentaje de partículas menores al tamaño asociado a la malla*.

Cuadro No. 1: Curva granulométrica (ACG, 2002)



Curvas de distribución del tamaño de partículas (curvas granulométricas).

Para preparar la muestra para el ensayo, el suelo recibido se separa mediante cuarteo la cantidad necesaria hasta obtener una muestra representativa para la realización del ensayo. A continuación se dan unos valores que pueden servir de orientación de la cantidad de muestra a tomar en función del tamaño máximo de la partícula de suelo:

Tabla No. 1: Cantidad de muestra retenida en tamiz de 2.00 mm (Graux, 1975)

Tamaño máximo de la partícula del suelo en mm	Cantidad mínima de muestra que debe quedar retenida en el tamiz de 2.00 mm
10	500 g
20	1000 g
25	2000 g
40	3000 g
50	4000 g
80	5000 g
100	8000 g

La muestra se seca al aire, en estufa o por medio de secadores con circulación de aire frío o caliente, pero siempre a menos de 60°C, hasta que aquella se pueda deshacer por medio del mortero o mazo de goma.

Según su granulometría, los suelos pueden clasificarse de la siguiente forma:

a. Granulares

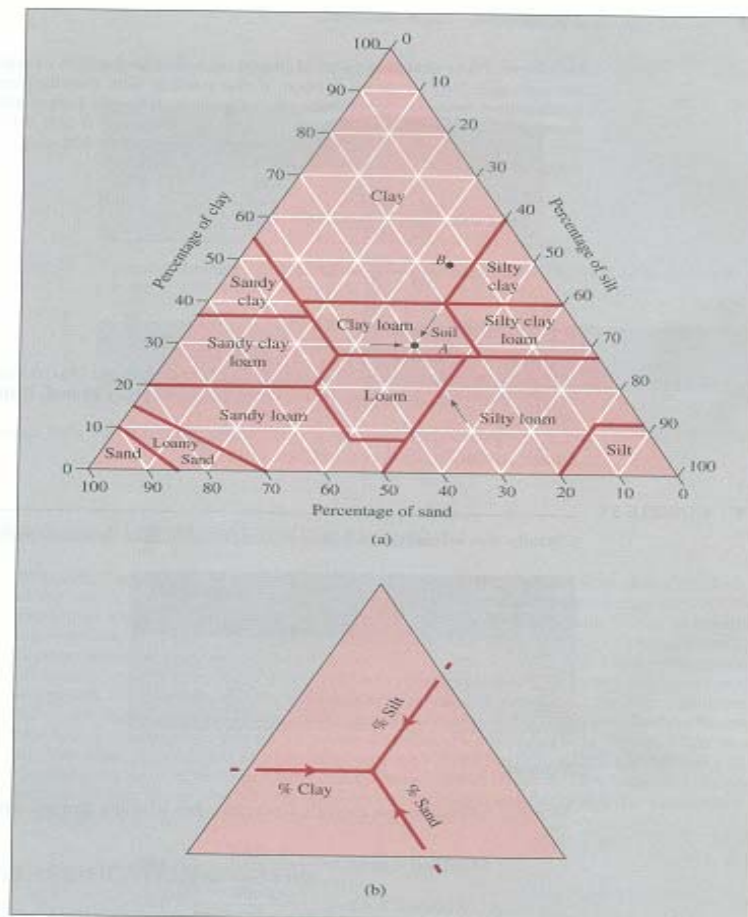
1) Grava y Arena. Son áridos sin cohesión, formados por fragmentos de rocas o de minerales, de forma redondeada o angulosa. Se puede clasificar por su tamaño medio (arena fina, arena gruesa, grava) y por su homogeneidad.

b. **Cohesivos**

1) **Limo.** Son suelos finos, de poca o ninguna plasticidad, y de granulometría generalmente uniforme. Su origen puede ser puramente mineral o parcialmente orgánico.

2) **Arcilla.** Están formadas por partículas microscópicas coherentes, procedentes de la descomposición química de los constituyentes de las rocas. Son duras en estado seco, y pueden ser plásticas si su contenido de agua está comprendido entre ciertos límites. Su origen puede ser, como el de los limos, parcialmente orgánico.

Cuadro No. 2: Tipos de Suelos (Braja Das, 1998)



(a) USDA textural classification chart; (b) key to use of part (a)

2. **POROSIDAD (n)**. Se le llama porosidad a la fracción de su volumen ocupada por los poros, tanto si éstos están llenos de agua como si lo están de aire o de una mezcla de ambos.

3. **ÍNDICE DE POROS (e)**. Es igual a la razón del espacio ocupado por los poros al espacio ocupado por las partículas sólidas.

Los valores de n y e varían entre límites extensos. Los suelos y las rocas están formados por partículas de distinto tamaño y forma dispuestas de un modo irregular. Si estos materiales son microscópicamente homogéneos, todas las magnitudes no direccionales deben ser constantes. Para ello es preciso, sin embargo, tomar un volumen o un área suficientemente grande respecto al volumen de los orificios.

4. **PESO ESPECÍFICO**. Es el peso por unidad de volumen. Se distinguen para un suelo varios pesos específicos diferentes. Se les mide en muestras tomadas con procedimientos mecánicos y sacadas a la superficie, lo que puede dar lugar a una pérdida parcial del agua intersticial, lo que reduce el peso de la muestra, o bien puede dar lugar a un desconocimiento (generalmente una subestimación) del volumen real que ocupa la muestra *in situ*, lo que puede dar una idea falsa de la compacidad real de los terrenos.

a. **Peso específico γ** . Es el peso específico del suelo *in situ* no sumergido, es decir el peso de la muestra que ocupa el volumen unitario. Implica particularmente el agua comprendida naturalmente entre sus partículas sólidas.

b. **Peso específico seco γ_d** . Se designa por γ_d el peso de materias secas comprendidas en una muestra que ocupa en el estado natural el volumen unitario, es decir el peso que subsiste de esta muestra tras la pérdida de toda su agua intersticial, pero no del agua que entra en la composición química de las partículas.

c. **Peso específico saturado γ_{sat}** . Es el peso total de la muestra que ocupa el volumen unitario, después de su saturación con agua.

d. **Peso específico sumergido γ' .** Se designa por γ' el peso específico del suelo *in situ* cuando éste está sumergido en agua, y sometido así al empuje de Arquímedes. Este peso específico aparente no puede determinarse por medida directa. Se utiliza indistintamente *peso específico debido a la subpresión* o *peso específico sumergido*.

5. **HUMEDAD (w).** Se designa por w el contenido de agua, es decir, la relación entre el peso del agua comprendida naturalmente entre las partículas sólidas de una muestra y el peso de los materiales secos. En esta relación no se incluye el agua de composición de las partículas sólidas.

6. **GRADO DE SATURACIÓN (S_r).** El grado de saturación es la fracción del volumen total de los poros que esté ocupada por agua.

El grado de saturación de las arenas es comúnmente descrito por medio de los términos seca, húmeda, etc. A continuación se listan términos y su correspondiente grado de saturación.

Tabla No. 2: Saturación en arenas (Jiménez, 1981)

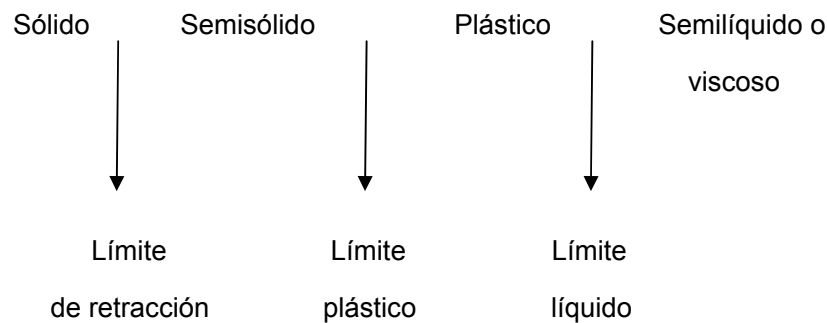
<i>Grado de saturación de las arenas</i>	
DESCRIPCIÓN	S_r (%)
Seca	0
Ligeramente húmeda	1-25
Húmeda	26-50
Muy húmeda	51-75
Mojada	76-99
Saturada	100

Esta nomenclatura se aplica sólo a las arenas y suelos muy arenosos, ya que una arcilla desecada con un grado de saturación del 90% puede ser tan dura que a primera vista sería clasificada como seca.

Las arenas gruesas situadas por encima de la capa freática, por lo general, están ligeramente húmedas. Las arenas finas o limosas pueden estar muy húmedas o mojadas.

7. LÍMITES DE ATTERBERG. Los límites de Atteberg definen los contenidos de agua característicos para los que una arcilla determinada, triturada, alcanza diferentes estados de consistencia relativa.

Un suelo que posea algo de cohesión, según su naturaleza y la cantidad de agua que tenga, puede presentar propiedades que lo incluyan en el estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido o viscoso. Los límites de Atterberg marcan una separación arbitraria, pero suficiente en la práctica, entre estos cuatro estados:



Los límites de Atterberg son unas de las determinaciones que con más profusión se practican en los laboratorios de suelos. Su utilidad, deriva de que, gracias a la experiencia acumulada en muchas determinaciones, es suficiente conocer sus valores para poderse dar una idea del tipo de suelo y sus propiedades. Como, por otra parte, se trata de determinaciones sencillas y rápidas, permiten una pronta identificación de los suelos y la selección adecuada de muestras típicas para ser sometidas a ensayos más perfectos y complicados. Pertenecen, con el análisis granulométrico, al tipo de ensayos de identificación. Pero, si el análisis granulométrico permite conocer la magnitud cuantitativa de la fracción fina, los límites de Atterberg indican su calidad, completando así el conocimiento del suelo.

- a. **Límite líquido** w_L : es el contenido de agua de una pasta amasada, por encima del cual esta pasta pasa del estado plástico al estado líquido.
- b. **Límite plástico** w_P : es el contenido de agua de una pasta amasada por debajo del cual pasa del estado plástico al estado semisólido.
- c. **Índice de plasticidad** I_P : es la diferencia entre los límites líquido y plástico.

8. COMPRESIBILIDAD. Un incremento en el esfuerzo causado por la construcción de cimientos u otras cargas, comprimen las capas del suelo. La compresión es causada por la deformación de las partículas del suelo, por la recolocación de las partículas, y por la expulsión de agua o aire, de los espacios vacíos del suelo. En general, el asentamiento del suelo causado por diferentes cargas que se le aplican está dividido en tres categorías:

a. *Asentamiento inmediato*, que es causado por la deformación elástica del suelo seco y de suelos saturados sin ningún cambio en el contenido de humedad. El cálculo del asentamiento inmediato está basado generalmente en las ecuaciones derivadas de la teoría de elasticidad.

b. *Asentamiento por consolidación primaria*, el cual es el resultado de un cambio de volumen en suelos cohesivos saturados debido a la expulsión de agua, que está ocupada en los espacios vacíos.

c. *Asentamiento por consolidación secundaria*, este tipo de asentamiento es observado en suelos cohesivos saturados y es el resultado de arreglos plásticos en las capas del suelo. Es una forma adicional de compresión que ocurre en el esfuerzo efectivo constante.

En general las arcillas se caracterizan por su gran compresibilidad y poder de retención de agua en relación con las arenas.

Las partículas arcillosas tienen forma acicular o laminar. También se ha visto que debido a las fuerzas físico-químicas existentes entre las partículas arcillosas, éstas adoptan, al sedimentar, una estructura muy abierta. Esta estructura, inestable frente a las poderosas fuerzas gravitatorias que pueden actuar posteriormente sobre la arcilla, es la causa de su gran compresibilidad.

El estudio de la compresión unidimensional de los suelo se suele hacer en el edómetro. El edómetro consiste esencialmente en un anillo cortador, en el cual se encuentra comprimido el suelo entre dos placas porosas cuyo desplazamiento relativo puede medirse con gran exactitud.

Cuando a una capa de suelo saturado se le aplica una carga, la presión de poro del agua se incrementa. En suelos arenosos que son altamente permeables, el drenado causado por el incremento de la presión del poro de agua es completo inmediatamente. El drenado del poro del agua es acompañado por la reducción en el volumen de la masa del suelo, por lo cual resulta el asentamiento. Debido a la rapidez del drenado del poro de agua en suelos arenosos, inmediatamente ocurre el asentamiento y la consolidación simultáneamente.

Cuando una capa de arcilla saturada es sujeta a una carga de presión, inmediatamente ocurre un asentamiento elástico. Debido a que la conductividad hidráulica de la arcilla es significativamente menor que la de la arena, el exceso de la presión de poro de agua generada por la aplicación de la carga, gradualmente es disipada por los grandes períodos que se crean.

9. COMPACTACIÓN. En muchas estructuras donde el suelo es suelto, es necesario compactarlo para incrementar su peso específico. La compactación aumenta la resistencia a los suelos, los cuales aumentan la capacidad de soporte en los cimientos por las construcciones que están sobre ellos. La compactación también disminuye la cantidad inesperada de asentamientos en las estructuras y aumenta la estabilidad de los terrenos con altas pendientes.

La compactación, en general, es la densificación del suelo que se debe por la remoción del aire, el cual requiere de energía mecánica. El grado de compactación de un suelo es medido en términos del peso específico seco. Cuando se le agrega agua durante la compactación, ésta actúa como agente que suaviza las partículas del suelo. Las partículas del suelo se deslizan unas sobre otras y se mueven a posiciones más densamente comprimidas.

En general, todo terraplén debe compactarse para que se forme una masa resistente y poco comprensible.

En la compactación de un suelo juega un papel muy importante la cantidad de agua que contiene.

10. RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN. El comportamiento mecánico de los suelos depende exclusivamente de las tensiones efectivas, que son iguales a la diferencia entre las tensiones totales y la presión de poros. Por ser isótropa la presión del agua, el principio de las tensiones efectivas en suelos saturados es:

$$\sigma' = \sigma - u \qquad \tau' = \tau$$

En donde:

σ es el esfuerzo normal total en la superficie considerada

u es la presión del agua en los poros (también llamada neutra o intersticial)

σ' es el esfuerzo normal efectivo en la superficie considerada

τ, τ' es el esfuerzo tangencial en la superficie considerada

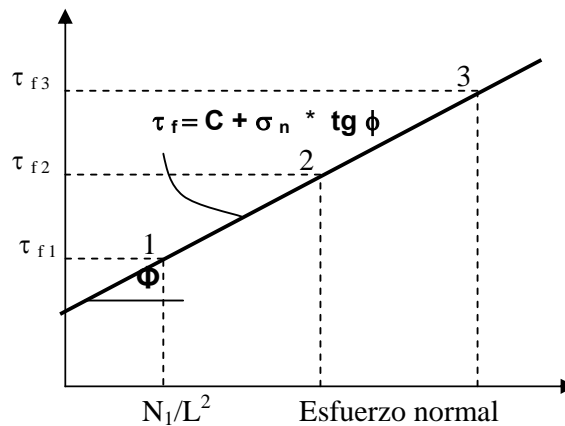
(total igual a efectivo)

Las deformaciones y los cambios de volumen que sufre el suelo por efecto de las cargas aplicadas son el resultado de las variaciones producidas en los esfuerzos efectivos. Cualquier modificación del estado tensional que no produzca variaciones de los esfuerzos efectivos no tiene ningún efecto.

Para el estudio de suelos se admite que la resistencia al corte de los suelos sigue la ley de Coulomb, según la cual la resistencia al corte en cualquier plano de falla potencial dentro del suelo es función del esfuerzo normal efectivo que actúa sobre él y puede ser cuantificada por la siguiente expresión:

$$\tau_f' = c' + (\sigma - u) \tan \phi'$$

Figura No. 1: Ecuación de Coulomb (Braja Das, 2001)



En donde:

τ_f' es la resistencia al corte efectiva en el plano de falla

c' es la cohesión en términos de esfuerzos efectivos

ϕ' es el ángulo de fricción en términos de esfuerzos efectivos

Los parámetros resistentes c' y ϕ' deberán obtenerse de ensayos de corte (triaxial o directo) drenados, sobre muestras inalteradas saturadas. También podrán obtenerse de ensayos triaxiales con consolidación previa, corte sin drenaje y medida de las presiones neutras.

En un análisis de esfuerzos efectivos, los esfuerzos cortantes resistentes, calculados a partir de la ecuación anterior, deben ser comparados con los esfuerzos efectivos actuantes como resultado de la aplicación de las acciones de diseño. Por el motivo, es necesario incorporar en el análisis, no sólo las presiones neutras existentes previamente a la construcción, sino también las variaciones de la presión neutra producto de las acciones de diseño.

11. ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA. Es el ángulo que se forma al momento de ser sometida una muestra a ensayo de corte directo. Este es mayor conforme el suelo se vuelve más cohesivo, y el valor del mismo se obtiene de la ecuación de Coulomb.

Tabla No. 3: Ángulos de fricción para suelos no cohesivos (ACG, 2002)

*Parámetros de diseño para suelos no cohesivos**
(según American Petroleum Institute)

Densidad	Descripción del suelo	Ángulo fricción pilote-suelo δ grados	Valores límites de fricción lateral (f) (t/m^2)	N_q	Valores límites de capacidad por punta (t/m^2)
Muy suelta	Arena	15	4,78	8	100
Suelta	Limo-arenoso				
Media	Limo				
Suelta	Arena	20	6,70	12	290
Media	Limo-arenoso				
Densa	Limo				
Media	Arena	25	8,13	20	480
Densa	Limo-arenoso				
Densa	Arena	30	9,57	40	960
Muy densa	Limo-arenoso				
Densa	Grava	35	11,48	50	1200
Muy densa	Arena				

* Valores para guía solamente

12. COHESIÓN

Esta fuerza es debida a la atracción molecular en razón, a que las partículas de arcilla presentan carga superficial, por una parte, y la atracción de masas por las fuerzas de estabilización molecular (fuerzas Van der Waals), por otra. Además de estas fuerzas, otros factores tales como compuestos orgánicos, carbonatos de calcio y óxidos de hierro y aluminio, son agentes que integran el mantenimiento de unión de las partículas

V. TIPO DE EXPLORACIÓN

A. Inspección visual:

El primer paso para realizar el estudio de un terreno es reunir la documentación previa que se pueda sobre él. El siguiente paso es visitar el terreno, tomar notas, fotografías y hacer un croquis de cuanto se considere interesante. En esta visita es conveniente llevar bolsas para llevar muestras superficiales y un clinómetro para medir las inclinaciones de taludes si los hubiere.

En esta visita se debe tratar de averiguar algo sobre la experiencia local, hablando quizá con gente de la localidad, e inquirir sobre posibles deslizamientos, fenómenos de hinchamiento, asientos actividad sísmica, etc. En muchos casos puede ser conveniente un informe geológico previo.

B. Calicatas

Son pozos o zanjas de reconocimiento donde, además de una observación del terreno se puede llegar hasta una profundidad limitada.

Es uno de los métodos que permiten la visión del terreno *in situ* más empleado. Sus dimensiones en planta suelen ser, como mínimo de 0.90 x 1.50, y a veces hay que entibarlas. De ellas se pueden tomar muestras a mano que se introducen en bolsas plásticas, muestras en tubos que se clavan horizontal o verticalmente, o muestras de bloque.

Estas muestras de bloque, si se tallan de modo adecuado, son las que existen y la resistencia sin drenaje de las probetas sacadas de estos bloques suele ser superior a la obtenida de tubos.

Las muestras de bloque pueden ser imprescindibles en algunos suelos residuales en los que, por el elevado contenido de trozos de roca, son a veces las únicas muestras que se pueden tomar.

En estas calicatas se puede observar con detalle el nivel freático, y son el único método de confianza para examinar terrenos con cuevas. Permite el examen de antiguos deslizamientos.

Con este método de exploración se puede llegar hasta unos 20 m de profundidad, aunque no es frecuente ni mucho menos. Es corriente llegar hasta unos 5m.

En general, las calicatas pierden aplicación cuando:

- Existen costras duras o capas de roca superficiales
- Por debajo del nivel freático
- Cuando el terreno no se mantiene sin entibación
- Cuando existen bolos gruesos o materiales en los que la cuchara no es capaz de penetrar

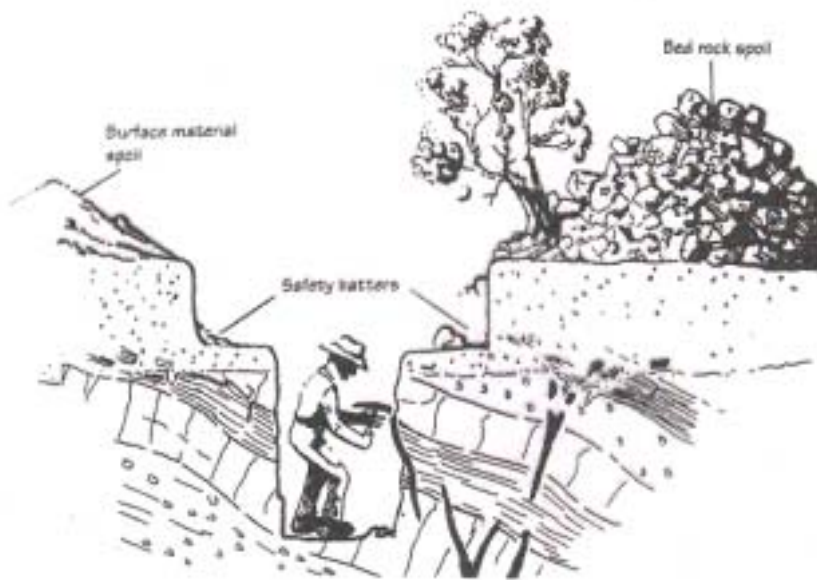
Figura No. 2: Calicata



C. POZOS

Se realizan donde el terreno lo permite (fácil de excavar), y se realizan normalmente mediante métodos mecánicos. Estas constituyen técnicas preliminares, en un prospecto, o pueden ser utilizados de complemento durante la fase de sondeos.

Figura No. 3: Excavación de pozo a mano



D. Tipos de sondeos.

1. SONDEOS MECÁNICOS. Son perforaciones realizadas a presión (suelos blandos), percusión (gravas, materiales cementados) o rotación (rocas, suelos duros), con diámetros habituales entre 65 y 140 mm, y que sirven para la extracción y reconocimiento del terreno (testigos), para la obtención de muestras del terreno mediante útiles apropiados (tomamuestras) y para la realización de algunos ensayos *in situ*.

La extracción de muestras en sondeo se realiza con aparatos denominados tomamuestras. En general un tomamuestras puede ser incorrecto por:

- No cumplir las normas geométricas de longitud, espesor de pared, esbeltez, etc.

- Diámetro reducido (< 65 mm)
- Presentar la boca o zapata mellada, abollada, etc.
- Válvulas de retención deficientes.

1. SONDEOS A PERCUSIÓN. El principio general consiste en el empleo de un útil que avanza por golpes sucesivos producidos por la caída del útil en el fondo de taladro o bien de una tubería mediante una maza. Son adecuados en suelos granulares.

El exacto conocimiento de la energía empleada en la hincada da una primera información de las características mecánicas del terreno por lo que es importante realizar esta operación en condiciones normalizadas.

En terrenos blandos para mejorar el rendimiento, puesto que ya se sabe que el material es de pobres características mecánicas, es interesante hincar la tubería maniobrándola hacia arriba y hacia abajo, en lugar de por golpeo.

La perforación consiste en la hincada en el terreno de tubos de acero que harán entibación, y la extracción del material contenido dentro del taladro mediante cucharas, trépanos, etc.

Los equipos de perforación a percusión están constituidos por los siguientes elementos:

- sonda de percusión
- Columna de entibación o revestimiento de taladro, que son un conjunto de tubos rígidamente empalmados. En la parte superior de la columna de entibación se coloca una "cabeza de batida" sobre la que golpeará la maza. En presencia de arenas y por debajo del nivel freático, la tubería debe de trabajar llena de agua o con lodos bentoníticos para evitar sifonamientos.

- Cuchara, con la que es extraído el material. Esta consta de un cuerpo cilíndrico, una zapata de arista endurecida y una válvula que impide la salida de los materiales que han penetrado por el interior y que, en general, es descargado por la parte superior. El diámetro de la cuchara es inferior al diámetro de la tubería.

- Trépano, útil que se utiliza para romper bloques o bolos con los que se tropieza durante la perforación.

2. SONDEOS A ROTOPERCUSIÓN. Se utiliza en la perforación de terrenos incoherentes y rocas. Estas formaciones debido a su compacidad son difíciles de atravesar por tanto aunque la rotopercusión no es aconsejable para investigación y reconocimiento del terreno, a veces resulta necesario su empleo.

La perforación puede efectuarse con martillo de fondo, que se caracteriza por sus altos rendimientos y el empleo en determinadas investigaciones para hacer taladros que a continuación han sido destinados para voladuras, ensayos *in situ*, instrumentación, péndulos, etc.

Consiste en un martillo neumático de menor tamaño que los normales y que es introducido en la perforación. Es el método más apropiado en la perforación de roca a destroza.

3. BATERÍAS DE ROTACIÓN. En este grupo existen distintos tipos de equipos que son seleccionados en función del trabajo a realizar, pudiendo ser elegidos desde sondas únicamente dedicadas a la recuperación de testigo hasta equipos únicamente dedicados a la investigación geotécnica.

La profundidad que se pueden alcanzar depende de los diámetros de perforación, varillaje y sonda, variando normalmente entre 100 y 1000 m. En cuanto al rendimiento depende principalmente del tipo de roca y el diámetro de la batería de perforación, siendo mayor conforme la roca es más blanda y menor el diámetro de la batería. Este tipo de perforación funciona mal cuando los terrenos son poco cohesivos.

La perforación a rotación se puede efectuar con circulación de agua, lodo bentonítico o aire comprimido, o en seco sin circulación aunque haya presencia de agua o lodo en el taladro.

La circulación es normalmente directa con flujo descendente a través de varillaje, pero puede ser también inversa para lo cual es necesario disponer de un varillaje especial.

Estas baterías se emplean en sondeos cuya profundidad será en torno a 100 m, para profundidades mayores es utilizado el tubo testigo con cable, wire line, que ayuda a reducir el tiempo de maniobra. El testigo se extrae mediante un cable provisto de un gancho y que va por dentro del varillaje, y que al llegar encima de la cabeza del tubo testigo interior, la engancha, para extraer a la superficie el tubo inferior con su testigo. En este caso el testigo obtenido tiene un diámetro más pequeño que el de los otros tipos de perforación.

VI. OBTENCIÓN DE MUESTRAS EN EL CAMPO

Pueden distinguirse entre 3 categorías de muestras:

A. Muestras alteradas no representativas

Las muestras se encuentran disgregadas o lavadas, permitiendo simplemente detectar posibles cambios de material.

B. Muestras alteradas representativas

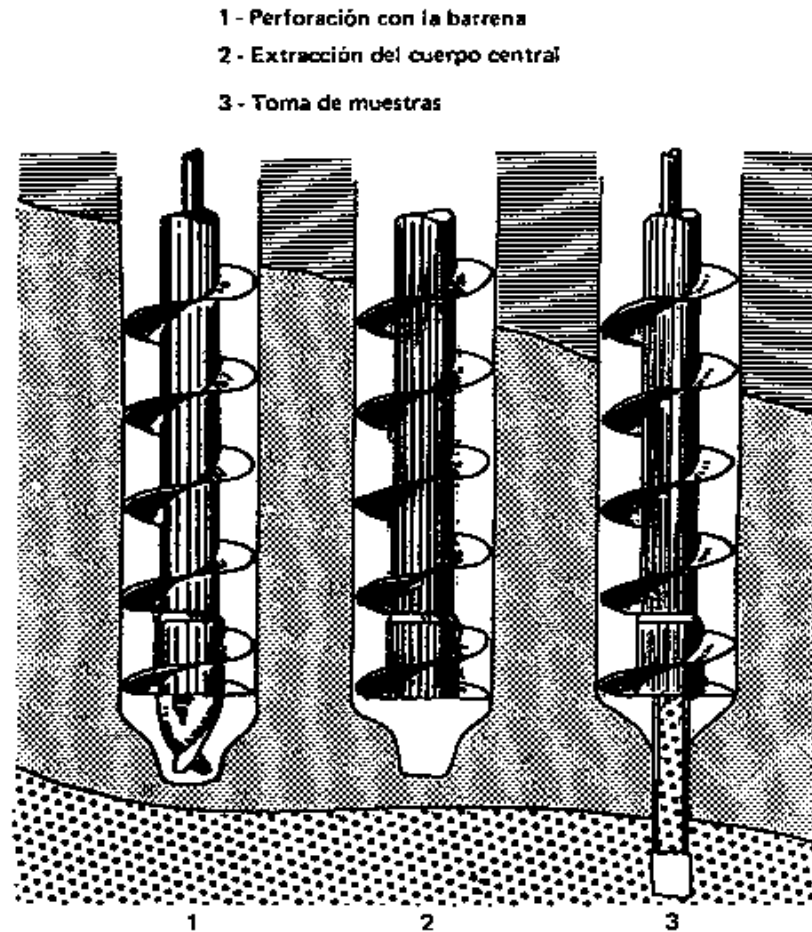
Mantienen su composición, pero han perdido su estructura inicial. Permiten efectuar ensayos de identificación (granulométrico, límites de Atterberg, ensayos químicos, etc.).

Si las condiciones del terreno da únicamente para obtener muestras alteradas, para la extracción de las mismas sólo es necesario la utilización de una barrena.

Figura No. 4: Muestras alteradas



Figura No. 5: Tipos de barrenas helicoidales (Jiménez, 1981)



Extracción de muestras con el empleo de barrenas helicoidales de eje hueco.

C. Muestras inalteradas

Son las que mantienen sensiblemente la estructura y humedad. En cimentaciones o en problemas de inestabilidad de taludes, es frecuente tomar, al menos, algunas muestras inalteradas, que son las necesarias para llevar a cabo los ensayos en laboratorio, para poder obtener las propiedades geomecánicas del suelo, como el ángulo de fricción, la cohesión y el peso específico. Estas muestras pueden ser obtenidas a mano o ya sea por sondeos.

Figura No. 6: Muestras inalteradas



D. TIPOS DE TOMAMUESTRAS

1. **Tomamuestras a rotación (AUGER).** El principio general consiste en ejercer con una hélice, una presión en el terreno y al mismo tiempo una acción rotativa mediante un varillaje conectado a la cabeza giratoria, conocida como mandril, de una sonda accionada por motor. El avance de la corona se obtiene accionando sobre el mandril solidario al varillaje al cual se le transmite su rotación.

Es un método rápido y económico para extraer muestras alteradas del subsuelo y suelen ser usados en sondeos de reconocimiento. Durante la extracción se puede intercalar la extracción de muestras inalteradas.

Las barrenas helicoidales son de acero de gran resistencia, y las aletas semicóncavas han sido diseñadas para que lleven la mayor cantidad de terreno triturado con la mínima obstrucción y fricción. Estas barrenas pueden ser normales y huecas. Las barrenas continuas huecas permiten extraer muestras inalteradas.

Son los más simples, y pueden ser realizados manualmente o con máquinas montadas en vehículos. Se realizan en terrenos de fácil penetración, y pueden alcanzar profundidades de hasta unos 60 m, siendo 30 m una profundidad común. El diámetro normal es de unos 5-15 cm.

Figura No. 7: Detalle camión Auger

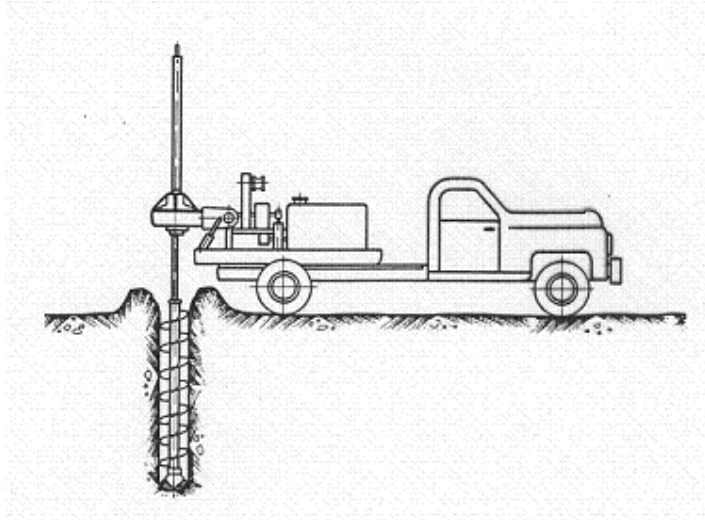


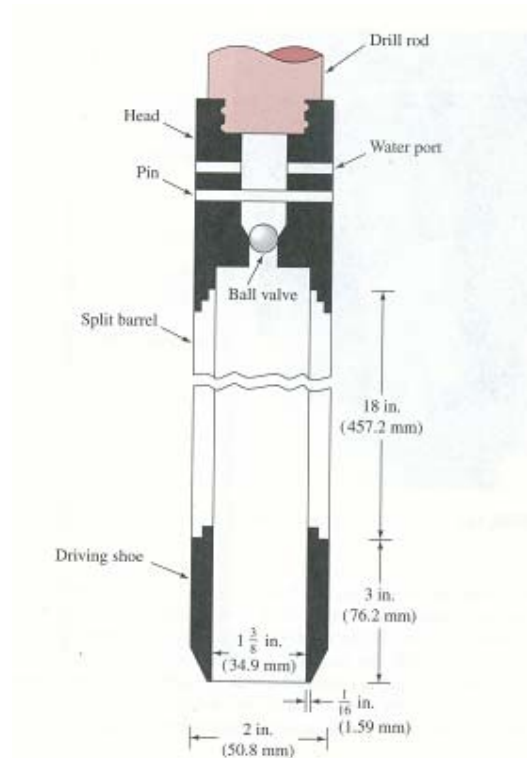
Figura No. 8: Detalle perforación Auger



2. Tomamuestras bipartido. Es un tomamuestras de uso muy habitual. Consiste en una camisa metálica dividida en dos partes entre las que se aloja un tubo ranurado, generalmente de zinc, en el que se introduce la muestra en su borde inferior, y para facilitar la penetración, se dispone generalmente una zapata biselada, y se une al varillaje por la parte superior, con otra.

Este tipo de tomamuestras se hince por golpeo, registrándose el No. de golpes necesario para hincar tramos sucesivos de 15 – 20 cm. Este golpeo puede correlacionarse con el valor N_{SPT} .

Figura No. 9: Tomamuestras bipartido (Braja Das, 1998)



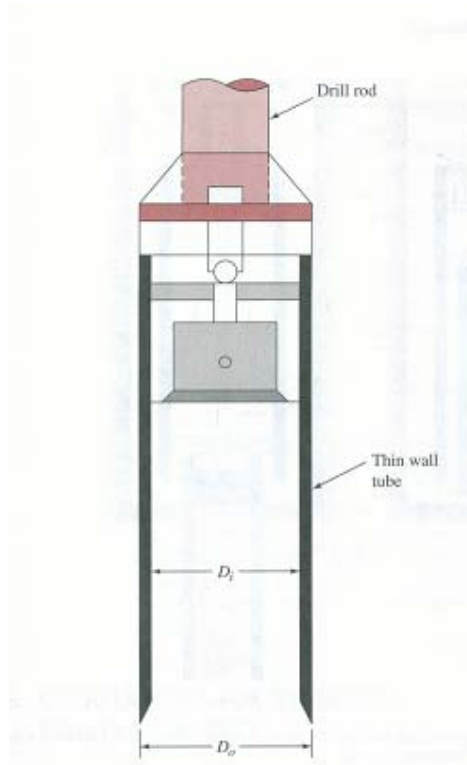
3. Tomamuestras de pared delgada (Shelby). Su uso está recomendado para arcillas blandas o medias, limos y arenas limosas o arcillosas.

Se trata de un tubo (generalmente de zinc, PVC, o metacrilato) de pequeño espesor con el borde biselado para facilitar la penetración. Se introduce al terreno a presión, quedando la muestra alojada interiormente durante el izado debido al rozamiento con las paredes.

El uso de tubería de metacrilato transparente posibilita una inspección directa de los diferentes materiales atravesados una vez que es extraída del sondeo, sin necesidad de esperar a su apertura posterior en laboratorio, como ocurre con las tuberías de PVC o de zinc.

Existe una variante del anterior que consiste en una camisa metálica, en la cual se aloja interiormente el tomamuestras Shelby, a la que se rosca en el borde inferior una zapata con los bordes biselados. La zapata puede disponer de unas lengüetas de tal forma que permanecen pegadas a la camisa cuando se introduce el tomamuestras en el terreno, y durante el izado giran impidiendo que la muestra se salga del interior.

Figura No. 10: Tomamuestras Shelby (Braja Das, 1998)



4. Tomamuestras de pistón fijo. Se trata de uno de los tomamuestras más recomendados para la extracción de muestras inalteradas en suelos blandos (arcillas y limos). Se emplean fundamentalmente para extraer muestras de arcillas blandas o medias, y no suelen emplearse en arenas con escaso porcentaje de materiales cohesivos.

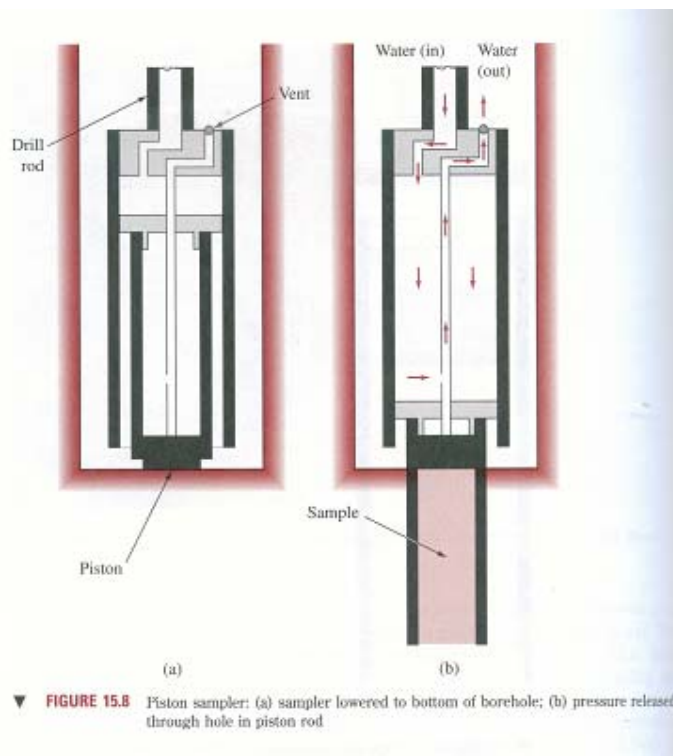
Su modo de funcionamiento es el siguiente: se introduce el tomamuestras hasta llegar al fondo del sondeo, a continuación se sujetan las varillas que lo guían por el interior del mismo, permaneciendo, de esta forma, fijo al pistón inferior. Mediante agua a presión se hace descender el tubo del tomamuestras hasta que quedan en contacto el pistón fijo y móvil. De acuerdo a este sistema de operación se impide que la muestra se comprima. Por lo tanto la perturbación producida en la misma es mínima.

La presión de agua se da con la ayuda de una bomba manual que dispone de un manómetro, en el cual cuando se alcanza un valor de la presión prefijado previamente – de manera arbitraria - , se considera que ambos pistones se encuentran en contacto, momento en el cual se puede extraer la muestra. Indudablemente esta forma de proceder puede

conducir a errores, ya que existe la posibilidad de que el tomamuestras no haya efectuado todo su recorrido, perdiéndose parte de la muestra por extraer.

Para salvar el inconveniente anterior, y conocido el recorrido que debe efectuar el pistón superior hasta quedar en contacto con el inferior, existe otra variante de manejo del tomamuestras de pistón fijo. Su forma de funcionamiento es semejante a la definida con anterioridad. La variación se encuentra en la forma de introducir el tomamuestras en el terreno; en vez de hacerlo con la ayuda de una bomba manual, lo hace la propia máquina de sondeos con la ayuda de sus sistemas hidráulicos, permitiendo de esta manera medir exteriormente en el varillaje a longitud que se debe introducir y hacer la operación con mayor garantía de éxito.

Figura No. 11: Tomamuestras de pistón fijo (Braja Das, 1998)



E. Almacenamiento de muestras

Al llegar al laboratorio una muestra de suelo, el recepcionista debe registrarla haciendo constar los siguientes datos:

- Fecha de entrada
- Número de referencia
- Datos de identificación del peticionario: Nombre y dirección
- Tipo de muestra y estado en que llega
- Identificación y procedencia de la muestra
- Ensayos a realizar

Para el almacenamiento, cuando se trata de muestras alteradas, el laboratorio debe disponer de un recinto cerrado donde las muestras se almacenen y queden preservadas de los agentes atmosféricos.

En el caso de muestras inalteradas, este recinto deber ser una cámara húmeda a fin de evitar variaciones de humedad en las mismas. Dichas muestras no deben sufrir tampoco golpes ni manipulaciones excesivas que puedan producir roturas, fisuraciones o cualquier otra alteración.

El cometido del recinto es doble. Por una parte sirve para guardar las muestras una vez recibidas en el laboratorio, hasta el momento de su preparación para ser ensayadas, y por otra parte para almacenar durante un período de un mes, el sobrante de la muestra utilizada por si fuera necesario la repetición de alguno de los ensayos.

B. Ensayo de molinete o veleta (vane test)

Es un procedimiento de prospección de campo que permite obtener, de una manera directa y sencilla, la resistencia al corte sin drenaje del suelo ensayado. Existe también la posibilidad de efectuarlo sobre muestras inalteradas del terreno en laboratorio, por medio de un molinete de reducidas dimensiones.

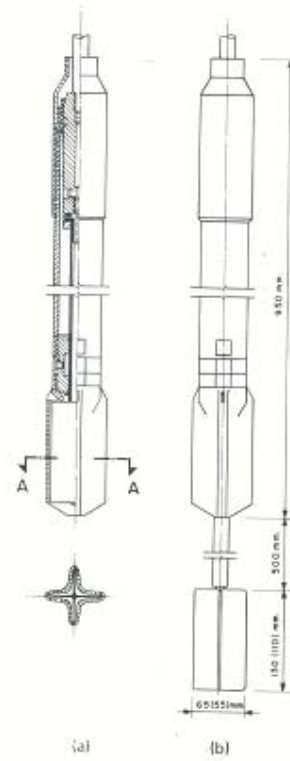
Su aplicación está dirigida fundamentalmente a suelos cohesivos blandos (con valores S_u inferiores a 0.5 kg/cm^2).

El ensayo de campo consiste en introducir en el terreno a la profundidad deseada cuatro láminas de acero dispuestas en forma de aspa y girarlas con un par torsor del cual se registra su valor máximo, momento en el que se produce la rotura del terreno ensayado.

Una vez alcanzada la profundidad de investigación deseada, con el molinete protegido y entubado el terreno que lo circunda, el procedimiento de operación es el siguiente: las aspás se introducen en el terreno sin entubación e inmediatamente se comienza a aplicar el momento torsor a velocidad constante. En función de la resistencia que se quiera obtener (pico o residual) se recomienda una velocidad de giro de las aspás diferente. Así, por ejemplo para determinar la resistencia de pico la velocidad de rotación debe ser de orden de 5 a 6 grados por minuto.

La precaución más importante a tener en cuenta durante la realización del ensayo, es la de impedir que el varillaje no colabore con la fricción para que interfiera en los resultados obtenidos. (Norma ASTM D-2573).

Figura No. 13: Sonda de molinete (Jiménez, 1975)



- a. Molinete metido en su funda
b. Molinete fuera de su funda

C. Ensayos presiométricos

Los ensayos presiométricos son esencialmente de carga del suelo *in situ*, realizados a presión controlada con ayuda de una sonda; se efectúan en el seno del terreno gracias a la realización de una perforación previa.

Existen hoy en día tres tipos de equipos presiométricos, que se diferencian entre sí en el modo en que se introducen en el terreno. Entre ellos están los presiómetros auto-perforadores, los presiómetros-cono y los presiómetros convencionales.

El fundamento teórico es el mismo para todos. Consiste en dilatar radialmente dentro del terreno una sonda cilíndrica y determinar la relación entre la presión aplicada sobre el suelo y el desplazamiento de la pared de la sonda. En la práctica, esto se lleva a cabo

haciendo una perforación cilíndrica hasta la profundidad deseada, e introduciendo la sonda presiométrica en su interior. Se introduce generalmente un volumen de agua o de gas a presión controlada dentro de la sonda de modo que ésta se dilata hasta que entra en contacto con las paredes del terreno y después lo deforma. Se mide la variación de volumen para cada incremento de presión aplicada o bien, la variación de diámetro producida.

El ensayo está concebido de modo que todo el incremento de volumen que se produce se debe a la expansión radial de la perforación.

En resumen, un sondeo presiométrico consta de dos operaciones siguientes:

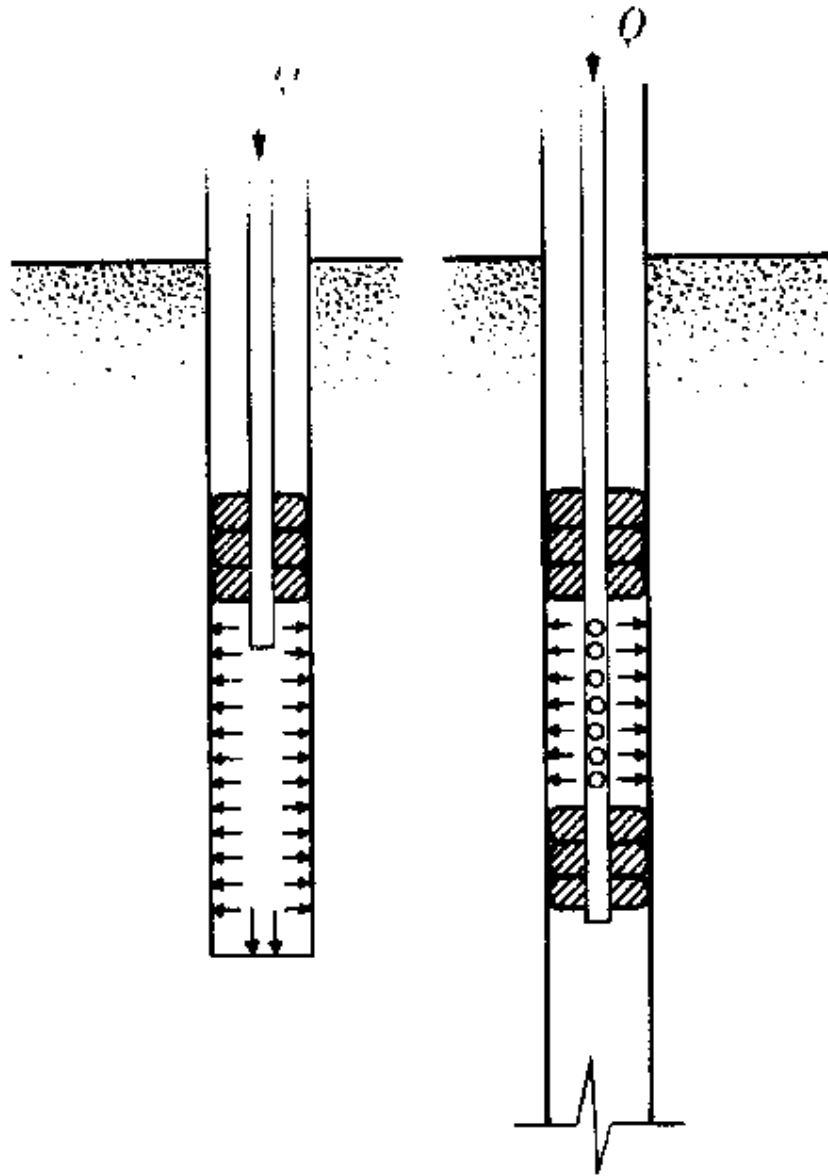
- una perforación presiométrica
- uno o varios ensayos presiométricos

D. Ensayos de permeabilidad

Para determinar la permeabilidad de los suelos en campo se pueden utilizar dos tipos de ensayos. Los ensayos Lugeon aplican un nivel constante de carga de agua para determinar la permeabilidad de suelos granulares. Los ensayos Lefranc son utilizados para suelos arcillosos.

1. **Ensayos Lugeon.** Suelen llamarse así a los ensayos efectuados con empleo de obturador, sea simple o doble. En cuanto a la teoría hidráulica, hay que suponer que se trata de un terreno resistente, casi siempre rocoso, ya que si no, el obturador no puede hacer cierre.

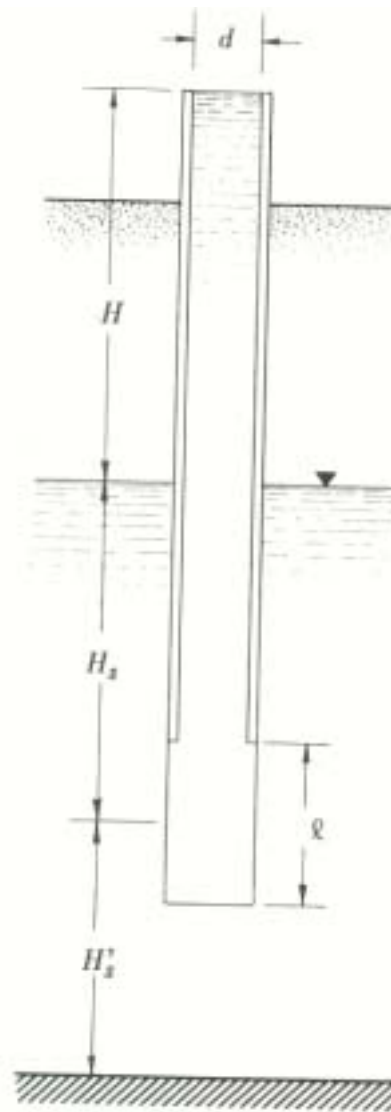
Figura No. 14: Obturador sencillo y doble (Jiménez, 1981)



Ensayos Lugeon con obturador sencillo y doble.

2. **Ensayos Lefranc.** Durante la ejecución del sondeo y, en un momento dado, se levanta la tubería de entibación (impermeable) a una altura l , y se llena de agua, la cual fluye hacia el interior del sondeo. Se mantiene éste lleno hasta la boca, añadiendo agua. Se prosigue hasta que se comprueba que el régimen es estacionario.

Figura No. 15: Ensayo Lefranc (Jiménez, 1981)



Ensayo Lefranc
con carga constante.

VIII. TIPOS DE ESTRUCTURAS

A. CIMENTACIONES SUPERFICIALES

La cimentación es el elemento soportante de una estructura. Incluye no sólo la parte estructural que transmite la carga de la superestructura al suelo (placa), sino también al suelo o la roca soportante.

Desde el punto de vista de su profundidad las cimentaciones se clasifican en superficiales, profundas y semi-profundas. Se entiende por superficiales aquellos tipos de cimientos en que la relación D/B (D = desplante, B = ancho del cimiento) es menor o igual a 1,0; semi-profundas cuando esta relación está entre 1 y 4 y profundas cuando D/B es mayor que 4,0.

Se utilizan cimientos superficiales cuando existe, a poca profundidad en el terreno, una capa razonablemente resistente como para soportar el peso de la estructura, en condiciones estables de seguridad y con asentamiento o movimientos admisibles. Según sea la resistencia del terreno y la importancia de la edificación, se utilizan placas individuales, placas corridas, placas combinadas, placas sobre rellenos de sustitución, losas de fundición, pilotes cortos y pozos de cimentación.

Los *cimientos corridos* consisten en construir, debajo de los muros o paredes con cargas longitudinales, zapatas de hormigón también longitudinales que repartirán la carga sobre una superficie mayor. Usualmente se utilizan para construcciones ligeras como viviendas o para la cimentación de muros de carga en edificios.

Las placas individuales son utilizadas para brindar soporte a las columnas o pilares que transmiten cargas concentradas. Consisten también en losas de hormigón, cuya geometría es usualmente cuadrada o rectangular, y cumplen la función de repartir carga sobre un área mayor.

Cuando el estrato resistente no se encuentra a una profundidad adecuada, existe la opción de apoyar los cimientos (aislados o corridos), sobre un relleno de material selecto

capa soportante seleccionada. El sistema anterior exige que el relleno sea de excelente calidad. Se deberá excluir toda posibilidad de apoyar cimientos sobre rellenos que no cumplan las disposiciones de calidad que requiere.

Las cimentaciones mediante losas permiten disponer de una superficie continua que puede cubrir total o parcialmente el área de la edificación y en algunos casos hasta puede excederla. Distribuyen las cargas sobre un área muy amplia, asegurando un soporte uniforme. Todos los puntos de apoyo están unidos, lo que asegura, si su espesor es suficiente, la rigidez general del conjunto. Se utilizan usualmente para la cimentación en áreas con suelos muy blandos o sueltos, o para el caso de edificios de gran altura, donde la utilización de otros sistemas produce el traslape de las áreas de cimentación.

Como variante de las cimentaciones superficiales, se pueden recurrir a la técnica de pilotes cortos para la cimentación de estructuras livianas de 1 a un máximo de 2 pisos. Este sistema consiste en una viga de fundición rígida que transmite carga a los pilotes cortos, usualmente preexcavados, de unos 2 ó 3 metros de longitud. Este tipo de pilotes trabaja básicamente bajo cargas de compresión.

En resumen, para cimentaciones superficiales se debe considerar que por ser elementos que no requieren mayores profundidades, se pueden obtener muestras alteradas e inalteradas y realizar ensayos de identificación del suelo, ya que no se necesita la información debajo del estrato donde se ubicará el cimiento.

1. Nivel de desplante (D). La profundidad de cimentación o nivel de desplante deberá regirse por los siguientes requisitos:

- a. La cimentación debe ser segura contra la falla por cortante del suelo.
- b. No deben producirse deformaciones excesivas en el suelo que dañen o desfiguren la estructura.
- c. Los cimientos deben colocarse fuera del área de cambios volumétricos, rellenos no compactados, suelo orgánico, etc.

d. El nivel de fundición deberá establecerse con base en los datos que ofrezca un estudio de suelos.

B. CIMENTACIONES PROFUNDAS

Una cimentación profunda es un elemento vertical que transmite la carga de la estructura hacia estratos que se encuentran a determinada profundidad. Esta transferencia de la carga puede realizarse por fricción entre el fuste del pilote y el suelo que le rodea, en cuyo caso se cataloga al pilote como de fricción o flotante, o la carga puede transmitirse directamente a la punta, en cuyo caso se habla de un pilote de punta.

Normalmente, la carga es transferida por medio de una combinación de los efectos de fricción y de punta. La distribución de la carga aplicada, por medio de la resistencia por fricción y la resistencia por punta del pilote, dependerá de factores tales como las condiciones del suelo (perfil), las características y tamaño del pilote y el nivel de carga aplicada.

Usualmente, se utiliza una cimentación profunda cuando los esfuerzos inducidos en el terreno, por las cargas aplicadas, son mayores que la capacidad de soporte de las capas superficiales o cuando los asentamientos potenciales de una cimentación superficial exceden los valores permisibles para el tipo de estructura considerado. También se utilizan para resistir las cargas horizontales provenientes del viento o de un sismo

Las cimentaciones profundas consisten de *pilares* y *pilotes*. La característica básica que los diferencia es el método constructivo y sus dimensiones. Los pilares son elementos de hormigón, simple o reforzado, colado en sitio dentro de una perforación hecha con anterioridad. Estas tienen un diámetro superior a los 45 cm. Localmente, se utiliza un tipo de elemento de cimentación profunda, que por su método constructivo calificaría como pilar, pero que tiene un diámetro que no excede de 25 cm, denominado “micropilote”. Por su parte, los pilotes son elementos de madera, acero u hormigón, para cuya instalación interviene, en la inmensa mayoría de los casos, una etapa de hinca a base de golpes de un martillo. Existe una gran variedad de procedimientos de construcción de pilotes.

Para cimentaciones profundas se debe considerar la ubicación del nivel freático, tomando en cuenta el cambio de estrato debajo del mismo, además es necesario obtener muestras debajo de él para poder realizar ensayos edométricos (de compresibilidad) ya que si se cimentará en esos estratos es importante realizarlos ya que sobre él existe un estrato saturado.

Para este tipo de cimentaciones es necesario la obtención de muestras inalteradas, ya que se requiere este tipo de muestra para realizar ensayos de suelos para poder obtener las propiedades mecánicas del suelo, por lo que no debe tener ningún cambio en sus componentes naturales.

C. ESTABILIDAD DE TALUDES

Se llama talud natural de un suelo la pendiente según la cual se establecerá su superficie libre si se deja caer por gravedad, sin compactación; o sea el ángulo del montón de piedra vertido por un camión. No hay que confundirlo con el talud que se observa en un suelo *in situ*, también natural, ya que ha sido formado por la naturaleza, pero creado y moldeado por numerosos agentes externos, y que depende también de la altura del talud.

Se llama *ángulo de talud natural* el ángulo de este talud con la horizontal. Este concepto sólo es verdadero para los suelos sin cohesión, ya que la pendiente límite de estabilidad de los suelos coherentes de superficie libre limitada está relacionada, con el espesor de la capa.

D. MUROS DE CONTENCIÓN

Se deben distinguir dos tipos de estructuras de retención: a) las rígidas o semirígidas, es decir, aquellas en que la forma de la estructura no cambia como resultado del empuje lateral y sólo experimentan una rotación o traslación como un todo, sin que aparezcan deformaciones por flexión y b) las flexibles, en las que la estructura puede deformarse sin daños importantes.

Entre las estructuras rígidas o semirrígidas se pueden mencionar los muros de concreto de gravedad, los muros en voladizo, muros de contrafuerte, muros semi-gravedad y los muros de celosía o tipo celular.

Entre las estructuras flexibles figuran los muros de gravedad con gaviones, los muros de tierra armada, el suelo reforzado, las pantallas continuas de concreto y las pantallas de tablestacas metálicas.

Otra clasificación, quizá preferible, hace la distinción por la forma de trabajo o de resistir los empujes de las tierras, lo que conlleva una misma forma de análisis. Así se puede distinguir entre las que resisten por peso y las que lo hacen por empotramiento bajo el nivel de excavación (más eventuales apoyos o anclajes) y flexión.

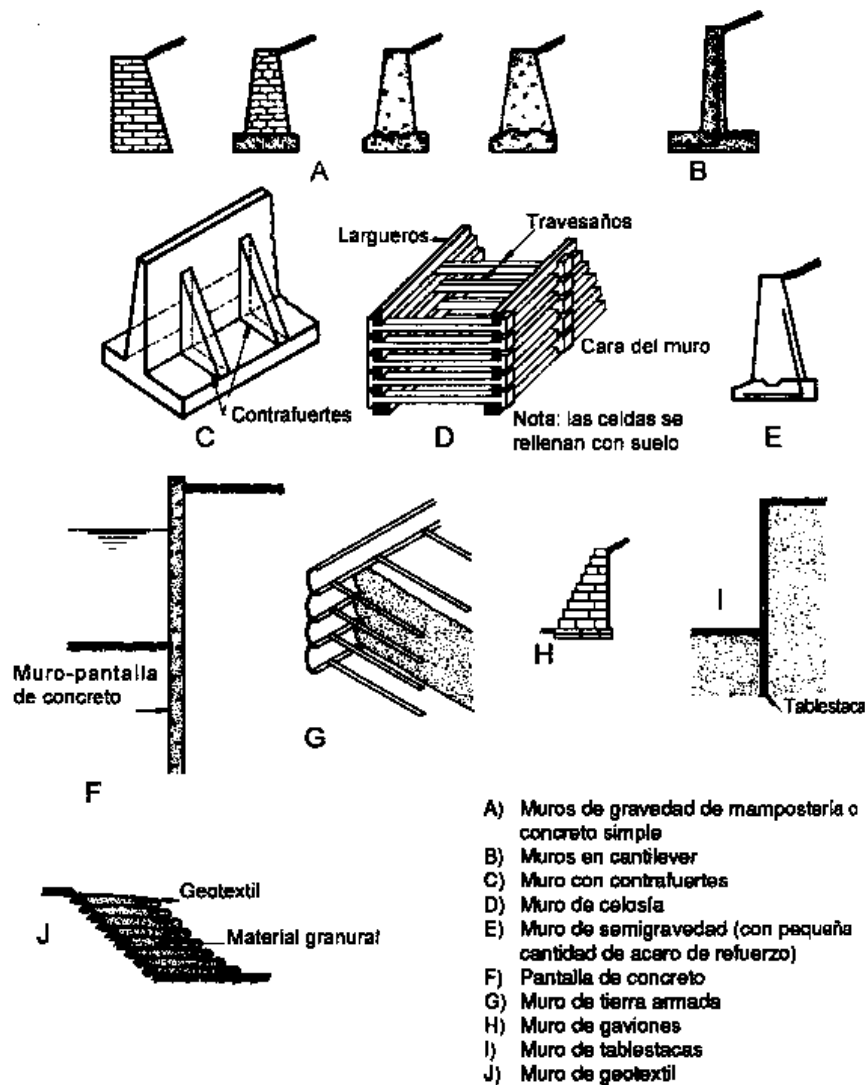
Entre las estructuras que resisten por peso se pueden mencionar los muros de concreto de gravedad, los muros en voladizo, muros de contrafuerte, muros de semigravedad, muros de celosía o tipo celular, muros de gravedad con gaviones, y muros de tierra armada o suelo reforzado.

Los muros de gravedad son estructuras rígidas y masivas, usualmente de concreto ciclópeo, que resisten las cargas horizontales en función de su propio peso. Por lo general requieren de una buena cimentación.

Los muros de retención en voladizo, además de utilizar su propio peso, utilizan el peso del relleno sobre la cimentación para obtener su estabilidad. Tanto la pared como la cimentación son de concreto reforzado. Para taludes de baja altura y poca carga lateral se utiliza a veces la mampostería reforzada en el parámetro vertical.

Tanto los muros en voladizo como los de gravedad en concreto ciclópeo son estructuras sensibles a los asentamientos o las deformaciones laterales del terreno.

Figura No.16: Detalle muros de contención (ACG, 2002)



Los muros con contrafuertes son variaciones del muro en voladizo y se utilizan normalmente cuando el muro debe construirse con una gran altura.

Las pantallas continuas de concreto son paredes de unos 60 centímetros de espesor, reforzadas con acero, que logran su estabilidad por medio del empotramiento y la resistencia pasiva del terreno por debajo del nivel de excavación. Son estructuras de concreto colado en el sitio y que se preexcavan utilizando la técnica de lodos bentoníticos.

Los muros de gaviones son estructuras de gran flexibilidad, lo que les permite adaptarse a las deformaciones del terreno sin perjudicar su capacidad de soportar cargas, son además altamente permeables por lo que eliminan el empuje hidrostático.

La tierra armada es un sistema constructivo de muros a base de refuerzos del suelo con bandas metálicas, amarradas a elementos prefabricados o paneles que van conformando la pared vertical.

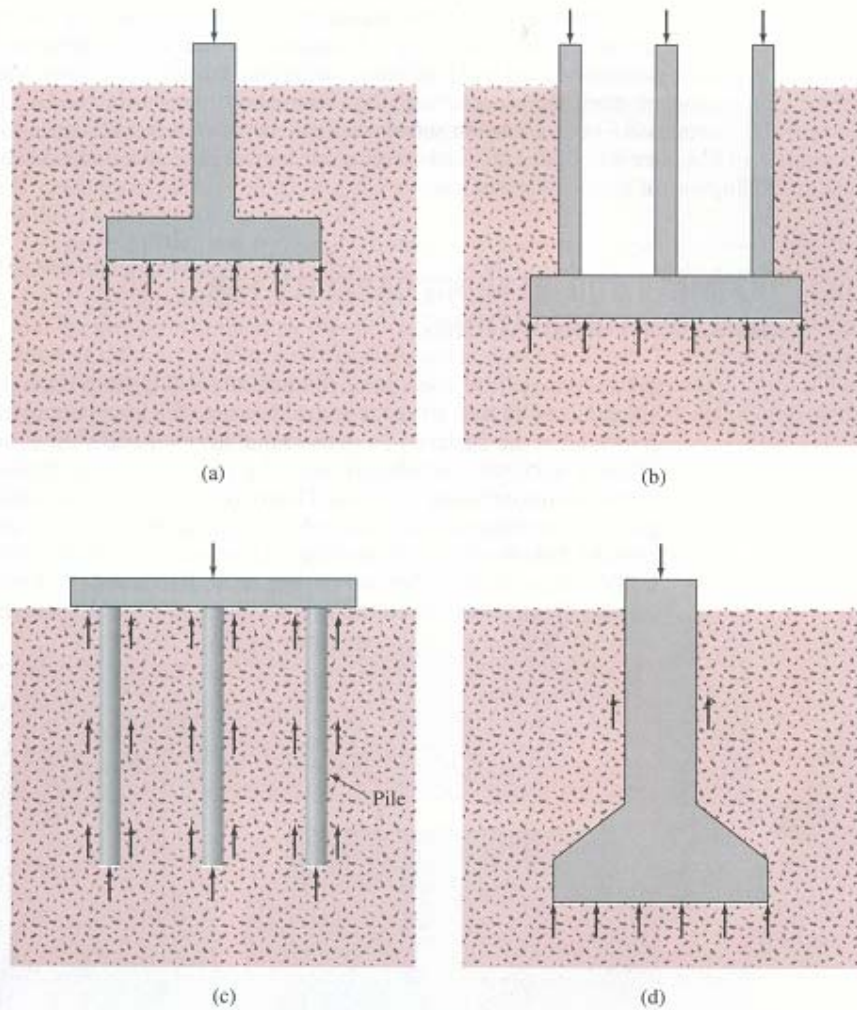
Las técnicas de suelo reforzado para construcción de estructuras de contención, rigidizan y amarran el terreno por medio de elementos de refuerzo, usualmente bandas o tiras poliméricas o geotextiles. Producen estructuras que pueden tolerar movimientos verticales y horizontales relativamente grandes, sin problemas en su estructura.

IX. CAPACIDAD DE CARGA Y ESTABILIDAD

A. ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGA

La capacidad de carga de una estructura cimentada puede definirse a partir de formulaciones teóricas o mediante pruebas *in situ*. Entre las pruebas *in situ* más importantes que podrían usarse para esa finalidad figuran las pruebas de carga con placas rígidas o la utilización de presiómetros. No obstante, estos métodos son poco usuales para el estudio de la cimentación de edificios y su uso se restringe a proyectos de mayor envergadura.

Figura No. 17: Aplicación de cargas sobre distintos cimientos (Braja Das, 1998)



Common types of foundations: (a) spread footing; (b) mat foundation; (c) pile foundation; (d) drilled shaft foundation

B. SUELOS ESTRATIFICADOS

Para el diseño de cimientos sobre suelos estratificados deberán tomarse en cuenta los siguientes aspectos:

- Si los parámetros de resistencia al corte de las capas que se encuentran dentro del bulbo de esfuerzos aun con valores significativos, no varían en más de un 10%, puede trabajarse con los valores promedio de dichos parámetros.

- Si bajo el nivel de desplante y dentro de la profundidad significativa aparecen capas suaves por encima de capas duras, deberán utilizarse los parámetros de las capas suaves para la estimación de la capacidad de soporte.

- Si a determinada profundidad, tal que se considere aun bajo la influencia del bulbo de esfuerzos, aparecen capas duras por encima de las capas suaves, deberá verificarse que los esfuerzos en la parte inferior de las capas duras no excedan el valor de capacidad soportante admisible de las capas suaves.

- En el caso de suelos arcillosos y cuando la diferencia entre la rigidez de las capas sea pequeña, de tal forma que no pueda decirse que una de ellas sea extremadamente dura o suave, en relación con la otra, podrán utilizarse teorías especialmente concebidas para estos casos.

C. NIVEL FREÁTICO

La presencia de un nivel de agua cerca de una cimentación afecta considerablemente la capacidad de carga y su asentamiento. El nivel del agua cambia estacionalmente. En muchos casos es necesario establecer los niveles del agua más alto y más bajo posibles durante la vida de un proyecto.

Si se encuentra agua en una perforación durante una exploración de campo, este hecho debe ser registrado. En suelos con alta permeabilidad, el nivel del agua en una perforación se estabilizará aproximadamente 24 horas después de terminada esta última.

La profundidad del nivel freático entonces se determina bajando una cadena o cinta en el agujero.

En capas altamente impermeables, el nivel del agua en una perforación se estabiliza durante varias semanas. En tales casos, si se requieren mediciones exactas del nivel del agua, se usa un piezómetro, el cual consiste básicamente en una piedra porosa o un tubo perforado con tubos verticales de plástico unidos a él.

X. DISEÑO DE LA CAMPAÑA

Es imposible dar reglas fijas respecto al tipo de campaña de reconocimiento a realizar, ya que es el propio terreno, en función de su variabilidad, el que va exigiendo una densidad mayor o menor de datos para definirlo adecuadamente.

Esto se refleja en la ambigüedad con que tratan el tema las distintas normas, (hacen depender de la campaña del buen criterio geotécnico, en función del tipo de terreno y de la estructura a construir).

Para proyectos o áreas muy grandes, suelen realizarse dos campañas. Una campaña de viabilidad y una campaña de detalle.

A. Campaña de viabilidad o evaluación geotécnica:

Tiene por objeto definir las características generales del terreno, detectar los eventuales problemas de cimentación y zonificar el área respecto a su calidad geotécnica. Sería deseable que estos estudios precedieran a cualquier otro planteamiento urbanístico, pero rara vez es el caso.

Pueden recomendarse las siguientes prospecciones:

Tabla No. 4: Sondeos de reconocimiento de terreno (Salinas, 2000)

SUPERFICIE TOTAL	RECONOCIMIENTOS
10,000 - 100,000 m ²	6 sondeos ó 1 cada 10,000 – 20000 m ²
10,000 – 500,000 m ²	15 sondeos ó 1 cada 20,000 - 30,000 m ²
500,000 – 1,000,000 m ²	20 sondeos ó 1 cada 30,000 – 50,000 m ²

Estas densidades se suponen mínimas, en terrenos de dificultad normal y contando con un encuadre geológico adecuado, eventualmente apoyado con prospección geofísica.

B. Campaña geotécnica de detalle:

Es la necesaria para definir las condiciones de cimentación en la ubicación definitiva de los edificios y obras importantes. Aunque la campaña puede reducirse algo si las zonas edificables son extensas, ya que pueden complementarse las áreas de influencia de cada punto de reconocimiento, no debe perderse de vista que, por el hecho de estar en una urbanización o grupo de viviendas, el estudio geotécnico de un edificio no debe ser menos intenso que si se tratase de una construcción independiente.

C. Preparación de la campaña

Para diseñar una campaña de investigación adecuada, debe conocerse la siguiente información:

- Se debe conocer el terreno o predio donde se construirán las obras
- Se debe conocer el tipo de estructura a construir

De esta forma, se puede definir lo siguiente:

- Tipo de exploración a realizar
- Cantidad de sondeos o pozos
- Ubicación de sondeos o pozos
- Profundidad de sondeos o pozos
- Tipo de muestras a obtener
- Tipo de ensayos de laboratorio a realizar

1. DESCRIPCIÓN DEL TERRENO. Para realizar un diseño, debidamente fundamentado, se requiere la siguiente información:

- Topografía del terreno en planimetría y altimetría
- Definición geométrica de la estratigrafía de los suelos
- Descripción de cada uno de los materiales que componen esta estratigrafía. Se debe incluir con definición de sus propiedades índice y estimación de su densidad relativa en el caso de materiales granulares y su consistencia en los arcillosos
- En materiales de consistencia rocosa, definición de la profundidad del lecho de roca y caracterización del material (litología, grado de alteración, clasificación geomecánica, dirección, buzamiento y espaciamiento de las distintas familias de discontinuidades, posible presencia de fallas, etc.)
- Situación del nivel freático
- Caracterización geotécnica de los materiales (permeabilidad, resistencia, deformabilidad)

2. DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE CONSTRUCCIÓN. Debido a que en la fase de investigación de suelos del proyecto aún no se ha determinado el tipo de cimentación, en esta etapa se puede determinar las siguientes condiciones.

- la forma e intensidad de las cargas que se van a transmitir al suelo.
- El uso previsto para la edificación o predio

Conociendo el tipo de construcción, se puede definir la información necesaria para el diseño de su cimentación o elementos de contención.

3. TIPO DE EXPLORACIÓN

Dependiendo del tipo de estructura que se desea cimentar se pueden realizar los siguientes tipos de perforación:

1) CALICATAS

a. Las calicatas no pueden hacerse bajo las siguientes condiciones:

- Si existe un manto rocoso.
- Las calicatas se pueden realizar arriba del nivel freático, debajo de éste no pueden realizarse, debido a que son perforaciones hechas a mano.
- No se pueden realizar calicatas en suelos inestables, como los suelos pantanosos, ya que las paredes de la perforación no son estables por si solas, por lo que el suelo puede desprenderse al momento de perforar.

2) SONDEOS MECÁNICOS

a. Los sondeos mecánicos no pueden realizarse bajo las siguientes condiciones:

- No se pueden realizar sondeos mecánicos en lugares donde se dificulte el acceso a la maquinaria, como predios ubicados entre otras construcciones que no permita el ingreso de las máquinas perforadoras, o no exista un medio de acceso al lugar, en el caso que no existan carreteras.
- Las dimensiones del lugar no lo permitan, en el caso de un sótano, si se desea realizar una perforación y la altura del parqueo es reducida y la altura de la perforadora es mayor, no se puede realizar el sondeo mecánico.
- Los sondeos mecánicos son apropiados en casos en los que se desea realizar la exploración de forma muy rápida ya que pueden hacerse en un período de horas en vez de los días que tomaría una calicata.

3) CANTIDAD DE SONDEOS

Depende del tipo de estructura

a. Edificios: En una campaña estándar el número de reconocimientos viene fijado sobre todo por la dimensión geométrica del terreno y por su naturaleza, mientras que la altura o importancia del edificio influye más en la longitud de las perforaciones y la toma de muestra o ensayos in situ. El número mínimo de sondeos es dos y el aconsejable de tres a cinco. Como guía, se debe realizar un sondeo por cada 500 m² de construcción.

b. Residencias: para residencias es importante tener definida el área de construcción, para poder realizar los sondeos donde se va a recibir carga.

- Para residencias pequeñas, con plantas menores a 100m² puede hacerse una inspección visual del suelo donde se cimentará la estructura

c. Para residencias con plantas mayores a 100m² se deben realizar dos sondeos y es conveniente realizar un tercer sondeo en el centro de los dos perforados con anterioridad, para verificar la estratigrafía general del terreno. Para tener un dato exacto cuando se requieran construcciones más grandes se puede realizar un sondeo a cada 100m² de área que se desea construir.

d. Muros de contención: Debido a que los muros de contención son obras lineales, es recomendable realizar una perforación o calicata a cada 30-40 metros lineales.

- Idealmente, se debería realizar una perforación o calicata en cada una de las secciones de diseño, aún cuando el muro sea menor a 30 metros lineales

e. Obras lineales: Las obras lineales no permiten la construcción de una estratigrafía debido a que los sondeos o pozos están muy separados entre sí. Es recomendable hacer perforaciones a cada 500 metros.

- Debe realizarse algún tipo de exploración en las zonas donde se construirán obras especiales como puentes, pasos a desnivel o intersecciones importantes.

- Debe realizarse algún tipo de sondeo o pozo en las zonas donde se ha previsto que pueden existir bancos de préstamo de material

- Debe realizar algún tipo de exploración en las zonas donde se han previsto problemas como deslizamientos, baja capacidad de soporte, inestabilidad, etc.

4) UBICACIÓN DE SONDEOS

a. Se deben ubicar sondeos sólo en el área que ocupan las edificaciones. Es un común error, distribuir uniformemente en todo el terreno, pero lo importante es obtener información donde hay estructuras.

b. En residencias la ubicación de los sondeos depende del área de construcción. Se pueden realizar en las esquinas o en puntos estratégicos donde se tenga diseñado que va a recibir alguna carga concentrada. Es importante tomar en cuenta que no es necesario realizar sondeos en jardines, parqueos o predios donde no se va a construir, ya que el suelo no va a estar sujeto a ningún tipo de carga.

c. Tomando en cuenta que se debe determinar una estratigrafía, es importante hacer al menos tres sondeos en línea recta

d. Se debe dar prioridad a condiciones de carga particulares. Por ejemplo, si se ve a construir una cisterna o un elevador.

e. En los muros de contención es importante tener información del suelo que se va a contener. Generalmente, este suelo se encuentra fuera del predio o terreno. Según el tipo de muro, a veces es necesario contar con una estratigrafía perpendicular al muro de contención.

f. Si se ha previsto que se construirán elementos de anclaje, es importante tener información de los suelos donde se colocarán estos elementos. Este es el caso de los anclajes ya que se ubican hasta a 25 metros atrás de la cara del muro.

5) PROFUNDIDAD DEL SONDEO O POZO. Para todos los sondeos o pozos es importante ubicar la elevación de inicio y la elevación del fondo de la perforación. Esta elevación debe estar relacionada con la topografía del terreno y no deben de ser cotas relacionadas al nivel del suelo ya que este puede cambiar con el tiempo.

En todos los casos, es importante obtener información del suelo al menos hasta una profundidad en donde ya no haya efecto de las sobrecargas aplicadas.

a) **Edificios:** En lo que se refiere a la profundidad de los sondeos, la idea es investigar hasta una profundidad en la que las tensiones transmitidas por el edificio no superen el 10% de las aplicadas en superficie. Se han propuesto también expresiones del tipo:

$$z = 4 * s^{0.7} (m)$$

Siendo s el número de plantas del edificio.

b) **Residencias y obras lineales:** La profundidad de los sondeos dependen de la cantidad de estratos que se encuentran encima del nivel de suelo donde cimentará la estructura. Se debe tomar en cuenta el corte que se debe realizar a los estratos superiores al nivel de piso terminado.

c) **Muros de contención:** Es importante tener información de cada estrato de suelo y hasta la profundidad de excavación que está prevista.

6. MUESTRAS. Las muestras obtenidas en cada perforación o sondeo deberán ser definidas antes de iniciar cada perforación. Así mismo, debe conocerse con antelación que tipos de ensayos se deberán realizar para obtener la información necesaria para realizar los ensayos correspondientes.

a. **TIPO DE MUESTRAS.** El tipo de muestra depende del tipo de ensayo que se necesita realizar. Para los ensayos de identificación pueden obtenerse muestras alteradas o inalteradas. Para los ensayos de las características geomecánicas del suelo es necesario contar con muestras inalteradas.

b. **CANTIDAD DE MUESTRAS**

- Debe de obtenerse una muestra por cada estrato de suelo encontrado.
- Debe de verificarse con el laboratorio de suelos la cantidad o tamaño que se necesita de una muestra para realizar los ensayos previstos. En caso la muestra obtenida sea muy pequeña, debe extraer otra muestra.
- En caso solo se encuentre un estrato de suelo, deben obtenerse al menos dos muestras.

c. **PROFUNDIDAD A LA QUE SE OBTIENEN LAS MUESTRAS.** Las muestras deben de ser representativas de la zona dentro del suelo donde se cimentarán las estructuras.

Es importante dejar registrada la cota a la que se obtuvo cada muestra

d. **ENSAYOS A REALIZAR.** El tipo de ensayo depende de la información requerida para el diseño de las estructuras previstas.

Si se necesitan parámetros de diseño para la identificación de suelos, se deben realizar los ensayos que se necesiten para identificar:

- Humedad natural
- Granulometría
- Peso unitario
- Plasticidad
- Gravedad específica
- Compactación, ensayo Proctor
- Límites de Atterberg
- Contenido orgánico

Si el diseño de las estructuras requiere conocer las propiedades geomecánicas del suelo, se deben realizar los siguientes ensayos:

- Consolidación
- Corte directo
- Triaxial no consolidado – no drenado
- Triaxial consolidado -no drenado
- Triaxial consolidado-drenado
- Compresión no confinada

Por ejemplo, si se necesitan parámetros de diseño como ángulo de fricción y cohesión, se deben de realizar ensayos de molinete o veleta, ensayos de penetración estándar. Si se necesita conocer la compresibilidad del suelo, deben realizarse los ensayos edométricos.

7. **RECOMENDACIONES GENERALES.** Según el tipo de suelo en el que se realizarán las campañas de investigación, adjunto se presenta una tabla con la separación máxima entre cada sondeo.

Tabla No. 5: Separaciones máximas entre sondeos (Salinas, 2000)

FORMACIÓN	D_{máx}	Error probable
Fondos de valle, vegas y terrazas - ríos torrenciales - grandes ríos	10 m 30 m	Grande Pequeño
Depósitos costeros, dunas, marismas, etc.	40 m	Medio
Id. con costras	10 m	Grande
Depósitos glaciares	15 m	Pequeño
Depósitos deltaicos	20 m	Pequeño
Sedimentos horizontales consolidados (margas y areniscas miocenas, peñuelas, etc.)	80 m	Pequeño
Id. yesíferos con problemas de disolución	< 10 m	Grande
Suelos de alteración de formación detríticas consolidadas	15 m	Medio
Suelos sobre rocas metamórficas (pizarras, esquistos, cuarcitas, etc)	20 m	Medio
Suelos sobre rocas carbonatadas (calizas, dolomías, etc)	10 m	Grande

Suelos sobre rocas igneas (granitos, pórfidos, etc)	10 m	Grande
Terrenos volcánicos	20 m	Medio

8. Evaluación geotécnica del territorio: Cartografía. En la planificación urbanística, desarrollo de áreas residenciales, trazado de viales, implantación de nuevas ciudades, etc, es importante un conocimiento previo de los problemas que puede plantear el terreno y poseer una “calificación” del mismo respecto a su mayor o menor idoneidad como soporte de las obras previstas.

Sin este proceso de evaluación un desarrollo urbanístico basado únicamente en criterios topográficos o morfológicos puede dar lugar a costes y problemas inesperados. Tal es el caso de la implantación de edificios en zonas de marismas, meandros abandonados, cauces de inundación, laderas inestables, rellenos antiguos, áreas sin drenaje, terrenos expansivos, zonas de hundimiento, etc.

Aparte de los posibles planes a escala nacional, normalmente predomina la cartografía de zonas limitadas, abarcando uno o varios factores, según importancia relativa de cada zona.

A veces los factores son limitativos o negativos, y en otros se definen diversos usos potenciales (edificación con o sin sótano, comercial, industrial, vertedero, préstamo, etc.) y se valoran, según unos baremos, las características del terreno que influyen en cada uso, aplicándolas a las condiciones de cada zona. La valoración final da idea de la mayor o menor aptitud.

Los mapas de condiciones de cimentación son los que tienen una concepción más puramente geotécnica, pero también los que revistan mayor dificultad de ejecución.

En principio, constituyen la extensión a zonas más o menos amplias de los estudios geotécnicos de detalle (escala 1/1000 a 1/100), pero con una densidad de reconocimientos notablemente inferior.

Normalmente, la cartografía que define tipología de cimentaciones suele encontrarse en la gama 1/50,000 a 1/25,000, mientras que la que cuantifica asentamientos, cargas admisibles, taludes de excavación, etc., suele descender a escalas entre 1/20,000 y 1/10,000.

En general, los factores que definen las condiciones de cimentación son tan complejos y la tipología de soluciones tan variada, que la cartografía de síntesis suele consistir en una zonificación numerada a la que acompaña una leyenda muy prolija con todas las indicaciones pertinentes.

Es importante conocer la profundidad abarcada por las conclusiones de un determinado mapa geotécnico (generalmente unos 10 m) pues podría darse el caso de estructuras de implantación profunda que resultaran afectadas por defectos del terreno (cavidades, capas blandas, etc.) existentes a mayores profundidades.

XI. CONCLUSIONES

- A. Existen dos tipos de perforaciones de investigación de suelos: calicatas y sondeos mecánicos.
- B. Los ensayos que se deben realizar para identificar un suelo son: granulometría, peso unitario, humedad natural, plasticidad, gravedad específica, compactación y límites de Atterberg. Todos estos pueden realizarse a muestras alteradas e inalteradas.
- C. Los ensayos que deben realizarse para identificar las propiedades mecánicas del suelo son: consolidación, corte directo, triaxial no consolidado-no drenado, triaxial consolidado-no drenado, triaxial consolidado-drenado y de compresión no confinada. Todos estos deben realizarse a muestras inalteradas.
- D. Es muy difícil tener una guía para realizar campañas geotécnicas perfectas. Esto se debe a que el suelo es un material muy heterogéneo por lo que muchos de los parámetros que forman esta campaña deberán ser definidos durante la ejecución de la misma.

XII. RECOMENDACIONES

- A. Que en cualquier campaña geotécnica deben desarrollarse al menos tres sondeos o perforaciones a un suelo, dos perforaciones en puntos estratégicos y una tercera perforación, que sirva para verificar las otras dos.
- B. Se recomienda prever la ubicación de las estructuras en un terreno, para ubicar los sondeos en el área de influencia.
- C. Se recomienda que antes de definir la profundidad de cada sondeo, se calcule la influencia de las sobrecargas que se aplicarán al suelo de forma que la investigación alcance esa profundidad.
- D. Para una campaña geotécnica que incluya muros de contención, los sondeos o perforaciones se deben ubicar en el área del suelo que se va a contener y no del suelo donde se realice la cimentación.
- E. Se recomienda verificar que tipo de estructura se desea diseñar, para conocer los parámetros que se deben tener para poder realizar los ensayos adecuados y obtener los tipos de muestras, que darán la información que se necesita del suelo para poder realizar la cimentación de la estructura.
- F. Debido a que el suelo es un material muy heterogéneo y que los parámetros que forma la campaña no puedan ser definidos completamente con antelación, se recomienda que el director de la campaña esté presente o al tanto de la ejecución de forma que la campaña se pueda ajustar a las condiciones del terreno.

XIII. BIBLIOGRAFÍA

Código de Cimentaciones de Costa Rica. 2002. Asociación Costarricense de Geotecnia. 1ª. Ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 200 págs.

Crimmins, Samuels, Monaham, R.R.B. 1978. *Trabajos de Construcción en Roca*. 3ª. Ed. México. Editorial Limusa. 420 págs.

Das, Braja M. 2006. *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. 5ª. ed. México. Thomson Editores S.A. 743 págs.

Das, Braja M. 1998. *Principles of Geotechnical Engineering*. 4a. ed. USA. PWS Publishing Company. 712 págs.

Das, Braja. 2001. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México. Thomson Editores S.A. México. 594 págs.

Dynamic Geotechnical Testing. 1978. USA American Society For Testing and Materials. SPT 654.

Hunt, Roy E. 1990. *Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation*. 2a. ed. USA. McGraw Hill Book Company. 385 págs.

Jiménez Salas, José A. 1980. *Geotecnia y Cimientos III. Cimentaciones, Excavaciones y Aplicaciones de la Geotecnia*. 1ª parte. España. Editorial Rueda. 998 págs.

Jiménez, J.A., J.L de Justo Alpañes, A. Serrano. 1981. *Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del Suelo y de las Rocas*. 1ª. ed. España. Editorial Rueda. 1188 págs.

Jiménez, J.A., J.L de Justo Alpañes. 1975. *Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los Suelos y de las Rocas*. 2ª. ed. España. Editorial Rueda. 466 págs.

Rollings, Marian P., Raymond S. Jr. 1996. *Geotechnical Materials in Construction*. 5a. ed. USA. McGraw Hill. 524 págs.

Salinas, José Luis. 2000. *Master de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones*. España. Cedex. 650 págs.

Sanz Llano, J.J. 1975. *Fundamentos de Mecánica del Suelo, Proyecto de Muros y Cimentaciones*. 2ª. Ed. Editores técnicos asociados S.A. España. 414 págs.