

PASADO, PRESENTE Y FUTURO DE LA INVESTIGACION GEOTÉCNICA

Ing. Gastón Laporte Molina, M.Sc.

*INSUMA S.A. Ingenieros y Geólogos Consultores
Costa Rica, glaporte@insuma.co.cr, 2234-5070*

Ing. Sergio Sáenz Aguilar

*INGEOTEC S.A.
Costa Rica, ingsaenz@ingeotec-cr.com, 2294-4010*

RESUMEN

En este trabajo se hace un análisis crítico sobre desarrollo de la geotecnia en lo referente a la investigación de campo. Se brindan además recomendaciones para el uso de estas nuevas tecnologías de forma segura.

El artículo resume la experiencia de los autores como profesores universitarios y consultores, en el tema de los ensayos de campo en ingeniería geotécnica. Externa la preocupación de los autores en que se utilicen equipos modernos y software especializado, sin que se tengan los conocimientos básicos en el tema de la instrumentación geotécnica.

Se resalta el hecho de que estas tecnologías bien empleadas constituyen excelentes herramientas de análisis y diseño de obras geotécnicas. Sin embargo, mal empleadas se convierten en peligros importantes para las obras geotécnicas.

Se concluye finalmente que los principios básicos y elementales de la mecánica de suelo, deben servir siempre como base en la calibración de los resultados que se obtengan con las nuevas tecnologías.

I- INTRODUCCION

Desde la época de Terzaghi y partir de la promulgación del principio de esfuerzos efectivos, se empezaron a desarrollar métodos y equipos para la exploración geotécnica de suelos; así como para su análisis en laboratorio.

Inicialmente los equipos y los métodos de cálculo se basaron en sistemas de funcionamiento sencillo tales como el SPT, cono dinámico, pruebas de carga usando gatos hidráulicos muy pesados, controles de deformación con cinta invar, barras de acero, etc.

En el campo experimental florecieron los ensayos clásicos de compresión simple, corte directo, consolidación y compresión triaxial.

En la década de los 70s los cálculos eran manuales, usando reglas de cálculo o máquinas de calcular con muchas limitaciones, lo que aunado a la falta de códigos y literatura técnica alusiva al tema, convertía a este campo en una ciencia inexacta. A todo este panorama se sumaba que las teorías disponibles se enmarcaban sobre todo en el comportamiento elástico; sabiéndose de antemano que los suelos e incluso las rocas blandas, no obedecen a esas teorías y donde el factor tiempo o comportamiento reológico y la resiliencia son factores muy importantes.

Ya en la década de los 80s con el advenimiento de las computadoras y los transductores electrónicos que funcionan con los principios de los extensómetros eléctricos (strain gauges) o de cuerda vibrante (ver figura 1), nacen métodos de medición de esfuerzos y deformaciones con altísima precisión. Esto permitió el desarrollo de equipos de campo y laboratorio de reciente generación. En el campo laboratorio surgen los equipos triaxiales, corte directo, consolidación, etc, totalmente automatizados. En la parte de campo surgen ensayos modernos tales como cono eléctrico, presiómetros, dilatómetros, etc; también de altísima precisión. Se desarrollan ampliamente los programas de cálculo automático de estos ensayos, que facilitan la adquisición, análisis y procesamiento de la información. Estos programas en manos de especialistas en la materia son herramientas muy poderosas; pero en manos de personas con poco entrenamiento se constituyen en cajas negras y consecuentemente en herramientas peligrosas.

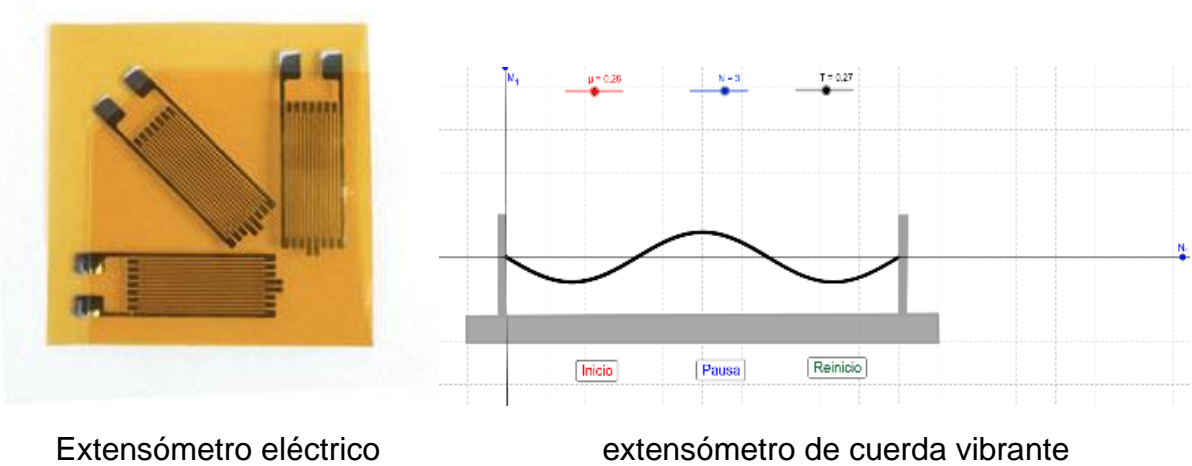


Figura 1. Extensómetros eléctricos y de cuerda vibrante

Los últimos cincuenta años del pasado siglo XX tuvieron un tremendo desarrollo en conocimiento y expansión en todo el campo de la práctica de la ingeniería geotécnica. Desde entonces, se ha intensificado la investigación, han surgido nuevas subdisciplinas, se han establecido muchas universidades, nuevos programas de postgrado y la práctica profesional ha cambiado de muchas formas, incluyendo los diferentes análisis que permiten los programas computacionales.

Anteriormente, la práctica del ingeniero geotecnista se basaba primordialmente en su experiencia, sin embargo, actualmente dicha experiencia se apoya en nuevos métodos de investigación, ensayos de laboratorio y software.

En nuestro medio, los métodos de exploración *in-situ* más conocidos corresponden al método de perforación estándar (SPT) y método de perforación con rotación, siendo el primero empleado para suelos y el segundo para material rocoso. No obstante, tal como se muestra en la Figura 4, existe una gran variedad de dispositivos que permiten caracterizar el terreno.

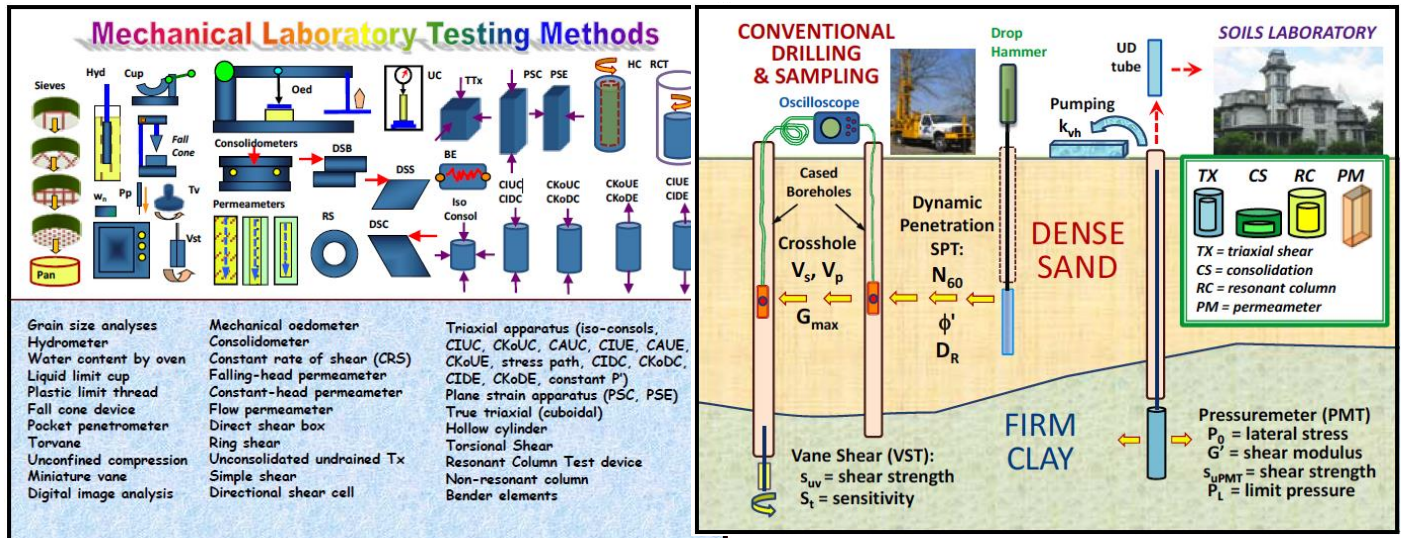


Figura 2. Métodos de investigación de laboratorio y campo (tomado de referencia # 17)

Cada instrumento mostrado en la figura 2, permite realizar mediciones de uno o varios parámetros que definen el comportamiento de los materiales que componen un terreno determinado. Muchos de estos instrumentos cuentan con su propio software, el cual permite procesar los datos obtenidos de una manera rápida y facilitar su interpretación.

II. ASPECTOS BÁSICOS DE LA MECÁNICA DE SUELOS

Los principios fundamentales del comportamiento mecánico de los suelos datan de épocas muy antiguas:

San Mateo 7:24-27 DHH94PC. "Por tanto el que me oye y hace lo que yo digo, es como un hombre prudente que construye su casa sobre la roca. Vino la lluvia, crecieron los ríos y soplaron los vientos contra la casa; pero no cayó porque tenía su base sobre roca. Pero el que me oye y no hace lo que yo digo, es como un tonto que construyó su casa sobre la arena. Vino la lluvia, crecieron los ríos y soplaron los vientos y la casa se vino abajo".

La cita anterior pone de manifiesto que desde tiempo bíblicos se tenía conocimientos de la inestabilidad de ciertos tipos de suelos (como las arenas) y de los problemas de cimentación que presentan frente a la acción del agua.

El Código de Hammurabi es uno de los conjuntos de leyes más antiguos conocidos por la humanidad. Fue creado en la antigua Mesopotamia, en torno al siglo XVIII a.C. Aunque no existe una sección específica en el Código de Hammurabi que se refiera exclusivamente al suelo o los cimientos de edificios, hay ciertas disposiciones que se relacionan con la construcción y la responsabilidad de los constructores. Una de estas disposiciones se relaciona con la responsabilidad de un constructor en caso de que un edificio se derrumbe y cause daños a la propiedad o a las personas.

La ley 229 del Código de Hammurabi establece lo siguiente: "Si un constructor ha construido una casa para un hombre y no ha solidificado su trabajo y la casa que construyó se ha derrumbado y ha causado la muerte del dueño de la casa, ese constructor será condenado a muerte."

Esta ley demuestra la importancia que se daba a la calidad de la construcción, los cimientos y la solidez de las estructuras, en la antigua Mesopotamia. Aunque no se menciona específicamente la palabra "cimientos", esta ley muestra claramente la preocupación por la seguridad de las estructuras construidas y las graves consecuencias que podría enfrentar un constructor si su trabajo resultaba deficiente y provocaba daños graves o la muerte de alguien.

Para el diseño geotécnico de cimentaciones no basta con conocer las propiedades de resistencia y deformabilidad del suelo; aspectos sobre los que se centran las nuevas tecnologías de la exploración geotécnica. Es necesario conocer también sus propiedades físicas, que necesariamente deben determinarse mediante ensayos de laboratorio; conocidos como pruebas de caracterización. Figuran entre ellas: clasificación de suelos, el contenido de humedad natural, el contenido de material orgánico, pesos volumétricos, granulometría, límites de Atterberg y gravedad específica de sólidos.

El conocimiento de las variables antes mencionadas guía al geotecnista sobre el comportamiento que podría experimentar el suelo a la hora de cargarlo; así como su comportamiento en el tiempo.

Los suelos finos de comportamiento cohesivo, como los limos y las arcillas, presentan un comportamiento de ingeniería muy diferente al de los suelos gruesos como las arenas o las gravas. Algunas de esas diferencias se presentan a continuación:

Propiedades de los suelos arenosos

- Se compactan por vibraciones.
- Resistencia y deformabilidad dependientes del tamaño, forma y distribución granulométrica de las partículas.
- Comportamiento macroscópico (partículas visibles a simple vista).
- Deformaciones elásticas e inmediatas.

- Pueden licuarse durante sismos.
- No presentan plasticidad.
- Resistencia y deformabilidad poco dependientes del contenido de humedad.
- Muy permeables.
- Asentamientos elásticos e inmediatos.
- La resistencia depende la fricción entre partículas.

Propiedades de los suelos cohesivos

- Se compactan por amasado.
- Resistencia y deformabilidad dependientes de las fuerzas electroquímicas entre partículas.
- Comportamiento microscópico. Partículas visibles solo con microscopio electrónico.
- Deformaciones elásticas (a largo plazo por consolidación).
- Cuando están flojos pueden producir amplificación dinámica durante sismos.
- Presentan plasticidad. Resistencia y deformabilidad dependientes del contenido de humedad.
- Impermeables o muy poco permeables.
- Comportamiento cohesivo (independiente de la fricción entre partículas).

Los suelos con alto contenido orgánico o francamente orgánicos, son ampliamente reconocidos como generadores de problemas geotécnicos. Una premisa reconocida desde los inicios de la mecánica de suelos, es que deben ser removidos dentro de las áreas de construcción, o alternativamente es necesario utilizar métodos de mejoramiento del terreno o sistemas especiales de cimentación.

La clasificación de suelos en el laboratorio; así como su reconocimiento visual, es una tarea básica en la ingeniería geotécnica, pues determina el tipo de suelos desde el punto de vista de la ingeniería: arcillas, limos, arenas, gravas sus posibles combinaciones. El comportamiento de ingeniería de cada uno de estos suelos es muy diferente y por ende los métodos para cimentar en forma segura son también diferentes.

La humedad natural es una variable fundamental que siempre debe conocerse, pues es un índice predictivo sobre el comportamiento geotécnico de los suelos. Entre mayor sea la humedad natural, peor será su comportamiento geotécnico. Cuando el valor de este índice es mayor que los estándares de suelos con comportamiento normal, se está frente a la presencia de suelos de comportamiento subnormal tales como: suelos expansivos, suelos colapsables, suelos muy compresibles, suelos sensitivos o tixotrópicos, etc.

El peso volumétrico es también un índice predictivo del comportamiento futuro de un suelo. Suelos cuyo peso volumétrico es menor que los estándares de suelos con comportamiento normal, son también reconocidos como subnormales: suelos colapsables, suelos sensitivos, suelos blandos, etc.

Los límites de Atterberg son una propiedad de gran importancia en el comportamiento de los suelos cohesivos (limos o arcillas) cuando el valor de estos índices se sale del rango de los suelos de comportamiento normal se está frente a la presencia de suelos de comportamiento subnormal; tales como: suelos expansivos, suelos colapsables, suelos sensitivos o tixotrópicos, etc.

La granulometría es una variable fundamental que rige el comportamiento de los suelos granulares (arenas, gravas o sus combinaciones). Las propiedades de ingeniería (resistencia y deformabilidad) de los suelos granulares, dependen básicamente de su curva granulométrica. Materiales bien graduados presentan buen comportamiento mecánico; en tanto que en los suelos mal graduados su comportamiento podría ser pésimo. La licuación de suelos arenosos finos en caso de sismos, es uno de esos casos; fenómeno que es gobernada en gran medida por su granulometría.

La gravedad específica de sólidos o densidad de sólidos se relaciona con el tipo de minerales que constituyen los suelos. Es una variable fundamental para determinar algunas propiedades de los suelos tales como su relación de vacío o su porosidad. Entre mayor sea la porosidad o la relación de vacíos, peor será el comportamiento mecánico de un suelo. Cuando el valor de tales índices se sale del rango de los suelos de comportamiento normal, se estaría frente a la presencia de suelos de comportamiento subnormal, tales como: suelos blandos y compresibles, suelos colapsables, suelos sensitivos o tixotrópicos, suelos licuables, etc.

Los métodos modernos de exploración geotécnica de campo no determinan en forma directa ninguna de las propiedades físicas anteriormente mencionadas; sin embargo, algunas de ellas pueden obtenerse en forma aproximada mediante correlaciones empíricas entre la variable que mide el instrumento y la propiedad física.

Las variables antes descritas son el equivalente en la medicina moderna a: presión arterial, temperatura, frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno en sangre y frecuencia respiratoria. Esos índices son necesarios para que el médico conozca los padecimientos que puede tener un paciente y los posibles tratamientos. A partir de ellos direccionará la realización de otras pruebas directas y más sofisticadas para la atención de problemas específicos.

Similarmente en la ingeniería geotécnica las pruebas de caracterización son estrictamente necesarias para que el geotecnista conozca los problemas que pueda experimentar un suelo y similarmente proponga otros métodos de exploración directos más sofisticados.

Un aspecto muy importante de las pruebas de caracterización en laboratorio es que determinan en forma directa las propiedades de los suelos.

III. Ensayos in situ

3.1 Prueba de penetración normal (SPT)

La prueba de Penetración Normal SPT (ver figura 3) surge en la década de los 1920 y se emplea para recuperar muestras alteradas de suelo, las cuales en campo permiten identificar tipos de suelos y determinar la estratigrafía. Las muestras extraídas permiten determinar en laboratorio las propiedades índices del suelo tales como: contenido de humedad natural, límites de consistencia, pesos volumétricos, granulometría, gravedad específica de sólidos, entre otras. Además del muestreo continuo se determina el valor del índice N_{spt} , cantidad de golpes para que un muestreador partido de dimensiones estándar penetre 30 cm, con un mazo de peso estándar y altura de caída también estándar. Este índice es correlacionable con las propiedades geotécnicas de los suelos. Aunque el ensayo SPT ha sido superado por otros ensayos más modernos, es todavía el ensayo o prueba más utilizado en la realización de sondeos.

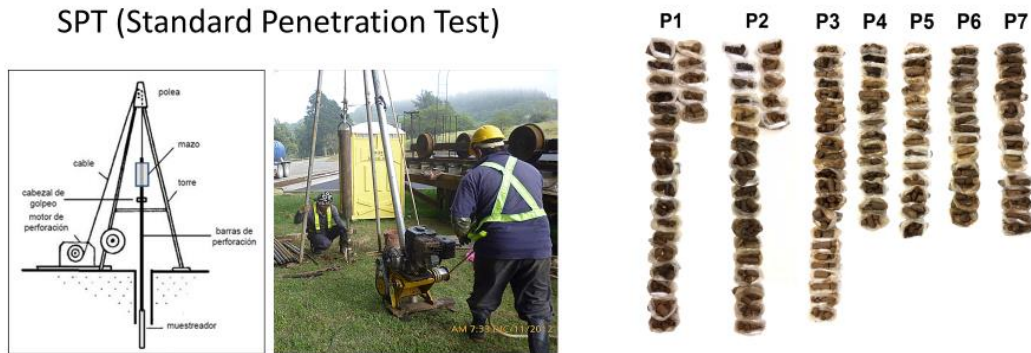


Figura 3. Prueba de Penetración Normal (SPT)

3.2 Perforación rotativa en roca

Data desde la segunda mitad del siglo XX con aplicación a la exploración petrolera. Es un método en que se extraen muestras continuas de roca mediante un barril muestreador acoplado a una broca de diamante (ver figura 4). Permite la extracción continua de testigos para el reconocimiento de la columna estratigráfica y para su posterior análisis en el laboratorio. Se obtiene además el valor de los índices RQD y porcentaje de recuperación, correlacionables con las propiedades geotécnicas de los macizos rocosos. Las muestras recuperadas pueden ser sometidas a ensayos de laboratorio tales como: peso volumétrico, resistencia a compresión, velocidad de onda sónica, mineralogía, etc.

Rotación con broca de diamante



Figura 4. Perforación rotativa

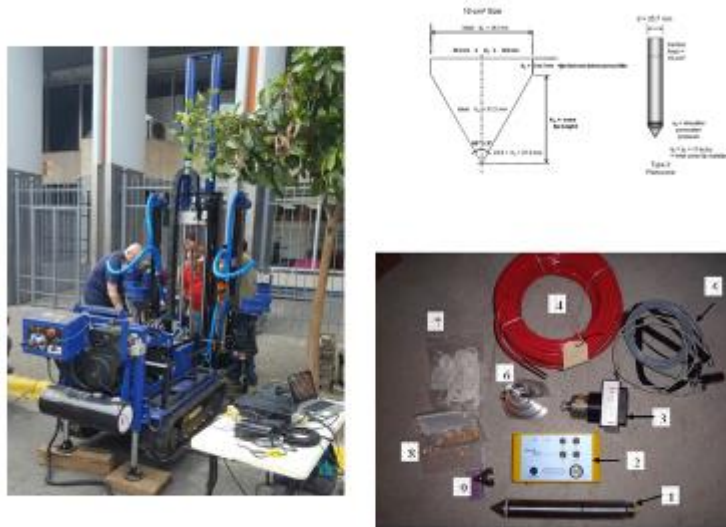
3.3 Prueba de penetración cónica (CPT)

Nace en la década de 1930; sin embargo, en la década de 1990 con el advenimiento de la tecnología de los transductores eléctricos y de cuerda vibrante fue posible realizar mediciones automáticas con altísima precisión. Actualmente figura entre los métodos modernos de exploración geotécnica. Se hinca una punta cónica con presión cuasi-estática y se mide la resistencia a la penetración mediante una celda de carga eléctrica instalada en la punta (ver figura 5). En su versión más moderna se adapta un transductor de presión de agua y una celda eléctrica para medir fricción.

Las variables no son medidas en forma directa; sino que se utilizan transductores, que mediante calibraciones es posible transformar señales eléctricas en variables físicas tales como fuerza, esfuerzo o presión hidrostática. La confiabilidad de estos métodos dependerá de calibración de los transductores y en su mantenimiento periódico. Para ello se requiere que el usuario tenga una cultura y conocimiento en el campo de los distintos transductores utilizados (eléctricos o de cuerda vibrante).

Como ventaja del método se destaca que mide con una elevadísima precisión las propiedades de resistencia y deformabilidad de los suelos.

Una desventaja del método es que no permite el muestreo del suelo; es decir avanza a ciegas. Por tal razón se recomienda acompañarlo con el método de Penetración Normal SPT, para la obtención de muestras y posterior caracterización en el laboratorio.



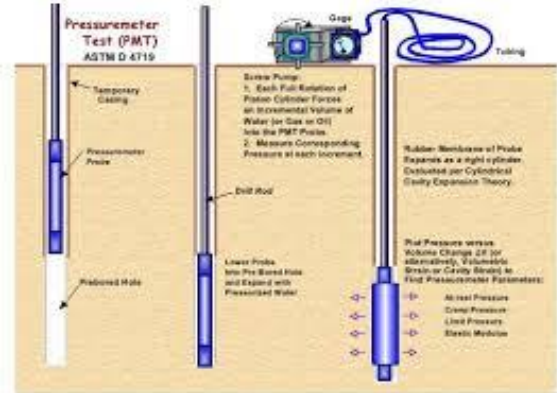
Ensayos de cono electrico

Figura 5. Método de Penetración Cónica CPT

3.4 Prueba presiométrica

Nace en Francia en la década de 1950. Es uno de los ensayos modernos utilizados en el reconocimiento geotécnico. Consiste en la aplicación a las paredes de un sondeo, de una presión radial creciente, llegando o no hasta la condición límite de rotura del terreno. Se extiende una membrana cilíndrica dentro de un medio inalterado y se infla para obtener la respuesta esfuerzo deformación del medio (ver figura 6). Es una herramienta geotécnica avanzada utilizada para medir una variedad de propiedades del suelo y de las rocas blandas. Es una prueba bastante mecánica puesto que las variables a medir son la presión de inflado y el volumen de agua que ingresa a la membrana cilíndrica. No obstante, esas variables pueden medirse también en forma automática si se utilizan transductores de presión y transductores de variación de volumen. Esto permite la utilización de sistemas de cálculo automático y programas especializados para el procesamiento y análisis de la información.

Se obtiene la presión límite (de rotura), la presión de fluencia y el módulo de deformación presiométrico. Dichos parámetros pueden correlacionarse con la resistencia al corte no drenada de suelos cohesivos, ángulo de fricción de suelos friccionantes y módulo de deformación en ambos casos.



ENSAYO PRESIOMETRICO

Figura 6. Prueba presiométrica

3.5 Ensayo Dilatómetro de Marchetti (DMT)

Nace en la década de 1960. El DMT (ver figura 7) es un ensayo in situ de carga deformación con deformación controlada, cuyo rango de aplicación es en suelos granulares o cohesivos de poco a muy densos y de blandos a duros.

Consiste en hincar una paleta plana provista de una membrana metálica expandible horizontalmente que se infla mediante gas a presión. La hincada de la paleta se realiza mediante presión estática. A intervalos de 20 cm se detiene la penetración y se infla la membrana, con un desplazamiento de 1.1 mm.

Mediante la interpretación del ensayo es posible obtener información sobre el índice de calidad del material (ID), razón de preconsolidación, módulo de deformación tangencial, resistencia no drenada, ángulo de fricción y peso volumétrico. Es un ensayo sin muestreo por lo que no puede conocerse de forma directa el tipo de suelos; aunque mediante interpretación se obtiene una idea sobre el tipo de suelo.

Para la medición de las variables se utilizan transductores de presión y desplazamiento, por lo que es posible el uso de sistemas de adquisición de datos para el cálculo e interpretación automático.

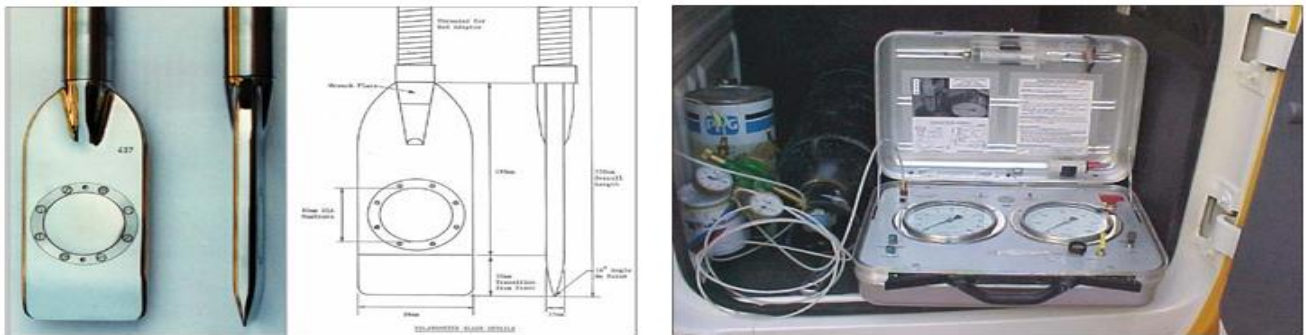


Figura 7 – Ensayo Dilatómetro de Marchetti

IV. Sistema de adquisición de datos y procesamiento automático de la información

Con el surgimiento de los transductores eléctricos y de cuerda vibrante; así como con el desarrollo de las computadoras, surgieron sofisticados sistemas de adquisición de datos, que en conjunto con las computadoras de reciente generación, permitieron el cálculo automático y en tiempo real de los ensayos geotécnicos in situ y también de laboratorio. Esas herramientas permitieron también el desarrollo de software especializados, no solo para el cálculo; sino también para la interpretación de los resultados. Así los vendedores de equipos geotécnicos ofrecen también paquetes de cálculo e interpretación de resultados; así como el software para el cálculo automático de las variables de ingeniería geotécnica tales como: capacidad de soporte de cimentaciones superficiales o profundas, estimación de asentamientos y su proyección en el tiempo, análisis de licuefacción, análisis de deformabilidad con elementos finitos, filtración y redes de flujo, etc.

Con relación a toda esa nueva tecnología es importante destacar lo siguiente:

- 1- Para un uso racional y eficiente del sistema es necesario que los usuarios posean cultura suficiente en el tema de los principios básicos de funcionamiento de transductores eléctricos y de cuerda vibrante. Cabe resaltar que estos instrumentos a menudo tienen una vida útil limitada (sobre todo aquellos en que el principio básico de medición es un extensómetro eléctrico). Estos instrumentos con frecuencia se descalibran, pierden estabilidad con el tiempo, se dañan o rompen las conexiones de los cables y consecuentemente pueden funcionar incorrectamente. Es necesario por lo tanto que el usuario tenga conocimientos básicos de instrumentación electrónica para detectar esos malfuncionamientos, para corregirlos a tiempo, o simplemente para desechar el transductor y reponerlo cuando sea necesario. En resumen, no basta comprar un equipo de este tipo para poder ofrecer servicios en ese campo.
- 2- Los instrumentos de medición (transductores) deben calibrarse periódicamente, pues su estabilidad y buen funcionamiento se van afectando con el tiempo. Ningún transductor mide una variable física (fuerza, desplazamiento, presión, variación volumétrica; etc) en forma directa. Es necesario utilizar una curva de calibración que relacione el principio físico del transductor (extensómetro eléctrico o cuerda vibrante) con la variable física a medir (fuerza, presión desplazamiento, variación volumétrica, etc). Por tal razón la precisión en la medición dependerá de la curva de calibración del instrumento.
- 3- En manos de personas experimentadas en el tema de la instrumentación geotécnica, los equipos y los sistemas de procesamiento y análisis de la información, se convierten en excelentes herramientas de diseño.
- 4- La utilización de esos sistemas por personas que desconozcan los principios antes mencionados es muy peligrosa, y puede conducir a errores geotécnicos imperdonables. En tales casos estos sistemas se convierten en caja negra, en que usuarios poco entrenados, no tendrían ninguna seguridad en los resultados que arrojan.

- 5- El cálculo y procesamiento automático de ensayos in situ, no puede estar desligado de los principios básicos de la mecánica de suelos, pues esa es la única manera de tener confianza en los resultados.
- 6- El uso indiscriminado de estos sistemas sin el conocimiento adecuado puede conducir a errores de diseño importantes.

V. Futuro de la interpretación geotécnica con la inteligencia artificial

Sin duda alguna en los años venideros el tema de la inteligencia artificial mejorará substancialmente estos sistemas. Es probable que los sistemas mejoren para detectar y corregir en forma automática el mal funcionamiento de transductores; es decir desarrollar ensayos a prueba de errores. La recopilación estadística de datos, permitirá también el mejoramiento de la calidad de la información, descartando datos poco confiables y detectando errores en los resultados.

El desarrollo de programas “interpretes” facilitará el análisis de la información, creando sistemas cada vez más amigables con el usuario.

La inteligencia artificial (IA) puede aplicarse también en la geotecnia de diversas maneras para mejorar la eficiencia, precisión y seguridad en la exploración, diseño y gestión de proyectos geotécnicos. A continuación, se presentan algunas formas en que la IA puede ser utilizada en este campo:

1. **Procesamiento de datos geotécnicos:** La IA puede analizar grandes conjuntos de datos geotécnicos, como datos de sondeos, ensayos de laboratorio, registros geofísicos, imágenes de satélite y datos topográficos, para identificar patrones y tendencias que los ingenieros podrían pasar por alto.
2. **Predicción y modelado:** Los algoritmos de aprendizaje automático pueden utilizarse para predecir el comportamiento del suelo y las rocas en diversas condiciones y escenarios, lo que permite una mejor planificación y diseño de proyectos geotécnicos. Por ejemplo, se pueden utilizar modelos predictivos para predecir la estabilidad de taludes, la capacidad de carga de cimentaciones, o la deformación del terreno.
3. **Optimización del diseño:** Los algoritmos de optimización pueden ayudar a encontrar diseños geotécnicos óptimos, considerando múltiples variables y restricciones, como la economía, la seguridad y el impacto ambiental.
4. **Detección y monitoreo de riesgos geotécnicos:** Los sistemas de IA pueden analizar datos en tiempo real de instrumentación geotécnica, como inclinómetros, piezómetros y extensómetros, para detectar anomalías y alertar sobre posibles riesgos de falla en estructuras geotécnicas.
5. **Asistencia en la toma de decisiones:** Los sistemas expertos basados en IA pueden proporcionar recomendaciones y asesoramiento a ingenieros geotécnicos en la toma de

decisiones complejas, ayudándoles a evaluar diferentes opciones y considerar múltiples factores.

6. Simulación de procesos geotécnicos: Mediante el uso de técnicas como el aprendizaje profundo y la simulación basada en agentes, es posible simular procesos geotécnicos complejos, como la consolidación del suelo, la infiltración del agua o el comportamiento de las estructuras geotécnicas bajo cargas dinámicas.

En resumen, la inteligencia artificial ofrece una serie de herramientas y técnicas que pueden transformar la forma en que se abordan los desafíos en el campo de la geotecnia, permitiendo una mayor eficiencia, precisión y seguridad en la planificación, diseño y gestión de proyectos geotécnicos.

VI. Criterio profesional e investigación geotécnica.

Actualmente estamos ante una proliferación de equipos de investigación, así como, de software especializado usando métodos matemáticos sofisticados, por lo que, se destaca la importancia del criterio y experiencia profesional para seleccionar los parámetros geotécnicos que alimentarán estos análisis.

Siguiendo esta tendencia y ante el uso de la inteligencia artificial es posible esperar “cualquier cosa”, existiendo a la fecha, software especializado para todo tipo de actividad geotécnica, sea a nivel de investigación, interpretación, análisis y concluyendo con el diseño.

De esta manera, es posible obtener perfiles geológicos-geotécnicos incluyendo los parámetros geotécnicos hasta con un enfoque estadístico que permiten todo tipo de cálculo geotécnico, tales como, distribución de esfuerzos, deformaciones elásticas y por consolidación, etc., así como todo tipo de diseño geotécnico.

Cabe la pregunta, siendo cada día más especializados los equipos de investigación y el software, será necesario ser un especialista y tener mucha experiencia de campo y de laboratorio para poder usar estos programas exitosamente.

Se destaca que la mayoría de los resultados de campo obtenidos con estos equipos que usan nuevas tecnologías están asociados a un software que permite calcular todas las variables que se necesitan para el diseño geotécnico los cuales utilizan diferentes criterios basados en experiencias locales que muchas veces no son aplicables al sitio en estudio.

Es de esperar que conforme transcurre el tiempo se desarrollen experiencias que representen mejor a la mayoría de los sitios investigados, aspecto muy importante y relevante que demuestra la necesidad de aplicar el criterio previo a la asignación de parámetros a un modelo geotécnico.

A manera de ejemplo se menciona lo que puede suceder interpretando los datos de un ensayo CPT actualmente muy usado en nuestro medio, al obtenerse resultados diferentes para parámetros tales como cohesión no drenada, ángulo de fricción,

capacidad de soporte admisible, etc., de modo que, como se observa en la figura 8, dependiendo de la correlación usada es posible obtener valores algunos muy diferentes, lo que obliga a aplicar el criterio para seleccionar los parámetros que se consideren más representativos del sitio investigado.

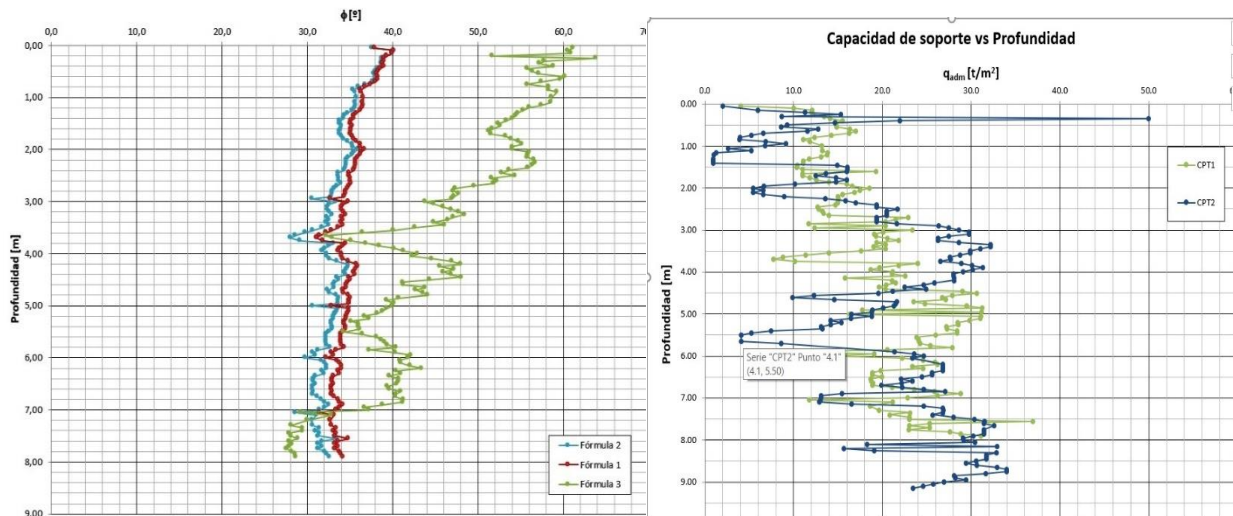


Figura 8. Resultados de una prueba CPT

VII. Modelos geológicos y modelos geotécnicos

Es muy importante definir los objetivos y alcances de la investigación geotécnica, empezando por contar con modelo geológico claro y detallado, así como, un modelo geotécnico que incluye las características geotécnicas.

Cuando no se dispone de un conocimiento geológico claro se incurre en graves errores siendo necesario definir un modelo geológico-geotécnico que sea el resultado de las observaciones de campo, características geomorfológicas del sitio, la geología estructural, etc. integrados con los resultados de la investigación mediante ensayos de campo y laboratorio.

No se trata sólo de hacer sólo “un dibujo” con base en la geometría generada por un estudio geofísico asignándose parámetros de los cuales se desconoce su confiabilidad y su representatividad, debiéndose tener presente siempre que esta información se va utilizar para hacer un diseño geotécnico para una obra que puede significar un alto costo en términos de vidas humanas, así como, de impacto en la sociedad y de costos.

Adicionalmente en un medio geológico como el existente en Costa Rica en muchos casos, constituidos por perfiles de rocas volcánicas intercalados muchas veces con depósitos aluviales, paleosuelos, emisiones volcánicas aéreas, etc., afectados muchas veces por deslizamientos, erosión y alta meteorización química, generan un perfil del

subsuelo muy complicado de caracterizar sin tener el criterio geológico y geotécnico suficiente.

Es importante el conocimiento acerca de muchos conceptos básicos de geomorfología, litología, geología estructural, neotectónica, etc., así como, sobre suelos residuales, transportados, etc. que deben ser aplicados para realizar un modelo geológico geotécnico detallado y realista que represente fielmente el perfil del suelo analizado.

Diferentes tipos de roca desarrollan perfiles del subsuelo con diferentes características físicas y mecánicas, como se ilustra en la figura 9, lo cual debe ser considerado en la modelación geotécnica, de este modo, es posible que se evite cometer graves errores si no toman en consideración estos criterios.

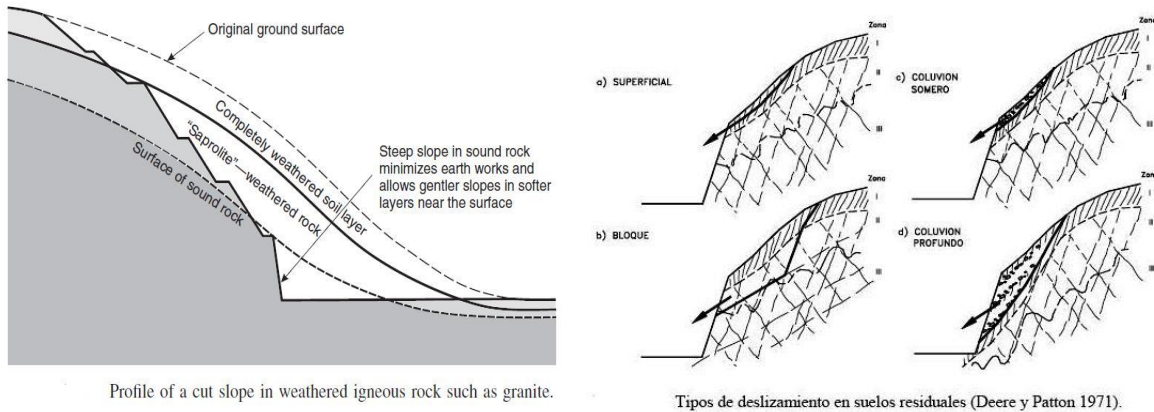


Figura 9. Perfiles típicos en suelos residuales

En la figura 10 se ilustra la complejidad de un perfil del subsuelo en un ambiente volcánico cuaternario afectado por procesos erosivos y depósitos coluviales rellenando cuencas ocultando capas de suelo suave que cambian radicalmente un modelo geotécnico.



Figura 10. Complejidad de un modelo geológico-geotécnico en medios volcánicos



Figura 11. Complejidad de un modelo geológico-geotécnico en medios volcánicos

En medio geológicos volcánicos de edad reciente y en climas tropicales como los existentes en Costa Rica, el efecto de la meteorización química sobre las rocas es muy intenso alterando especialmente sus características mecánicas, adicionalmente es frecuente encontrar depósitos coluviales suaves intercalados entre capas resistentes, cauces viejos rellenos de suelo, etc., como se ilustra en la figura 11 lo cual puede generar un problema grave de interpretación.

En Costa Rica especialmente en el Valle Central existen extensos depósitos laháricos producto de la actividad volcánica que se han desplazado desde las partes altas de las montañas hasta las zonas bajas recubriendo la topografía existente, rellenando cuencas y sobreyaciendo a las rocas existentes. De forma similar se presentaron depósitos coluviales generados por deslizamientos en zonas de alta pendiente formados por suelos y rocas débiles activados por lluvias, sismos y transportados por gravedad y por corrientes de agua. Este tipo de materiales se ilustra en la figura 12.



Figura 12. Características de depósitos laháricos y coluviales que deben considerarse para definir un modelo geológico-geotécnico

Es muy frecuente encontrar también alternancias en materiales piroclásticos de deposición aérea y fluvial (tefras), tipo tobas, brechas, lapilli, lahares, etc. los cuales se intercalan pudiéndose encontrar capas suaves debajo de capas duras y con espesores muy variables tal como se muestra en la figura 13

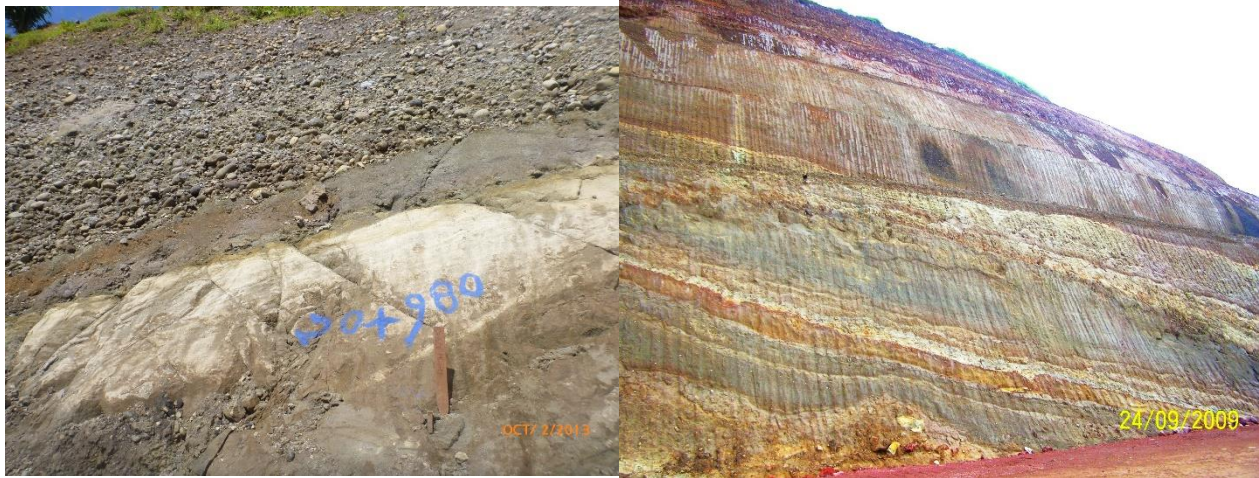


Figura 13. Perfiles del subsuelo en rocas volcánicas piroclásticas



Figura 14. Perfil del subsuelo de una roca caliza con karstismo

Otra dificultad se puede presentar en rocas sedimentarias tipo calizas que pueden tener el problema de disolución (karstismo) desarrollando perfiles del subsuelo complejos tal como se muestra en la figura 14.

VIII. Uso y abuso de correlaciones

Una vez que los planos de una obra se concluyen, dibujados por computadora en 3D y a colores incluyendo el uso de muchos otros parámetros geotécnicos (módulo elástico, módulo cortante, razón de poisson, etc.) indicando que se realizaron con métodos

matemáticos sofisticados (elemento finito, etc.), se olvida la validez o representatividad de la información geotécnica que fue la base de los cálculos.

Existe actualmente “software” especializado para realizar todo tipo de cálculos geotécnicos, tales como, estabilidad de taludes, capacidad de soporte, empuje en muros, diseño de pilotes, cálculo de asentamientos, etc. solo bastando introducir la geometría del modelo y principalmente los parámetros de resistencia al corte de los materiales, para que cualquier persona sin mayor conocimiento del tema pueda obtener resultados y dar criterio sobre una obra o proyecto.

El problema va más allá, existe “software” que con uno o dos datos de medición directa calculan “vía correlaciones” todas las constantes elásticas (módulos de Young y cortante, razón de poisson, etc. y hasta los parámetros de resistencia al corte “ c ” y “ ϕ ” que corresponden a un estado de falla a deformaciones infinitamente mayores que a los niveles de deformación que actúa un pulso elástico (refracción sísmica, MASW, dilatómetro, CPT, presiómetro, etc.).

Estas correlaciones son basadas en estudios experimentales sobre medios geológicos, que no necesariamente corresponden a los tipos de suelos y rocas investigados especialmente cuando se trata de medios geológicos volcánicos cuaternarios, que a nivel mundial pueden ser de los menos investigados y son los que predominan en Costa Rica.

Especialmente en mecánica de suelos se deben tener conceptos claros sobre análisis en esfuerzos totales y efectivos, cohesiones y ángulos de fricción efectivos, acción del nivel de agua, diferencias de comportamiento entre suelos arcillosos y granulares con el contenido de humedad y así muchos otros conocimientos que no tienen otros profesionales, que creen que el problema se resuelve solo con tener los valores de “ c ” y “ ϕ ”.

Es indispensable disponer de un criterio claro del modelo geológico (unidades geológicas presentes con sus características y geometría), así como, los parámetros geotécnicos asignados a estas unidades. ***Se debe tener presente que un factor de seguridad más alto no necesariamente corresponde a una probabilidad menor de falla debido a que esta última es también dependiente del grado de incertidumbre de los parámetros (Salcedo D. 2017)***

Lo anterior significa que cuando se usan equipos electrónicos de Investigación del subsuelo combinados con programas computacionales que aplican correlaciones y metodologías desconocidas para los usuarios, no se tiene el criterio suficiente para conocer el grado de incertidumbre de los parámetros geotécnicos obtenidos, por lo tanto, también el factor de seguridad obtenidos pierde validez.

En general se percibe que no se tiene claro el concepto de esfuerzos totales y efectivos y que dependiendo del caso de análisis, capacidad de soporte en arcillas, presión lateral sobre un muro, estabilidad de taludes, etc., se debe aplicar el criterio correspondiente.

La cohesión y el ángulo de fricción interna (c y ϕ) dependen del tipo de ensayo, que se debe planear de acuerdo al problema específico. No es posible con el ensayo SPT (valor N), CPT, presiómetro, etc., se pueda determinar, para suelos arcillosos, el ángulo de fricción interna efectivo.

No es posible combinar estos valores separadamente para encontrar una cohesión y un ángulo de fricción en esfuerzos efectivos, parámetros normalmente usados en los análisis geotécnicos y en los diseños geotécnicos. Como se ilustró en la figura 8 si el suelo es arenoso existen tres diferentes ecuaciones para calcular el ángulo de fricción (ϕ), que dan rangos de valores muy diferentes si se considera la sensibilidad de este valor en el diseño geotécnico.

En muchos casos casi obligatoriamente hay que aplicar el rango más bajo para que los valores sean razonables, tal es el caso de los limos suaves (cenizas) del Este del Gran Área Metropolitana que como se observa en los gráficos de la figura 8, las correlaciones en los rangos bajos están entre 32 y 40° y en el rango alto todos mayores a 40° y hasta 60° o sea como se aprecia hay que tener mucho criterio para escoger los valores a recomendar.

Al igual que en el método CPT en el método de Penetración Estándar (SPT) no es posible determinar los parámetros de resistencia en esfuerzos efectivos, ni tampoco en esfuerzos totales para la condición consolidada no drenada. ($C_u > 0$ $\phi_u > 0$).

De forma similar sucede con la estimación de parámetros de resistencia a partir de ensayos geofísicos lo cual es de mucha utilidad debido a que es posible obtener gran cantidad de datos de las diferentes capas que constituyen el subsuelo lográndose un panorama más completo y una visión estadística de los valores, sin embargo, las correlaciones aplicadas se basan en la teoría de la elasticidad ajustadas con experiencias en muchas ocasiones no aplicables a medios geológicos específicos lo cual es una importante limitación.

En la mayoría de los casos en los informes donde se aplican estas metodologías no se aclaran ni se explican estas limitaciones, de modo que, los usuarios de la información, si no tienen el conocimiento y experiencia correspondientes podrán creer que estos valores tienen gran credibilidad y pueden alimentar cualquier software geotécnico.

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1- En todo estudio geotécnico es necesario realizar ensayos de caracterización para medir en forma directa las propiedades físicas del suelo y determinar mediante tales índices si se está frente a suelos de tipo normal, o frente a suelos de comportamiento subnormal. Estos ensayos deberán servir de guía para la planeación de pruebas in situ más sofisticadas.

- 2- La extracción continua de muestras para reconocimiento visual de los suelos y para realización de pruebas de caracterización en el laboratorio, son necesarias en toda obra geotécnica.
- 3- La realización de ensayos in situ especiales con tecnologías modernas de medición, requieren una especialización de los usuarios en cuanto al uso de transductores electrónicos de medición. No basta con adquirir estos equipos; sino que es necesario conocer a fondo su funcionamiento, a fin de detectar errores de mal funcionamiento y poder corregirlos.
- 4- Los equipos electrónicos de medición de las variables de ingeniería (fuerza, presión, presión hidrostática, desplazamiento, variación volumétrica, etc) deben calibrarse periódicamente. El usuario de estos instrumentos debe conocer la forma de realizar tales calibraciones. Sin estas calibraciones periódicas los resultados que se obtengan pueden ser erróneos.
- 5- Los ensayos in situ tales como el CPT, presiómetro o dilatómetro deberá realizarse complementariamente con algún otro ensayo con recuperación de muestras (SPT por ejemplo), a fin de proceder con el reconocimiento visual y con la realización de pruebas básicas de caracterización. Los autores han detectado muchos errores geotécnicos provenientes de usar los ensayos in situ antes mencionados, sin reconocer visualmente los suelos.
- 6- El uso de programas especiales de interpretación y análisis de datos provenientes de ensayos in situ, deberá verse con cuidado. Es necesario verificar que los resultados no contradigan las leyes fundamentales de la mecánica de suelos.
- 7- El futuro de la interpretación y análisis de las pruebas de campo y laboratorio mediante inteligencia artificial es un arma de doble filo. Sin duda alguna, bien manejada, ayudará a mejorar el conocimiento geotécnico. Sin embargo, en manos de personas poco entrenadas o muy confiadas, pueden causar confusión al creer que los resultados son verdades absolutas; siendo que talvez no lo son.
- 8- Los principios elementales de la mecánica de suelos nunca deben ser olvidados cuando se utilizan ensayos y métodos modernos de laboratorio o campo.

X. BIBLIOGRAFIA

1. ASTM INTERNATIONAL. (2019). ASTM D5778/D5778M-18: Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. ASTM International.
2. ASTM INTERNATIONAL. (2014). ASTM D4719/D4719M-14: Standard Test Method for Pressuremeter Testing in Soils. ASTM International.
3. BAKSHI, U. A., & BAKSHI, A. V. (2008). Electrical instrumentation. Technical Publications.

4. BELL, A. M. (2011). *Electronic Instrumentation and Measurements*. Oxford University Press.
5. BOLTON, W. (2018). *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición (3a ed.)*. Pearson Educación.
6. CAMPANELLA, R. G., & ROBERTSON, P. K. (1985). The use of the flat dilatometer in soil investigations. *Proceedings of the Symposium on the Measurement and Use of in situ Stresses*, 1, 73-86.
7. CUISINIER, O., JAMIOLKOWSKI, M., & LO PRESTI, D. C. F. (2008). Pressuremeter and dilatometer tests: a dual tool for site characterization. *Soils and Rocks*, 31(2), 11-27.
8. D. L. HALL AND C. A. HALL, "Cable tension measurement system," U.S. Patent 4,235,038, November 25, 1980.
9. DYER, R. M. (1993). *Electronic measurement and instrumentation*. Prentice Hall.
10. DOEBELIN, E. O. (2004). *Measurement Systems: Application and Design*. McGraw-Hill Education
11. HELFRICK, A. D., & COOPER, W. D. (2015). *Modern Electronic Instrumentation and Measurement Techniques*. Pearson.
12. JAMIOLKOWSKI, M., LO PRESTI, D. C. F., & MANASSERO, M. (2003). Field calibration of pressuremeters in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(2), 105-117.
13. LAPORTE.G (2018) La importancia de la selección de parámetros de resistencia para diseños geotécnicos: una crítica. XIII Congreso Nacional de Geotecnia CONGEO
14. L. J. FOGLIA, D. M. WADA, AND P. A. OKAMOTO, "Wire-Strain Transducer," U.S. Patent 3,871,159, March 18, 1975.
15. LUNNE, T., & ANDERSEN, K. H. (1992). Use of the Flat Dilatometer in Site Characterization. *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing*, 1, 405-415.
16. MAYNE, P. W., & RIX, G. J. (1995). Interpretation of cone penetration tests—a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4), 784-790.
17. MAYNE P., COOP M., SPRINGMAN S., HUANG A. Y ZORNBERG J. (2009). Geomaterial behavior and testing. 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Alejandría, Egipto.
18. MARCHETTI, S. (1980). In-situ tests by flat dilatometer. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(3), 299-321.
19. MARCHETTI, S., MONACO, P., TOTANI, G., & CALABRESE, M. (1987). The flat dilatometer in soil investigations. *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, 1201-1217.
20. ROBERTSON, P. K. (2015). *Cone penetration testing: a comprehensive guide to CPT and CPTU*. Createspace Independent Publishing Platform.