

NUEVAS TECNICAS PARA EL ANALISIS DEL SUBSUELO

Ing. Róger Esquivel B., Gerente
TECNOCONTROL, S. A.

RESUMEN

Se presenta en este trabajo una revisión de las técnicas disponibles en el país y su metodología como es la penetración estándar. Posteriormente se exponen las nuevas tecnologías desarrolladas para el "estudio in situ" del subsuelo y su incidencia en los costos de las obras.

INTRODUCCION

Tradicionalmente en nuestro medio se ha explorado el subsuelo para efectos de diseño de cimentaciones mediante la penetración estándar.

Ocasionalmente se han empleado otros métodos como el cono dinámico en arenas, la veleta en arcillas blandas y la toma inalterada de muestras, que como se indica sólo en muy pocas estructuras importantes se ha justificado su uso.

Si bien el método de la penetración estándar es bien reconocido a nivel internacional ya que su aplicación y la correlación del número de golpes con las propiedades del subsuelo, datan desde hace más de 50 años, es conocido que su aplicación no es universal para todo tipo de suelos, ni tampoco para todos los niveles o etapas de estudio especialmente de estructuras importantes, en donde es conveniente su aplicación combinada con otros métodos.

A continuación se da un detalle de los principales métodos disponibles y su aplicación:

A. PENETRACION ESTANDARD

Forma parte de los métodos de exploración semidirectos del subsuelo.

Consiste en realizar pruebas en el campo para estimar las propiedades de los suelos a partir de correlaciones empíricas.

El método consiste de un penetrómetro o tubo muestreador el que se hince a presión obteniéndose muestras alteradas para identificar los suelos y realizar ensayos de clasificación en el laboratorio. El número de golpes (N) que se precisa para hincarlo se correlaciona con la resistencia al corte del suelo.

Su aplicación es principalmente para suelos granulares finos, para lo cual fue desarrollado, pero también se aplica en suelos cohesivos pero con mayores limitaciones en cuanto a su interpretación.

Para el hincado se emplea una masa golpeadora de acero de 64Kg guiada por una barra de 19mm, siendo la energía transmitida al muestreador de 45cm, mediante su caída de una altura de 76cm. El número de golpes cada 15cm se registra para una penetración como el número N de golpes en los últimos 30cm (figura 1).

La interpretación de la prueba se lleva a cabo con base en la información de campo y a los ensayos de clasificación de laboratorio que se realicen. Lo anterior permite obtener la estratigrafía del sitio y conocer la consistencia de los suelos cohesivos o la compacidad de los suelos granulares con base en correlaciones empíricas.

Ahora, la correlación entre la resistencia a la penetración estándar N y la consistencia de suelos cohesivos se presenta en la figura 2 (ref. 1); en donde conocido N se define la posible resistencia a la compresión simple (q_u) y la consistencia del suelo. En la práctica se conoce que esta prueba es poco confiable en suelos cohesivos.

Para los suelos granulares la correlación empírica entre N y la compacidad se presenta en la figura 3 (ref. 1), en donde conocido el número de golpes N y el esfuerzo efectivo vertical a la profundidad que se realiza la prueba (f_v) se determina dicho valor.

B. CONO HOLANDES ELECTRICO

Además de lo anterior se han desarrollado técnicas modernas que estudian la condición del suelo "in situ", o sea se trata de métodos directos para la caracterización del subsuelo mediante correlaciones empíricas.

Dentro de estos métodos el de mayor difusión es el cono holandés eléctrico, equipo basado en una vieja herramienta desarrollada hace unos 50 años en Holanda, quedando su uso confinado en los países del norte de Europa.

Estas pruebas fueron muy usadas en zonas cuya estratigrafía era muy conocida a priori pero representaban una problemática de interpretación en lugares no explorados a fondo, así que se prefería la prueba de penetración estándar, motivo por el cual no se ha difundido en nuestro medio.

En la actualidad la electrónica ha causado un verdadero impacto tecnológico en este equipo y de inmediato ha ganado un lugar en la práctica de la ingeniería, siendo así que en Estados Unidos, México, Colombia, etc. su uso se ha difundido, siendo la prueba de penetración con cono la técnica de exploración del subsuelo, más eficiente, confiable y económica que se dispone actualmente.

Aplicación

Su aplicación permite determinar las variaciones con la profundidad de las resistencias a la penetración de la punta; la interpretación de este parámetro permite definir con precisión cambios en las condiciones estratigráficas del sitio y estimar la resistencia al corte de los suelos mediante correlaciones empíricas.

Metodología de carga

El cono se hince a presión mediante un mecanismo preferible hidráulico, que empuja una columna de barras de acero, por cuyo interior se introduce el cable que lleva la señal electrónica a la superficie. Es muy importante que la velocidad de hincado sea controlada, de modo que mantenga constante, siendo recomendable mantenerla de 1 a 2 cm/s $\pm$ 25%.

Resultados

La prueba de penetración estática del cono permite definir las variaciones de la resistencia de la punta con la profundidad (figura 4, ref. 2), lo que puede considerarse como un "ensayo in situ" en condiciones de "suelo inalterado", lo que en definitiva permite un mejor aprovechamiento de los parámetros geomecánicos del suelo.

Asimismo debido a su mecanismo de hincado, se puede realizar mayor cantidad de sondeos en un tiempo relativamente corto en comparación con el ensayo de penetración estándar.

Las correlaciones que se emplean para su interpretación son las siguientes:

- Suelos cohesivos

Las resistencias al corte de los suelos cohesivos en condiciones no drenadas se obtienen con la siguiente expresión:

$$C_{uu} = \frac{G_c}{NK}$$

donde:

C_{uu} = Resistencia al corte no drenada en t/m²
 G_c = Resistencia de punta de cono en Kg/cm²
 NK = Coeficiente de correlación a determinar

- Suelos friccionantes

La correlación entre la resistencia de punta del cono y la compacidad relativa de arenas finas se muestra en la figura 5, ref. 2.

COMENTARIOS

La prueba de penetración con el cono eléctrico es la técnica de exploración de suelos más eficiente y económica en la actualidad. Su aplicación es para todo tipo de suelos aunque su mayor aplicación y precisión es para suelos blandos, en donde se logra un mejor aprovechamiento de los parámetros de resistencia del suelo.

C. METODO GEOFISICO DE REFRACCION SIEMICA

Se utiliza para investigar las características estratigráficas de un sitio y sus propiedades mecánicas a partir de la interpretación de los tiempos de arribo de ondas refractadas de los estratos de mayor densidad (ref. 1).

El método consiste en medir el tiempo requerido para que las ondas sísmicas viajen del punto en que se origina, mediante el impacto de un martillo pesado o una pequeña explosión a los geófonos que recogen la señal y la envían al equipo registrador.

El procedimiento de impacto origina ondas longitudinales (P) y transversales (S) y de superficie (ondas Love y Raleigh).

Para los estudios de poca profundidad ($\approx 30\text{m}$) se utilizan actualmente equipos portátiles que operan con un martillo pesado que golpea una placa colocada en la superficie, siendo la onda captada por geófonos (verticales y horizontales) capaces de registrar la llegada tanto de las ondas S y P. El registro se lleva a cabo en una pantalla luminosa del sismógrafo el que amplifica y la transforma en una señal en su verdadera forma de onda de acuerdo con el tiempo de llegada de la misma (ver figura 6).

De acuerdo con lo anterior se puede interpretar el tipo de suelo que se trate, como por ejemplo los siguientes:

- Suelos hasta 4m de profundidad: velocidad sísmica de 500m/s
- Suelos gravosos de 4m a 10m de profundidad: velocidad sísmica de 1.000m/s
- Limolita a 10m de profundidad: velocidad sísmica de 3.600 m/s

Para estudios de detalle se emplean equipos de alta resolución (0.1ms) que brindan las siguientes ventajas:

- Detección de espesores mínimos de 20cm de estratos en el subsuelo
- Determinación del módulo elástico dinámico y de poisson con la profundidad
- Análisis detallado de cualquier irregularidad que se detecte

Aplicaciones (ref. 3)

El método de sismica de refracción tiene enormes aplicaciones para los ingenieros responsables de estudios de suelos de edificios, tuberías de conducción, trazado de carreteras, estudios de sitios de presas, plantas de tratamiento, estudios de estabilidad de taludes, etc.

Es claro para los profesionales involucrados en el desarrollo de este tipo de proyectos el encontrarse con la situación en que los sondeos o trincheras que se realizan, no siempre brindan información suficiente y adecuada de las condiciones del subsuelo o lo que es peor aún, que se encuentren condiciones del subsuelo durante la etapa constructiva, totalmente distintas a aquellas interpretadas durante la fase de exploración.

Todo lo anterior significa que al usar métodos inadecuados o insuficientes para la caracterización del subsuelo, el diseño debe contemplar "factores de seguridad" tales que se aumentan considerablemente los costos de la obra.

Es claro que cuando se producen cambios durante la fase constructiva, el contratista reclamará por extras, con el aumento en los costos, si se trata de aumentos menores, pero si la magnitud es considerable no sólo los costos influyen sino que además se puede requerir del rediseño de las estructuras y hasta del uso de las obras, lo que en algunos casos puede producir un presupuesto mayor no contemplado por el cliente.

Los métodos geofísicos son un excelente instrumento para prevenir estas situaciones. Aunque los mismos no pueden brindar toda la información del subsuelo ni reemplazar los sondeos o trincheras, su implementación en dichos estudios se puede brindar, en combinación con los otros métodos, obras y técnicas económicamente más compatibles con las condiciones reales del subsuelo.

Lo anterior se explica si consideramos que los sondeos no siempre brindan información suficiente ya que se trata de estudios puntuales. Al combinar estos estudios con la sismica de refracción se obtiene un mejor panorama pudiendo determinar todas las irregularidades de la superficie rocosa y la interpretación adecuada de las condiciones del subsuelo entre sondeos, pudiéndose

inclusive reducir sustancialmente la cantidad de los mismos en caso de estudios de gran envergadura. La información adicional de las condiciones del subsuelo conlleva beneficios tanto para la ingeniería del proyecto como para el cliente. El contratista también se beneficia al tener mayor cantidad de información con la cual pueda preparar su presupuesto y programación de obra.

De acuerdo con la experiencia en otros países, en estudios de importancia, el empleo de la geofísica en combinación con los sondeos puede brindar un chorro variable del 20% al 40%.

Desde luego para lo anterior es necesario contar con un geólogo especialista en este campo que pueda brindar la información requerida a costos razonables (ref. 3).

REFERENCIAS

- (1) Pemex 1977 Especificaciones Generales Fig. 33 Pg. 57, Fig. 34 Pg. 58.
- (2) E. Tamez, E. Santoyo, F. Mooser, C. Gutiérrez 1987. Manual de Diseño Geotécnico, pg. 37 Fig E5-3, Pg. 39 Fig. E5-5.
- (3) R. D. Charlebois y G.W. Lee, Geophysical Surveving, Dic. 1976, editado por Walter Pollution Control Association Publication.

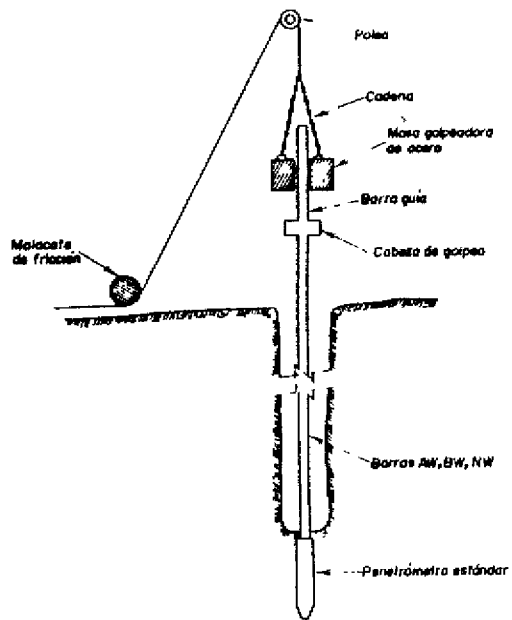


FIG. N°1 PRUEBA DE PENETRACION ESTANDAR
TOMADO DE REFERENCIA (1)

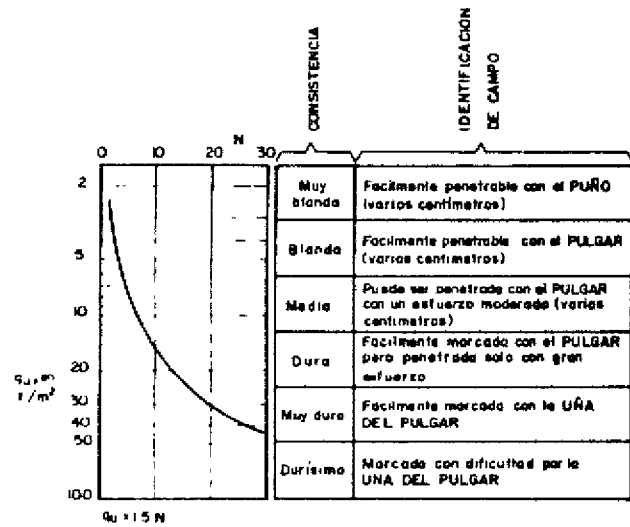


FIG. N°2 CORRELACION ENTRE N Y q_u . IDENTIFICACION EN EL CAMPO

REF (1)

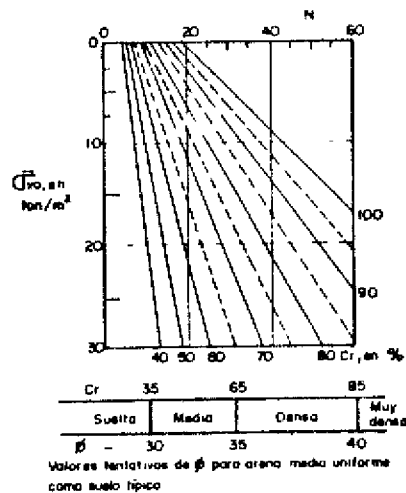


FIG. N°3 CORRELACION ENTRE N , q_vo Y Cr
TOMADO DE REFERENCIA (1)

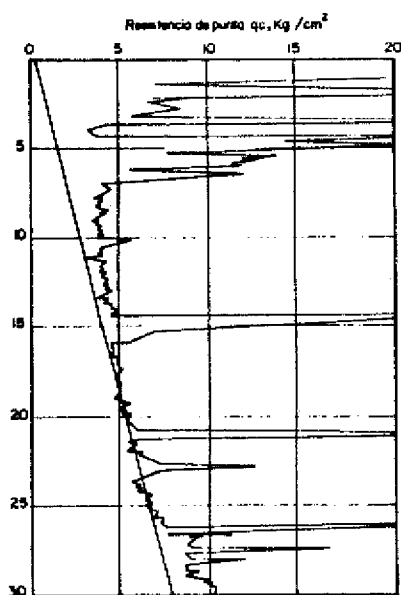


FIG. N°4 VARIACION DE LA RESISTENCIA DE PUNTA
CON LA PROFUNDIDAD
TOMADO DE REFERENCIA (4)

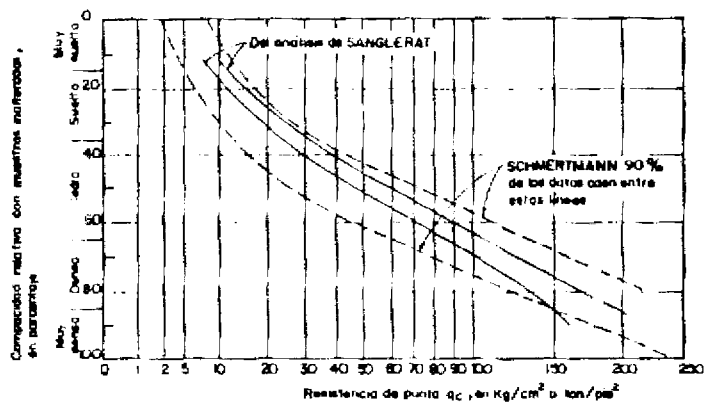


FIG. N°5 CORRELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA DE PUNTA
Y LA COMPOSICIÓN RELATIVA DE ARENAS FINAS
REF (2)

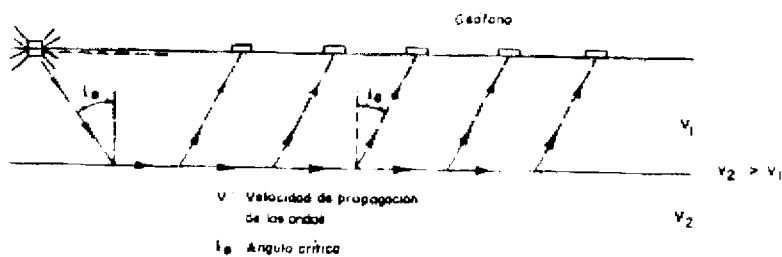


FIG. N°6 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS
SÍSMICAS
(Ref 1)