

Actualidad en el uso de los Ensayos Geotécnicos *in situ*

Marcelo Devincenzi

Control y Prospecciones Igeotest, SL, España

John J. M. Powell

Centre for Structural and Geotechnical Engineering, Building Research Establishment, Watford, United Kingdom.

Nuno Cruz

Mota-Engil, Engenharia e Construções, SA; Dep. de Geociências da Universidade de Aveiro, Portugal.

Marcos Arroyo Álvarez de Toledo

Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña, España

Palabras clave: ensayos *in situ*, caracterización, programa de investigación, estándar.

RESUMEN:

El objetivo de este artículo es presentar las últimas aportaciones a los ensayos geotécnicos *in situ* más frecuentes y su evolución en los últimos años. Se destaca el potencial de los ensayos geotécnicos/geoambientales y la importancia de unos estándares globales que aseguren que los análisis se lleven a cabo con consistencia, un tema de primordial importancia para intercambiar conocimientos de un país a otro o para desarrollar correlaciones genéricas. Si bien es posible obtener un amplio espectro de parámetros fidedignos a partir de los ensayos *in situ*, se puede observar que la evaluación de algunos ensayos ha mejorado a medida que la base de datos disponible ha aumentado con la experiencia, mientras que la de otros ha disminuido al descubrir que las predicciones iniciales de sus posibilidades no se han cumplido. Es necesario mejorar la situación y conseguir los mejores resultados de los ensayos ya existentes.

La utilidad y versatilidad de los ensayos geotécnicos *in situ* en un programa de investigación del terreno es evidente siempre y cuando se escoja el método adecuado a la situación y que los equipos y procedimientos permitan la obtención de datos repetibles y fiables.

ABSTRACT:

The objective of this report is to introduce the recent advances in this field. A general prologue is made stressing the potential of geotechnical/geoenvironmental *in situ* testing and the importance of global standards that will ensure that tests are carried out with consistency, a subject of prime importance to transfer experience from one country to another or develop generic correlations. A wide range of parameters can be reliably obtained from *in situ* testing and it is noticeable that the ratings of some tests have improved as the database of experience has built up, but others have declined as the initial predictions of their capability have been found to be wanting. Effort is required in order to improve the situation and get the best from existing tests.

1 INTRODUCCIÓN

Para elaborar un correcto diseño geotécnico y una correcta construcción es necesario tener un buen conocimiento del comportamiento mecánico del terreno, incluyendo su variabilidad espacial. El objetivo de un programa de investigación de este tipo consiste en la definición de los siguientes puntos:

1. Naturaleza, secuencia y distribución espacial de los estratos bajo la superficie (encuadre geológico).
2. Condiciones freáticas (régimen hidrogeológico).

3. Propiedades físicas y mecánicas de los estratos bajo la superficie (marco geotécnico).
4. En los estudios geoambientales de contaminación del terreno debe determinarse, además, la distribución y la composición de los elementos contaminantes (entorno geoambiental).

Estos requerimientos varían en extensión volumétrica dependiendo de la naturaleza del proyecto y de los riesgos relacionados con el terreno que se perciban. Hay distintas técnicas disponibles para alcanzar estos objetivos, mediante ensayos *in situ* y mediante análisis de laboratorio sobre muestras obtenidas en sondeos o calicatas.

Los ensayos de laboratorio incluyen aquellos que analizan elementos del terreno (muestras), como los análisis triaxiales, y los que analizan los modelos prototipo, como los análisis centrífugos. Los ensayos sobre el terreno incluyen los sondeos y calicatas, la toma de muestras, los ensayos *in situ*, los análisis a escala real y los métodos geofísicos.

Una campaña de caracterización del terreno debería incluir una combinación de ensayos de laboratorio y de ensayos sobre el terreno. Ambas técnicas deben considerarse complementarias en lugar de excluyentes. Sin embargo, los ensayos *in situ* pueden ofrecer, a menudo, importantes ventajas que los análisis en el laboratorio no tienen, por ejemplo:

- pueden ser más rápidos, fáciles de ejecutar y económicos que la toma de muestras y los análisis en el laboratorio,
- el terreno puede evaluarse en su entorno natural sin los problemas potenciales de alteración de las muestras
- la variabilidad espacial del subsuelo puede investigarse con más detalle.

La Tabla 1 (Lunne y otros, 1997) es una versión actualizada de una tabla publicada originalmente a principios de los años ochenta que presenta una lista de los principales tipos de ensayo *in situ* con su aplicación y utilización en distintos tipos de terreno. Si comparáramos esta tabla con las versiones anteriores observaríamos que la valoración de algunos de los ensayos ha mejorado a medida que la base de datos se ha incrementado con la experiencia. La de otros, en cambio, ha disminuido ya que las predicciones iniciales de sus posibilidades no se han cumplido. *No hay ninguna duda de que los niveles de aplicación proporcionados en la Tabla 1 pueden, en la actualidad, alcanzarse o mejorarse siempre que los ensayos se seleccionen y utilicen correctamente.* Esto es aplicable a todos ensayos *in situ*, desde los básicos y más sencillos como los penetrometros dinámicos y los ensayos de penetración estándar (SPT), a los ensayos más complejos como los piezoconos (CPTU) y los presiómetros auto-perforantes (Self Boring Pressurometer / SBP).

La Tabla 1 muestra que puede obtenerse, de forma precisa, una amplia gama de parámetros a partir de los ensayos *in situ*. En el mejor de los casos, todas las calificaciones de la tabla deberían ser "A" y los investigadores deberían seguir intentando aumentar los niveles de aplicabilidad a pesar de que esto no sea siempre posible, sobre todo si existe una falta de idoneidad del ensayo.

Es evidente que muchos usuarios consideran que, demasiado a menudo, las posibilidades de los ensayos *in situ* se han sobrevalorado o aplicado de forma inapropiada. Esto ha provocado cierta *insatisfacción* ya que los ensayos no han cumplido con las expectativas previstas. El hecho de que se sigan publicando artículos con más y más correlaciones con parámetros geotécnicos no contribuye precisamente a mejorar esta percepción.

Sin embargo, a menudo no es un error del ensayo en sí mismo sino de su ejecución o de su aplicabilidad a un determinado tipo de terreno. Antes que nada, los resultados de un ensayo *in situ* deben ser repetibles dentro de los límites de la variabilidad del terreno. Tanto el equipo como la operativa del ensayo deben seguir protocolos estandarizados. Esto es especialmente relevante si pretendemos conseguir el intercambio de experiencias de un país a otro para desarrollar correlaciones genéricas.

Tabla 1: Aplicación y utilidad de los ensayos in-situ. Lunne y otros, 1997

Grupo	Ensayo	Parámetros del suelo												Tipo de Roca o Suelo							
		Tipo de suelo	Estratigrafía	u	* ϕ'	Su	I _D	m _v	c _v	k	G ₀	σ_h	OCR	σ - ϵ	Roca dura	Roca blanda	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Fango
Penetrómetros	Dinámico	C	B	-	C	C	C	-	-	-	C	-	C	-	-	C	B	A	B	B	B
	Mecánico	A	A/B	-	C	C	B	C-	-	-	C	C	C	-	-	C	C	A	A	A	A
	Eléctrico (CPT)	B	A	-	C	B	A/B	C	-	-	B	B/C	B	-	-	C	C	A	A	A	A
	Piezocono (CPTU)	A	A	A	B	B	A/B	B	AB	B	B	B/C	B	C	-	C	-	A	A	A	A
	Sísmico (SCPT/SCPTU)	A	A	A	B	A/B	A/B	B	AB	B	A	B	B	B	-	C	-	A	A	A	A
	Dilatómetro plano (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B	C	C	C	-	A	A	A	A
	Estándar (SPT)	A	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	C	-	-	C	B	A	A	A	A
	Sonda de resistividad	B	B	-	B	C	A	C	-	-	-	-	-	-	-	C	-	A	A	A	A
Presiómetros	Pre-sondeo (PBP)	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C	C	A	A	B	B	B	A	B
	Auto-sondeo (SBP)	B	B	A ¹	B	B	B	B	A ¹	B	A ²	A/B	B	AB ²	-	B	-	B	B	A	B
	Pleno desplazamiento (FDP)	B	B	-	C	B	C	C	C	-	A ²	C	C	C	-	C	-	B	B	A	A
Otros	Molinete (FVT)	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	-	B/C	B	-	-	-	-	-	A	B
	Placa de carga	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	B	A	B	B	A	A	A
	Placa helicoidal (screw)	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	-	-	-	-	A	A	A	A
	Permeabilidad en sondeo	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-	A	A	A	A	A	A	B
	Fracturación hidráulica	-	-	B	-	-	-	-	C	C	-	B	-	-	B	B	-	-	C	A	C
	Métodos geofísicos	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	B	-	A	A	A	A	A	A	A

Aplicabilidad: A = alta, B = moderada, C = baja -- no aplicable

* ϕ' = dependerá del tipo de suelo; ¹ = sólo cuando el sensor de presión intersticial esté presente; ² = sólo cuando el sensor de desplazamiento esté presente.

u = presión intersticial estática in-situ; ϕ' = ángulo de rozamiento interno efectivo; s_u = resistencia al corte en condiciones no drenadas; m_v = módulo de deformación; c_v = coeficiente de consolidación; k = coeficiente de permeabilidad; G₀ = módulo de corte; OCR = razón de sobreconsolidación; σ - ϵ = relación tensión- deformación; I_D = índice de densidad

En el caso de los análisis CPT, por ejemplo, se ha constatado el efecto que conlleva la lectura de la presión intersticial en las mediciones de la resistencia del cono, lo que ha permitido una mejor consistencia de resultados entre distintos equipos así como la reducción de la dispersión en las correlaciones establecidas. En los ensayos SPT hemos observado a lo largo de los años como los resultados presentan una dispersión significativa debida, no sólo de la sencillez del ensayo y de la influencia del operador, sino principalmente a las variaciones en la configuración de los equipos y, en particular, al suministro de energía. De acuerdo a la nueva normativa CEN/ISO, para el ensayo SPT se requiere el conocimiento de la energía real que suministra el equipo y no meramente un valor teórico.

2 COMO CONSEGUIR EL PLENO POTENCIAL DE LOS ENSAYOS IN SITU

¿Cómo podemos mejorar la situación y obtener el mejor rendimiento de los ensayos existentes sin desarrollar otros nuevos?

- En primer lugar, el técnico que planifica una campaña de caracterización del terreno siempre debería considerar los ensayos *in situ*.
- Este técnico debería tener, como mínimo, un conocimiento básico de los diferentes tipos de ensayos así como de sus ventajas y desventajas o limitaciones.
- Debería ser capaz de seleccionar el tipo de ensayo apropiado o combinación de ellos para una situación concreta y, una vez tomada la decisión, ser capaz de designar el equipo y el procedimiento correcto para conseguir el resultado deseado. Es necesaria la existencia de estándares para asegurar que los ensayos se llevan a cabo de forma consistente. Para poder confiar en los resultados, por otro lado, es necesario que siempre exista una forma de comprobar la calidad de los valores obtenidos.
- Debería considerar también la posibilidad de que, más adelante, sea necesaria información adicional por razones tales como un cambio de diseño, por ejemplo. Es posible que, por un ligero coste adicional, se puedan obtener esos datos al mismo tiempo sin incurrir en gastos de nuevas movilizaciones, más adelante.

Cada vez con mayor frecuencia se observa que en algunos países (y en los estándares CEN e ISO que están actualmente en preparación o ya preparados) como las instrucciones para los procedimientos de ensayo intentan guiar al técnico indicando, por ejemplo, varios niveles de exactitud para los ensayos CPT en base al tipo de terreno y a la utilización que se va a hacer de los datos (perfil estratigráfico o estimación de parámetros geotécnicos). Se debería fomentar, además, la acreditación en ensayos *in situ*. La tendencia actual de reducción de costes y mala ejecución debería ser firmemente rechazada incluso cuando esto implique ligeros costes adicionales.

Los ensayos *in situ* proporcionan poderosas herramientas para obtener una gran cantidad de valiosa información si forman parte de una campaña de investigación bien planificada, si están bien especificados y si son utilizados correctamente. No deberían ser considerados sin tener en cuenta el resultado final y la fiabilidad de los datos obtenidos. La experiencia pasada debe servir para asegurar que, a medida que se desarrollan nuevos ensayos *in situ*, éstos se validen con bases de datos fiables y que las instrucciones y los procedimientos permitan desarrollar su pleno potencial.

No es necesario que todos los profesionales de la Geotecnia sean expertos en ensayos *in situ* pero un buen conocimiento de los métodos unido a unas mejores especificaciones técnicas y mejores instrucciones podrán garantizar que el usuario saque el mejor partido de los resultados.

Seleccionando la configuración adecuada, los ensayos *in situ* presentan cuatro ventajas claras sobre la combinación tradicional de sondeos y toma de muestras:

1. Datos continuos o prácticamente continuos.
2. Datos repetibles y fiables.
3. Rapidez de ejecución y menores plazos de finalización de una campaña de investigación.
4. Reducción de costes.

Hay que recordar también que su utilidad no se restringe a la determinación del tipo de terreno, definición de la estratigrafía y estimación de los parámetros geotécnicos clásicos. Existen numerosos ejemplos de su utilización en aplicaciones directas de cálculo en las que los parámetros específicos de un cierto tipo de ensayo se pueden utilizar directamente en los procedimientos de diseño.

3 ESTÁNDARES INTERNACIONALES Y EUROPEOS

La estandarización internacional es de primordial importancia para armonizar los requisitos de calidad para los equipos así como las metodologías para la obtención de resultados comparables. La Tabla 3 resume brevemente los Comités Técnicos relacionados con las estandarizaciones CEN e ISO y con los estándares y especificaciones técnicas (TS) que están redactando (Devincenzi y otros, 2004).

Eitner y otros (2004) describen en detalle la estructura general de los comités que pertenecen a la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) y al Comité Europeo para la

Estandarización (CEN) y sus esfuerzos para preparar estándares comunes sobre los equipos y métodos utilizados para la identificación de suelos y rocas, sondeos, toma de muestras, ensayos sobre el terreno y análisis en el laboratorio, así como mediciones del nivel freático. Stölben y otros (2004), por otro lado, presentan los estándares relacionados con la toma de muestras en sondeo y mediciones del nivel freático. La Tabla 2 resume la estructura de los comités y estándares, algunos de los cuales ya han sido publicados (www.iso.org).

La participación de España (y Portugal) en este proceso ha sido relativamente escasa, fuera de proporción con la importancia de la industria de la construcción en nuestro país y con la intensa participación en otros ámbitos normativos adyacentes (eurocódigos estructurales p.e.).

4 ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)

Hoy día resulta posible medir mediante sensores la energía liberada en el momento del impacto de la maza. Los procedimientos actuales, de hecho, recogen esta especificación (EN ISO 22476, parte 3 en Tabla 2). Debe tenerse presente, no obstante, que las numerosísimas correlaciones empíricas con parámetros geomecánicos, están realizadas en base a los ensayos realizados manualmente con una cuerda y un cabestrante.

4.1 Instrumentación del ensayo SPT: Rendimiento Energético

La energía transmitida al varillaje por el golpeo del martillo SPT depende en gran medida de varios aspectos tales como el tipo de martillo, la longitud del varillaje, la frecuencia de golpeo y los métodos de cálculo de energía. La Tabla 3 resume nuevas aportaciones utilizando casi la misma instrumentación que consiste en galgas extensométricas y acelerómetros con un sistema de adquisición de datos para medir la fuerza y la velocidad con el fin de valorar la energía máxima transmitida al varillaje. La configuración típica de un ensayo instrumentado se muestra en la Figura 1.

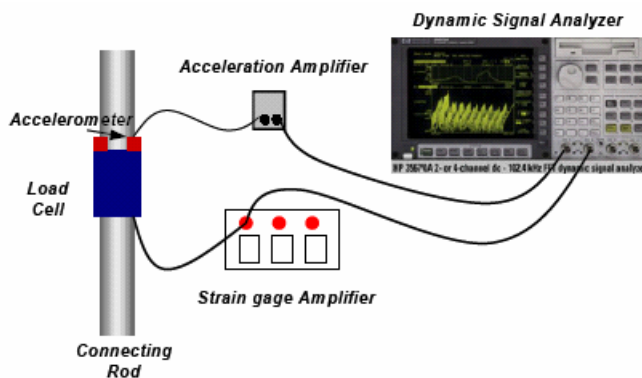


Figura 1: Configuración del dispositivo de ensayo SPT instrumentado. Dong-Soo Kim y otros (2004)

Odebrecht y otros (2004), observan que la energía potencial teórica máxima PE_{h+r} transmitida al terreno debería expresarse como una función de la energía potencial nominal ($E^* = 0,76.M_h.g = 0,76m*63.5kg*9,801m/s = 474J$), la penetración del propio toma-muestras y el peso tanto de la maza como del varillaje, es decir:

$$PE_{h+r}^* = (0,76 + \Delta\rho)M_h g + \Delta\rho M_r g \quad (1)$$

donde M_h es el peso del martillo, M_r el peso del varillaje, g la aceleración de la gravedad y $\Delta\rho$ la penetración del toma-muestras en el terreno.

Tabla 2: Estructura de la organización de estandarización ISO y CEN para caracterización in situ, compilado de Eitner y otros (2004) y Stölben y otros (2004).

Comités Técnicos (TC) y subcomités (SC)	Objetivos	Estándares
ISO/TC 182/SC 1 “Geotechnical Investigation and Testing”	Prepara los estándares en identificación, descripción y clasificación de suelos y rocas. “Espejo” internacional de CEN/TC 341.	ISO 14688-1 a 3 “Investigación Geotécnica y Ensayos – identificación, descripción y clasificación de suelos” Parte 1ª: Identificación y descripción. 2002. Parte 2ª: Principios de clasificación. 2003. Parte 3ª: Intercambio electrónico de datos de identificación y descripción del suelo. Instrucciones: TS. En desarrollo ISO 14689-1 a 2 “Investigación Geotécnica y Ensayos – Identificación y clasificación de rocas” Parte 1ª: Identificación y descripción. 2003. Parte 2ª: Intercambio electrónico de datos de identificación y descripción de rocas. Instrucciones: (TS): En desarrollo.
CEN/TC 341 “Geotechnical Investigation and Testing”	Estandarización de equipos y métodos utilizados en los sondeos, toma de muestras, ensayos de campo y análisis en laboratorio de rocas y suelos así como mediciones del nivel freático. En cooperación con ISO/TC 182/SC 1. Cinco grupos de trabajo: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sondeos, métodos de toma de muestras y mediciones del nivel freático. Alemania (DIN). Stölben y otros (2004). ▪ Ensayos de penetración con conos y piezoconos. Holanda (NEN) ▪ Penetraciones dinámicas y S.P.T. Alemania (DIN). ▪ Ensayos de estructuras geotécnicas. Francia (AFNOR). ▪ Ensayos de Deformación en sondeos. Francia (AFNOR). 	Diversos estándares sobre ensayos de campo, actualmente en preparación que serán publicados: EN ISO 22475-1 a 3 “Investigación Geotécnica y Ensayos – Toma de muestras en sondeos y calicatas y mediciones del nivel freático” Parte 1ª: Principios técnicos de ejecución. Parte 2ª: Criterios técnicos para calificación de empresas y personal. Parte 3ª: Valoración de conformidad de empresas y personal. EN ISO 22476 1 a 16 “Investigación Geotécnica y Ensayos – Ensayos en campo” Parte 1ª: Ensayos eléctricos de penetración con conos y piezoconos. Parte 2ª: Penetraciones dinámicas. Parte 3ª: Ensayo de penetración estándar. Parte 4ª: Ensayo con presiómetro Ménard. Parte 5ª: Ensayo con dilatómetro flexible. Parte 6ª: Ensayo con presiómetro auto-perforante. Parte 7ª: Ensayo de gato en sondeos (Goodman Jack). Parte 8ª: Ensayo con presiómetro de desplazamiento completo (hinca). Parte 9ª: Ensayo de Molinete en campo (vanetest). Parte 10ª: weight sounding test (TS). Parte 11ª: Ensayo con dilatómetro plano (TS). Parte 12ª: Ensayos de permeabilidad Lefranc. Parte 13ª: Ensayos de presión de agua. Parte 14ª: Ensayos de bombeo. Parte 15ª: Ensayo mecánico de penetración con cono. Parte 16ª: Ensayo con placa de carga.
CEN/TC 250/SC 7 “Geotechnical Design”	Eurocode 7, el código básico para el diseño geotécnico. Los resultados de los ensayos se utilizan para la valoración e interpretación.	ENV 1997-1 (Pre-estándar europeo), disponible en breve con la denominación EN ENV 1997-2, diseño apoyado por análisis en laboratorio ENV 1997-3, diseño apoyado por ensayos <i>in situ</i>

Tabla 3: Nuevas aportaciones a la instrumentación del ensayo SPT. Devincenzi y otros, 2004.

Autor	Odebrecht, Schnaid, Rocha y Bernardes (2004)	Cavalcante, Danziger y Danziger (2004)	Dong-Soo Kim, Won-Seok Seo y Eun Scok Bang (2004)
Tipo de instrumentación	Célula de carga con 4 galgas extensométricas sensibles a deformación axial únicamente. 2 acelerómetros de diferente rango.	Galgas extensométricas y acelerómetros piezoeléctricos	8 galgas extensométricas y dos acelerómetros
Parámetros analizados	Fuerza y aceleración (integrada a velocidades)	Fuerza y velocidad	Fuerza y velocidad
Emplazamiento de los sensores	Varios: Justo debajo del yunque. Por encima del toma-muestras. Unido a la varilla, posición media entre el yunque y la sonda.	0,5 m por debajo del yunque, algunos cerca de la sonda	Justo debajo del yunque
Método de análisis	FV	FV	FV y V^2 comparados
Tipo de maza o martillo	“Donut” operado manualmente con cuerda	“Donut” operado manualmente con cuerda	4 tipos comparados <ul style="list-style-type: none"> • “donut” con dispositivo hidráulico (WD). • de cadena, automático (CA). • manual, de seguridad, con cuerda (RS). • manual, “donut” con cuerda (RD)
Energía teórica	478 J	478 J	474 J
Tipo de suelo ensayado	Granular con diferente DR%	Diferentes tipos	10 - 15 m de suelo residual
Golpeo N _{spt}		10 - 60	1 - 60
Resultados y nuevas contribuciones	Instrumentación en profundidad, por encima de la sonda. La energía transmitida a la cuchara se ve influenciada tanto por la profundidad del ensayo como por la penetración en si. Nuevo concepto y definición de eficacia representados por 3 coeficientes empíricos, η_1 , η_2 , η_3 , donde η_1 es una función de la longitud de la varilla e inversamente proporcional a la longitud de la misma.	La energía transmitida a la varilla es 83% de la energía nominal de 474 J (ISSMFE, 1989). Estudios anteriores en Brasil establecieron una eficacia de $\approx 70\%$ (razón de energía) Valores de N _{spt} con diferentes comportamientos: 1-6, 7-16, 18-60. Correlaciones N _{corregido} /N para estos valores	Efectos de la longitud de la varilla y de la velocidad de golpeo. Ratios de energía para cada tipo de maza. Ratios de energía del método FV más elevados que F^2 uno: $\approx 70\%$ y $\approx 60\%$ respectivamente para martillos CA. La eficacia depende del tipo de maza, longitud de la varilla, frecuencia de golpeo y método de cálculo de la energía.

La primera parte de la ecuación (1) representa la energía potencial del martillo (nominal + adicional) y la segunda, la energía potencial del varillaje. En otras palabras, tanto la longitud del varillaje como la penetración de la cuchara contribuyen a la energía teórica transmitida al toma-muestras. Esto cobra especial importancia en terrenos sueltos en los cuales el factor Δp es elevado. Este factor es independiente de la longitud del varillaje.

Durante el proceso de penetración se producen pérdidas de energía. El ratio de energía ER_r o eficacia se define tradicionalmente como la proporción entre la energía máxima real transmitida E_r (i.e. instrumentación) y la energía potencial nominal E^* :

$$ER_r = \frac{E_r}{E^*} \quad (2)$$

En general se acepta la corrección del resultado N_{spt} a un valor de energía de referencia del 60% de la energía nominal potencial del martillo SPT utilizando factores estándar de corrección (Seed y otros, 1985; Skempton, 1986; ISSMFE 1989). Estas correcciones suponen un suministro de energía teórico. Sin embargo, la utilización de ensayos instrumentados permite el ajuste correcto del valor medido N_{spt} al valor con una razón de energía de referencia tal como N_{60} .

Odebrecht y otros proponen un nuevo concepto de eficacia. Estos autores presentan resultados experimentales de la medición de energía efectiva en ambos extremos del varillaje durante el impacto del martillo en ensayos SPT llevados a cabo en cámara de calibración. Su conclusión es que la eficacia depende de los tres coeficientes, η_1 , η_2 , η_3 utilizando:

$$PE_{h+r} = \eta_3 [\eta_1 (0,76 + \Delta\rho) M_h g + \eta_2 \Delta\rho M_r g] \quad (3)$$

Donde η_1 , la eficacia del martillo, se obtiene de la medición del extremo superior de la varilla, η_2 puede considerarse como la unidad y η_3 , la eficacia de la energía, se expresa como una función de la longitud del varillaje l , siendo inversamente proporcional a ellos:

$$\eta_3 = 1 - 0,0042l \quad (4)$$

4.2 *Ensayo SPT-T: procedimiento y práctica*

Peixoto y otros (2004) presentan un estado del arte del ensayo SPT-T, es decir del ensayo SPT con medida posterior del torque necesario para girar la cuchara o toma muestras. Esta variante del ensayo SPT, propuesta por Ranzini (1988) está muy extendida en Brasil y resulta una especie de *componente estático* de un *ensayo dinámico*. El torque se utiliza empíricamente para calcular la fricción lateral de pilotes – principalmente para pilotes hincados, donde el ratio T/N_{spt} es un índice interesante para finalidades prácticas a pesar de que sean necesarias correlaciones locales específicas.

En la Tabla 4 se revisan las sugerencias generales propuestas por estos autores para el procedimiento de este ensayo; la Figura 2 muestra un ejemplo de un ensayo con un equipo y un sistema electrónico de adquisición de datos. Las oscilaciones en las curvas son debidas a movimientos laterales del varillaje.

Estos autores revisan y comparan, además, cuatro métodos para predecir la capacidad de carga de los pilotes basándose en SPT-T (Decourt, 1996; Alonso 1996a, 1996b; Carvalho y otros, 1998 y Peixoto, 2001).

Tabla 4 procedimiento general para el ensayo SPT-T según Peixoto y otros, 2004.

Tema	Recomendaciones	Notas
Procedimiento	Después de la penetración, se coloca un adaptador en el yunque para que el torquímetro lo gire. Es necesario un centrador para evitar movimientos laterales del varillaje.	Debe utilizarse un Torquímetro con capacidad adecuada. Torquímetro horizontal durante la rotación. Alineación del varillaje durante la aplicación del torque esencial.
Mediciones	Torque máximo y residual deben ser registrados.	El torquímetro mecánico proporciona suficiente información. Lecturas inmediatamente después de usar el toma-muestras
Velocidad de rotación	5vueltas/minuto	

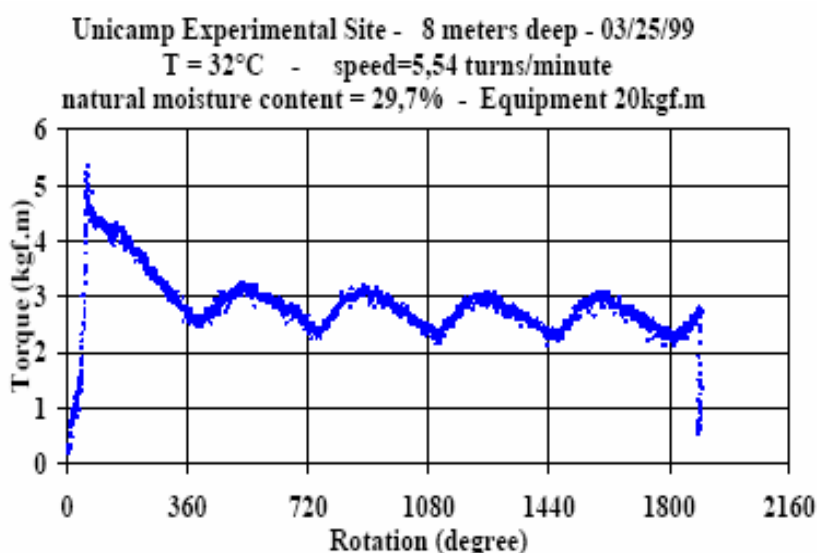


Figura 2: Gráfico SPT-T según Peixoto y otros (2004)

5. ENSAYOS CPT y CPTU

5.1 CPT Mecánico

A pesar de que actualmente el CPT(u) eléctrico se utiliza de forma generalizada –y recomendada por los estándares actuales- todavía se utilizan equipos mecánicos en algunos países. Whenham y otros (2004) presentan un análisis comparativo en suelos de Bélgica en los que establecen las razones $q_{c \text{ mec}}/q_{c \text{ elec}}$ para diferentes equipos mecánicos (cono con manguito de fricción lateral y cono simple) y diferentes tipos de suelo. Es necesario ser prudente con la extrapolación a otros conos eléctricos y tipos de suelo ya que se utiliza q_c y no q_t , es decir la resistencia a la penetración del cono corregida por el efecto de la presión de poro, por lo que los resultados obtenidos del cono eléctrico en arcillas serán específicos para ese tipo de cono ya que no presentan corrección del efecto de la presión intersticial (Lunne y otros 1997).

5.2 Interpretación del perfil estratigráfico del terreno

Los análisis geoestadísticos son, a menudo, empleados para el estudio de la estratigrafía del terreno utilizando los parámetros leídos (o derivados) del ensayo CPTu ya que este ensayo permite obtener una gran cantidad de datos objetivos –normalmente a intervalos de 1 centímetro.

Balby y Saboya (2004) presentan el estudio de un caso práctico utilizando el método estadístico para identificar grupos de suelos en suelos cuaternarios basado sobre los criterios de similitud en base Q y B_q normalizados propuestos por Hegazy y Mayne (2003), siendo:

$$Q = \frac{q_t - \sigma_v}{\sigma_{v0}'} \quad (5)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_1}{q_t - \sigma_{v0}'} = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}'} \quad (6)$$

Donde q_t es la resistencia por punta del cono corregida, u_2 es la presión de poro dinámica, u_1 es la presión hidrostática, σ_v es la tensión vertical total y σ_{v0}' es la tensión efectiva vertical.

Este tipo de análisis presenta una mejor capacidad para detectar cambios no apreciables por observación directa o por los ábacos de clasificación utilizados habitualmente y tiene cuatro ventajas importantes:

1. Organiza los suelos por similitud
2. Localiza los límites entre capas
3. Identifica lentejones y suelos mixtos
4. Identifica errores sistemáticos como cambios de varillaje o pausas casuales durante el ensayo.

Otra aplicación interesante del CPT utilizado para estudiar la estratigrafía de arcillas residuales expansivas es presentada por Fytius y Bates (2004). De hecho, los suelos residuales tienen un comportamiento característico que no es todavía bien comprendido. Sin embargo, su caracterización es, a menudo, meramente básica. Los datos necesarios para el diseño de los cimientos en suelos expansivos son:

1. Espesor y posición de las capas
2. Potencial de hinchamiento
3. Profundidad de succión y grietas (capa activa)
4. Magnitud de la succión.

En el planteamiento que proponen estos autores, los resultados del ensayo CPT se utilizan para proporcionar estimaciones directas o indirectas de la posición y espesor de las capas de arcilla expansiva, su profundidad y el grado de meteorización de la roca subyacente.

5.3 Sedimentología

La utilidad del ensayo CPT/U para obtener perfiles estratigráficos es bien conocida por todos los profesionales de la Geotecnia. Los estudios recientes han demostrado también que el CPT/U es una herramienta excelente para estudios sedimentológicos. La gran cantidad de datos obtenidos y su alta calidad, permite la construcción de robustos modelos 3D mediante algoritmos, tales como el *kriging*, *minimum tension gridding* (MTG), etc.

Estas técnicas se han utilizado con éxito para el estudio de la sedimentología de suelos deltaicos, permitiendo distinguir la geometría de las distintas facies del cuerpo sedimentario e, incluso, la comprensión de cómo tuvieron lugar cambios climáticos y los consiguientes cambios del nivel del mar durante el Cuaternario reciente (Amorosi y Marchi, 1999; Devincenzi y otros, 2003, 2004, Colàs y otros, 2005).

La Figura 3 presenta el resultado de un CPTU típico del delta del río Llobregat, cerca de su desembocadura, en la ciudad de Barcelona. En la misma se grafican el levantamiento de un sondeo con recuperación de testigo y los valores de la resistencia por punta corregida q_T , la presión intersticial u_h , la presión de poro dinámica u , la razón de fricción $FR\%$, el valor de B_q y el valor del parámetro K_D de un dilatómetro plano de Marchetti realizado junto al piezocono. Los resultados representan claramente la secuencia estratigráfica general del edificio deltaico: arenas superiores y gravas inferiores, conocidas como los acuíferos superior e inferior, respectivamente, con una capa intermedia de limos arcillosos, con pasadas arenosas, más frecuentes en su tramo superior. Toda la secuencia es cubierta por sedimentos finos (y blandos) de la llanura de inundación del río. Ventayol (2003) y Gens y Lloret (2003) publicaron también perfiles estratigráficos de este cuerpo sedimentario utilizando datos de ensayos CPTU.

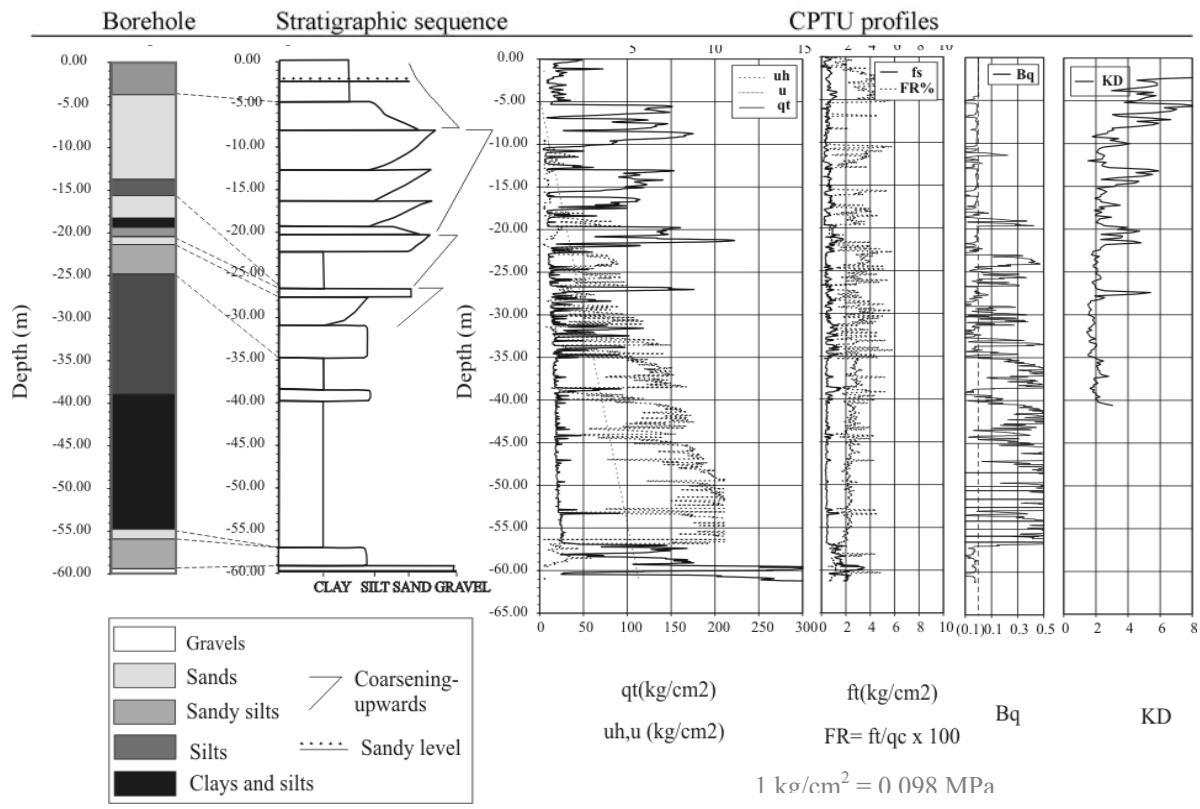


Figura 3: Ejemplo de registro de sondeo correlacionado con un ensayo CPTU cerca de la desembocadura del río Llobregat, Barcelona. Devincenzi y otros, 2004

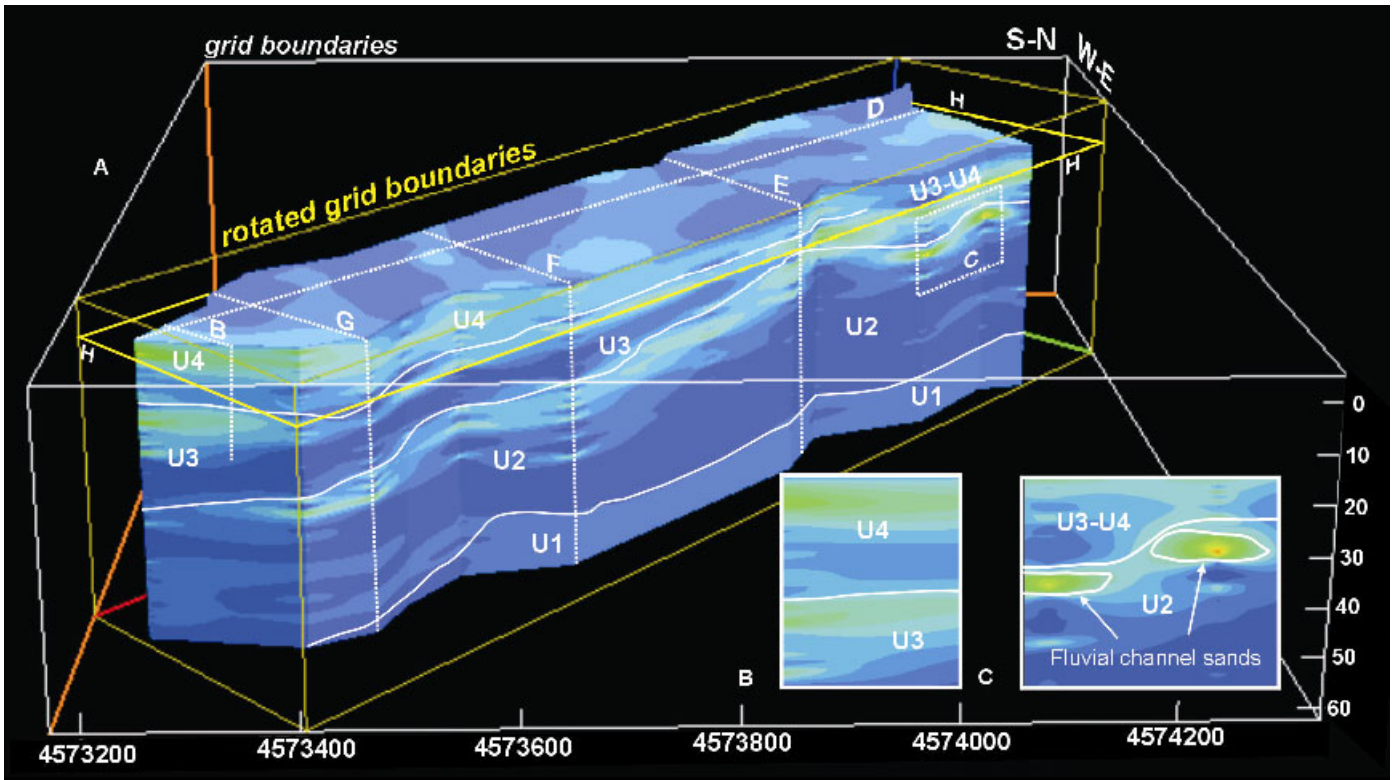


Figura 4: Distribución espacial de los valores de q_c utilizando el algoritmo MTG. Colàs y otros, 2004.

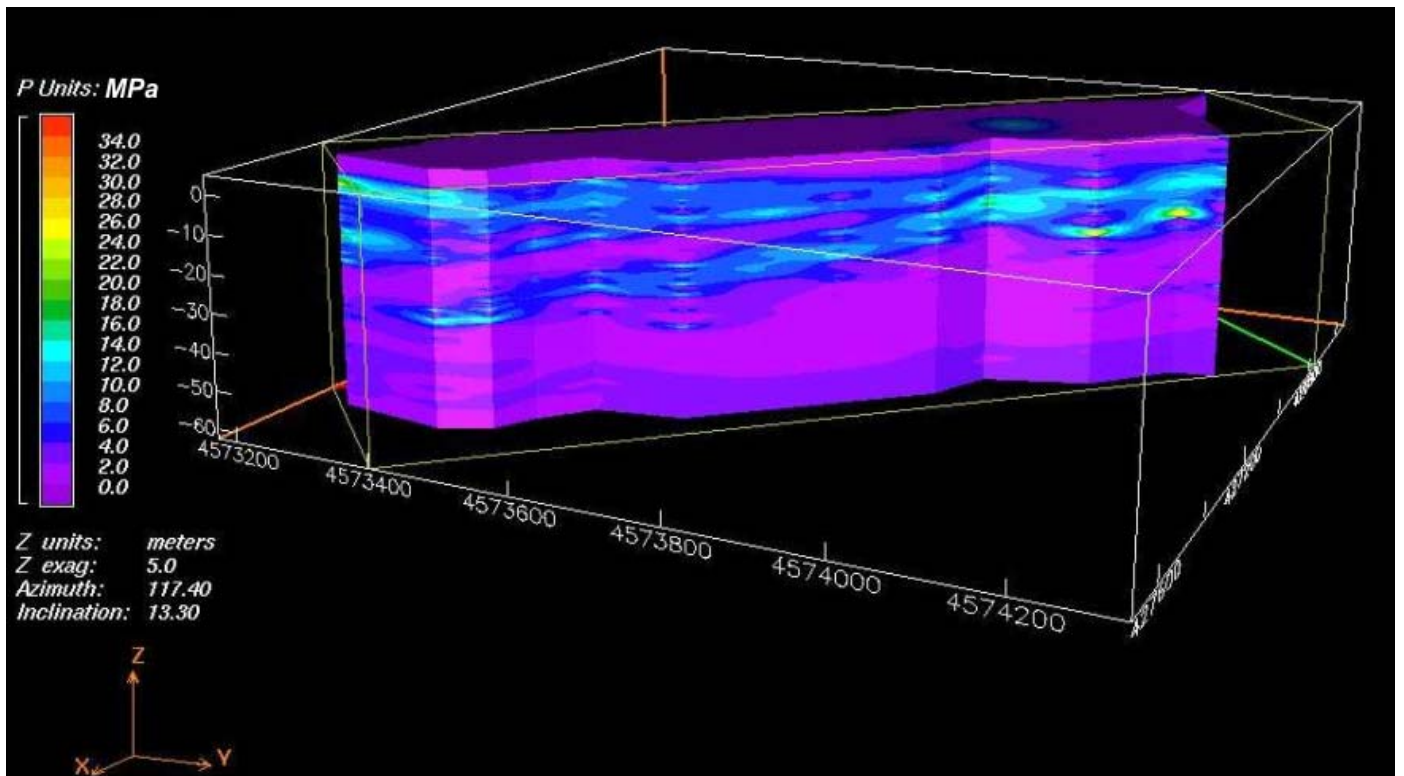


Figura 5: Modelo 3D del mismo sector de la Figura 4 utilizando técnica de kriging. Devincenzi y otros, 2004

En la Figuras 4 y 5 se presentan dos ejemplos (utilizando distintas técnicas de interpolación) de la representación 3D de un sector de 1,2 km de extensión longitudinal, muy cerca de la desembocadura del río Llobregat, en su margen derecha, donde actualmente se ubica la E.D.A.R. Baix Llobregat y para cuyo proyecto de precarga fueron realizados los ensayos.

Como puede observarse, los resultados de ambos modelos son similares y ambas técnicas son suficientemente adecuadas para este tipo de análisis.

5.4 Valoración de la resistencia al corte en condiciones no drenadas y el grado de sobreconsolidación OCR

La utilización del ensayo CPT/CPTU para la estimación de la resistencia al corte de suelos cohesivos es otro de los usos y aportaciones importantes de este ensayo. Trevor y Mayne (2004) presentan una modificación del método de Mayne (1991) basado en la teoría de la expansión de una cavidad y en los conceptos de estado crítico para predecir tanto la razón de consolidación (OCR) como la resistencia al corte en condiciones no drenadas en arcillas marinas a partir de los ensayos CPTU. Este es uno de los varios métodos publicados para dichas predicciones.

Los valores previstos de s_u y OCR para arcillas marinas utilizando el método Mayne (1991) son más elevados que los valores de referencia obtenidos de ensayos triaxiales, aunque los perfiles CPTU interpretados y los perfiles de los análisis de laboratorio muestran tendencias similares.

Los factores de corrección para mejorar el método de interpretación de datos de piezocono que incorporan el parámetro de estado crítico (M) han sido obtenidos por Trevor (2001) en base a la evaluación estadística y son:

$$\xi_{OCR} = 0,029 + 0,409M \quad (7)$$

y

$$\xi_{SU} = 0,56 + 0,095M \quad (8)$$

Las ecuaciones modificadas que pueden utilizarse para predecir OCR y s_u en estos suelos a partir de los ensayos CPTU por este método son entonces:

$$OCR = 2\xi_{OCR} \left[\frac{1}{1,95M + 1} \left(\frac{q_t - u_2}{\sigma'_{v0}} \right) \right]^{1,33} \quad (9)$$

$$s_u = \frac{M}{2} \xi_{su} \left(\frac{q_t - u_2}{1,9M + 1} \right) \quad (10)$$

Estas simplificaciones implican una sensibilidad limitada de M para la corrección de s_u , el rango de valores es 0,48-0,43 cuando ϕ' varía de 20 a 35°, mientras que para el OCR la variación del rango más significativa es de 0,35-0,61. Powell (2001) encontró una correlación satisfactoria con OCR utilizando la ecuación original (es decir, con un factor de corrección de 1), pero la Figura 6 muestra los resultados de un depósito glaciario (Powell y Butcher, 2002) con ambas correlaciones. Se puede observar que la corrección mejora la predicción del perfil de OCR pero todavía es demasiado elevado. Como vemos, la utilización de un método simplificado, normalizado, de resistencia del cono produce buenos resultados. Trevor y Mayne (2004) recomendaron que se re-evaluaran los factores de corrección propuestos para otros tipos de suelos, lo que será importante para entender cuándo aplicarlos.

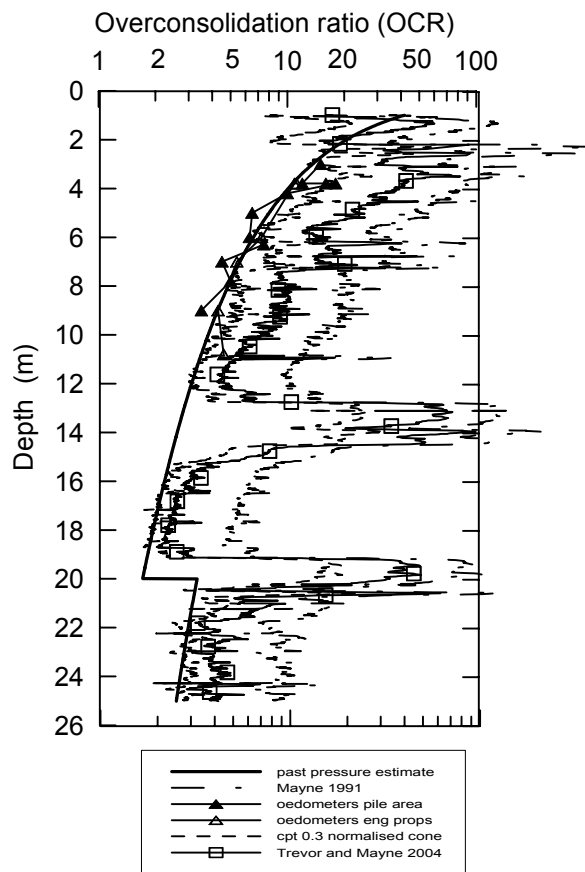


Figura 6. Perfil OCR para un depósito glacial utilizando el método Trevor y Mayne.

6. ENSAYO DE MOLINETE: EFECTO DEL TAMAÑO DE LA PALETA

Los resultados de los ensayos molinete (vane test) se ven afectados por varios factores tales como el la alteración del suelo durante la inserción, el efecto de la espera antes de iniciar el ensayo, la forma de la superficie de ruptura, las influencias debidas al grado de rotación, la longitud del eje de la paleta que sobresale del revestimiento, el número de paletas y la relación entre la altura y el diámetro de la paleta, entre otros aspectos.

Ånbergh et al (2004) han estudiado la influencia del tamaño de la paleta en los resultados del ensayo molinete –un hecho importante que, de momento, no tiene efecto en los estándares- y realiza un análisis comparativo de los diferentes equipos disponibles en el mercado hoy en día. También detallan en una lista los diferentes factores que afectan los resultados.

Los resultados de la investigación muestran que en los ensayos en arcillas, cuanto mayor sea la paleta, más elevada es la resistencia al corte obtenida siempre y cuando el grosor de los ejes y de las paletas sea el mismo. La paleta pequeña ($55 \times 110\text{mm}^2$) obtuvo una resistencia al corte equivalente al 85% de la obtenida con una paleta normal ($65 \times 130\text{mm}^2$). La Figura 7 muestra la comparación. Este hecho podría ser debido a que la influencia relativa de la alteración durante la inserción del instrumento en el terreno aumenta a medida que disminuye el tamaño de la paleta.

De acuerdo con estos autores, este efecto queda contrareestado en suelos orgánicos debido al contenido en fibra, lo que puede provocar el efecto contrario.

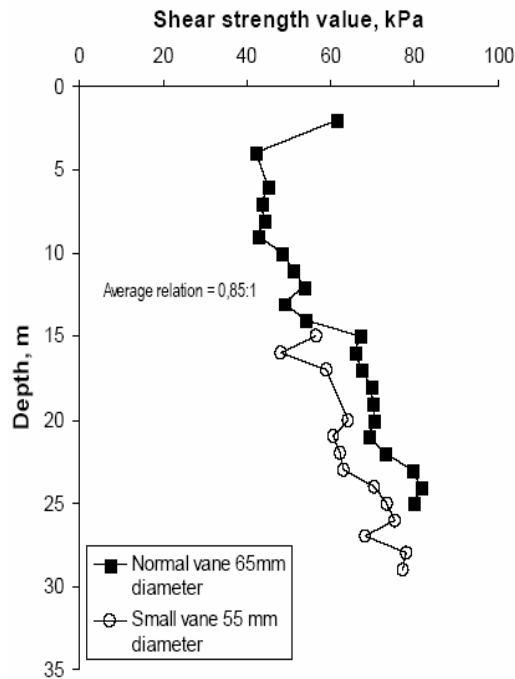


Figura 7: ejemplo de los resultados de ensayos molinete paralelos llevados a cabo en arcillas con paletas de distintos tamaños. Ánbergh y otros, 2004

7. COMBINACIÓN DE ENSAYOS CPT/U y DMT

El ensayo dilatométrico de Marchetti (DMT) es un ensayo geotécnico *in situ* muy útil pero poco extendido en España, no así en Portugal, donde su uso es más frecuente. Los principios del ensayo fueron publicados por Marchetti (1980, 1997). Ejemplos de aplicaciones en España así como una descripción de la metodología e interpretación fueron presentados por Devincenzi y Canicio (2001, a, b) y Devincenzi y Marchetti (2002).

Tanto los ensayos CPT/CPTU como el DMT consisten, esencialmente, en hacer penetrar mediante empuje un útil instrumentado en el suelo. De esto se derivan algunas semejanzas importantes, tanto de equipo como de resultados. En efecto, en cuanto al equipo son bastantes los elementos comunes a ambos instrumentos, p.e. el varillaje y el elemento de reacción –típicamente un camión- que facilita la penetración del instrumento en el suelo. Y en cuanto a los resultados, ambos ensayos producen un perfil vertical de datos del terreno con una densidad de muestreo mucho más alta que la habitual en sondeos.

Estas analogías hacen cada vez más frecuente el uso combinado de ambos ensayos en la caracterización geológica y geotécnica del terreno. Su empleo conjunto se justifica, además, por las ventajas que ofrece su combinación. Estas ventajas se derivan de tres posibilidades distintas asociadas a la combinación de ensayos, a saber

1. La obtención de dos estimaciones independientes de algunos parámetros geotécnicos, aumentando así la fiabilidad del valor que finalmente se seleccione.
2. La estimación de parámetros geotécnicos complementarios con uno y otro instrumento
3. La combinación de medidas de un instrumento y otro, para así obtener estimaciones de parámetros geotécnicos que no podrían obtenerse a partir de las medidas de un único instrumento.

La primera posibilidad es la más obvia. CPT/U y DMT ofrecen, por ejemplo, estimaciones independientes del perfil estratigráfico, de la resistencia a corte no drenado en suelos finos, del ángulo de rozamiento en terrenos granulares, etc. Las posibilidades segunda y tercera merecen más atención, y se ejemplifican en lo que sigue.

7.1 Obtención de parámetros complementarios. Ejemplo: cálculos de consolidación

La estimación de asientos en suelos con finos es uno de los problemas clásicos de la geotecnia. El problema tiene dos aspectos, por un lado es necesario estimar la magnitud del asiento que producirán determinadas cargas, por otro lado su desarrollo temporal. La teoría de la consolidación unidimensional de Terzaghi (p.e. Jiménez Salas y Justo, 1975, cap VI) es arma más que suficiente para obtener una estimación adecuada en la mayor parte de los casos prácticos. La aplicación de esta teoría requiere tres tipos de información: una estimación del perfil de cálculo y, en particular, del espesor de las capas que consolidan, y, para cada capa, su coeficiente de consolidación y un módulo de deformación.

Tradicionalmente, la información necesaria se obtenía mediante un reconocimiento con sondeos en los que se tomaban muestras para realizar con las mismas ensayos edométricos. Este enfoque presenta algunos problemas: es a veces difícil tomar muestras representativas y en número suficiente, los ensayos edométricos requieren cierto esmero y un tiempo no despreciable para su ejecución.

Mediante la combinación de ensayos CPTU y DMT se puede afrontar el problema de forma distinta. Del ensayo DMT puede estimarse un módulo, M , equivalente al edométrico. Mediante el ensayo CPTU puede estimarse un coeficiente de consolidación y , lo que tiene mayor trascendencia para el cálculo, el espesor de las capas que consolidan.

En un problema reciente de construcción viaria en el Delta del Llobregat se ha aplicado esta metodología para proyectar los terraplenes definitivos y las precargas (para detalles, véase Arroyo y otros, 2004; Mateos y Arroyo, 2005). En la actualidad está ya la obra avanzada y se dispone de algunos resultados de instrumentación. En los suelos naturales en los que las precargas han finalizado, estos resultados se comparan de forma excelente con las predicciones hechas por el método descrito, Figura 8 (Arroyo y Mateos, 2006).

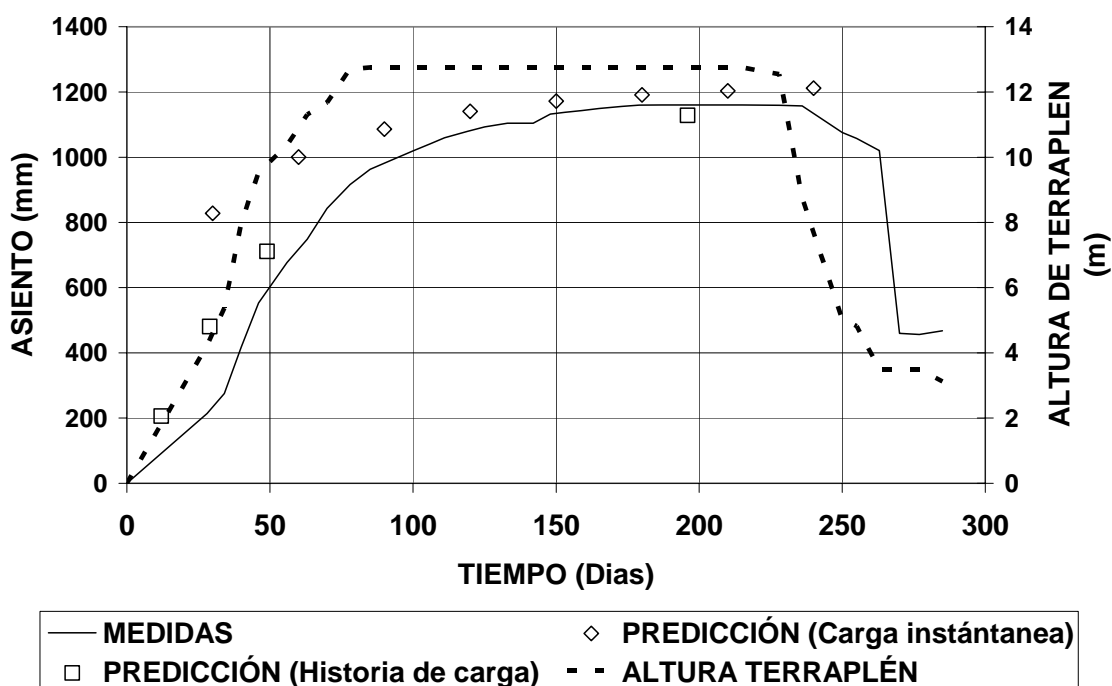


Figura 8: predicción de asientos de consolidación mediante ensayos *in situ* en suelos deltaicos (Arroyo y Mateos, 2006)

7.2 Estimación de parámetros nuevos. Ejemplo: grado de cementación o estructura del suelo

Mayne (2002) y Mayne y Liao (2004), propusieron las siguientes relaciones para suelos residuales (formados desde arenas finas limosas a limos arenosos finos):

$$E_D = 5q_t \quad (11)$$

y

$$I_D = 2 - 0,14FR\% \quad (12)$$

En donde E_D corresponde al *módulo dilatómetro* (que no se debe confundir con un módulo de deformación) e I_D al *índice de material* obtenido con el ensayo DMT, que está relacionado con el tipo de suelo, análogamente al parámetro FR% del ensayo CPT.

El mismo tema se estudió también en un programa de investigación basado en los resultados de 7 investigaciones llevadas a cabo en una región entre Porto y Braga (Portugal) con un total de 30 sondeos, 22 perfiles CPTU y 23 perfiles DMT (Cruz et al, 2004). La región se caracteriza por suelos graníticos residuales seprolíticos con una estructura floculada, desde sueltos a medianamente densos y con un tamaño de grano que varía desde limos arenosos a arenas (muy similares al depósito experimental de Mayne). Los resultados obtenidos han dado lugar a las siguientes conclusiones:

- M/q_t (en donde M es el módulo confinado calculado a partir de DMT como $M = R_M E_D$) parece tener mayor potencial que la razón E_D/q_t ya que R_M (el factor de correlación entre E_D y M) podría considerarse como un parámetro de selección del tipo de suelo. En realidad, el módulo M se calcula en base a 3 parámetros básicos del ensayo DMT, es decir, el cálculo depende del tipo de suelo (I_D) y de K_D (que parece reflejar la estructura de cementación) y además del módulo del dilatómetro E_D ; lo que es muy útil para trabajar con un mayor rango de tipos de suelo;
- M/q_t no es un valor constante sino que tiende a aumentar con la estructura de cementación de forma similar a la que propone Marchetti (1997) para diferenciar arenas NC ($M/q_c = 5 - 12$) de arenas OC ($M/q_c = 12-24$); Cruz et al (2004) encontraron dos correlaciones distintas para M/q_t en suelos residuales trabajando en condiciones “NC” y “OC” que son 6,4 y 16,8 respectivamente. Es evidente que estos valores son subdivisibles, pero es una conocida frontera en comportamientos mecánicos que puede utilizarse como referencia (Figura 9);
- Los valores generales de E_D en este estudio varían de 0,1 a 6,0 MPa, mientras que E_D/q_t presenta un intervalo de 1-20. En general, cuando E_D/q_t presenta un valor entre 5-6 representa la división entre NC – OC. Si analizamos individualmente los datos (de cada uno de los 7 depósitos experimentales) se hace evidente que la relación E_D/q_t cambia con el nivel de cementación, así como M/q_t , y los resultados varían de 2 a 7.

Se puede concluir, entonces, que las relaciones propuestas por Mayne (2002) no son constantes sino que aumentan con la resistencia debido a los efectos de la cementación. La relación M/q_t muestra un factor de correlación mayor al tener en cuenta de alguna manera la estructura de cementación (Cruz et al, 2004). En este sentido, los datos de Mayne serían una correlación local que refleja un nivel particular de estructura de cementación. La utilización de M/q_t parece tener mayor potencial que E_D/q_t ya que integra la definición numérica del tipo de suelo por medio del índice de identificación DMT (I_D).

Si consideramos la relación $I_D - FR\%$, los valores generales extraídos de Cruz y otros (2004) no son tan ajustados como los de Mayne (2002). Sin embargo, los resultados parecen converger ya que

el análisis global resulta en $1,92-0,05 \text{ FR}\%$ y cuando la intersección se fuerza a 2, en $2-0,06 \text{ FR}\%$. Por medio del análisis independiente de los valores y forzando la intersección a 2, en tres de los depósitos experimentales se observa una variación del factor dependiente $\text{FR}\%$ entre 0,06 y 0,1. En otros emplazamientos es imposible encontrar una tendencia en particular.

Los valores obtenidos de arcillas OC ligeramente cementadas en Girona (España) también concuerdan con la relación $I_D\text{-FR}\%$ propuesta por Mayne (2002) y Mayne y Liao (2004), con una variación OCR de 3 a 6 y $M/q_t \approx 25$.

Por el contrario, no se ha establecido ninguna relación entre I_D y $\text{FR}\%$ en arcillas limosas cuaternarias de pro-delta del delta del Llobregat ($\text{OCR} \approx 1.1$) tal como se aprecia en la Figura 10. Hay que remarcar, sin embargo, que los sedimentos no tienen las mismas características que aquellos estudiados por Mayne. Se deberían, pues, revisar estas correlaciones para suelos sedimentarios transportados.

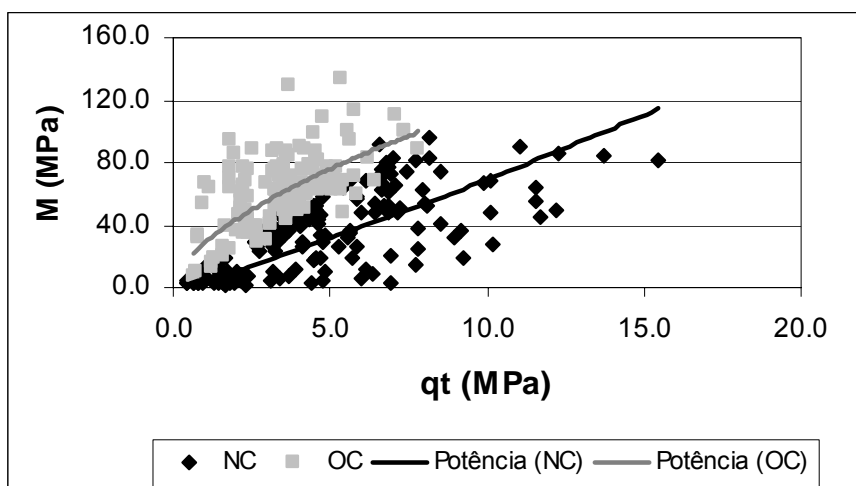


Figura 9: Razón M/q_T para suelos NC y OC (Cruz et al, 2004)

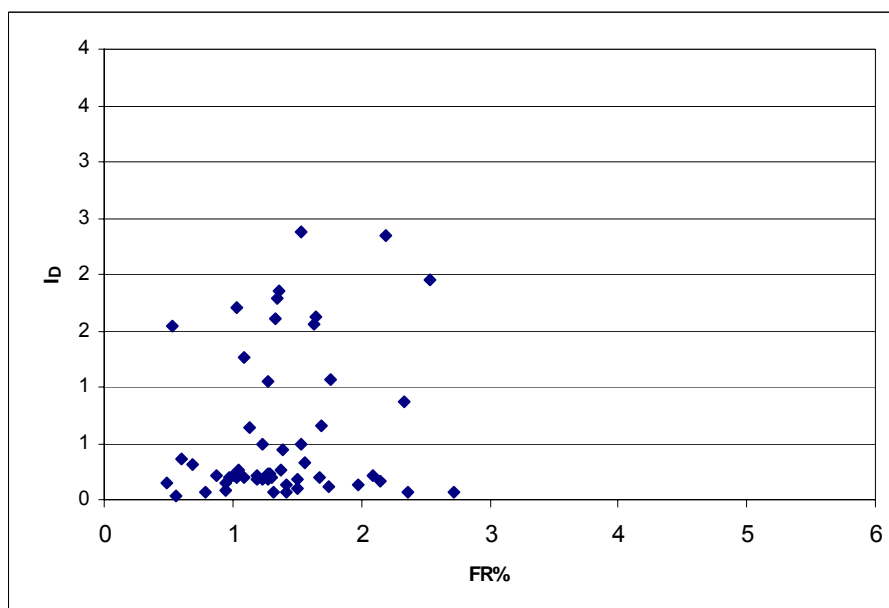


Figura 10: I_D vs. $\text{FR}\%$ en arcillas limosas cuaternarias del pro-delta en Barcelona, España.

8. CONCLUSIONES

Un buen diseño geotécnico requiere un buen conocimiento del comportamiento mecánico del suelo y no hay duda de que los ensayos *in situ* son unas herramientas efectivas que pueden proporcionarnos una gran cantidad de información útil. Podemos obtener, de forma fidedigna, un amplio espectro de parámetros. Hay que remarcar que la valoración de algunos ensayos ha mejorado a medida que la experiencia ha aumentado, mientras que la de otros ha descendido a medida que las predicciones iniciales de sus posibilidades no se han cumplido.

Es necesario hacer un esfuerzo para mejorar la situación actual y conseguir los mejores resultados de los ensayos existentes. Los estándares internacionales (es decir, globales) son de vital importancia ya que permitirán asegurar que los ensayos se lleven a cabo con método y permitirán también la obtención de datos comparables, un tema de primordial importancia para intercambiar conocimientos de un país a otro o para desarrollar correlaciones genéricas. Tanto los dispositivos como los procedimientos deben ser consistentes, dondequiera que se indique, y utilizados no en un único país sino en todo el mundo. En el presente artículo se resumen los trabajos que están llevando a cabo actualmente la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) y el Comité Europeo para la Estandarización (CEN).

Por otra parte, parece ser que numerosos usuarios consideran que, demasiado a menudo, las posibilidades de los ensayos *in situ* se han sobre valorado o aplicado de forma inapropiada. Esto ha provocado una cierta insatisfacción ya que no se han cumplido las expectativas. El hecho de que sigan apareciendo artículos con un número creciente de correlaciones no ha colaborado precisamente a mejorar esta insatisfacción. Sin embargo, a menudo no es un error del ensayo sino de su manejo o de su aplicación indebida.

Se debería fomentar, además, la acreditación en análisis *in situ*. La tendencia actual de reducción de costes y mala o dudosa ejecución debería ser firmemente rechazada incluso cuando esto implique ligeros costes adicionales.

REFERENCIAS / BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, U.R. 1996a. *Estimativa da adesão em estacas a partir do atrito lateral medido com o torque no ensaio SPT-T*. Solos e Rochas, V18 (No 1): 191-194.
- Alonso, U.R. 1996b. *Estacas hélice contínua com monitoração eletrônica, Previsão da capacidade de carga através do SPT-T*. Proc. SEFE III V2: 141-151.
- Amorosi, A. & Marchi, N. 1999. *High resolution sequence stratigraphy from piezocone tests: an example from the Late Quaternary deposits of the Southeastern Po plain*. Sedimentary Geology, 128: 67-81.
- Åhnberg, H., Larsson R. y Berglund, C. 2004. *Influence of vane size and equipment on the results of field vane tests*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.
- Arroyo, M. y Mateos, T. (2006) *Embankment design with DMT and CPTu; prediction and performance* 2nd International Symposium on the DMT and its applications, Washington
- Arroyo, M., Mateos, T., Devicenzi, M., Gómez-Escoubes, R. y Martínez, J.M. (2004) *Cálculo de asientos mediante dilatómetro Marchetti y piezocono* IV Simposio Nacional de Geotecnia Vial, AIPCR-ATC, 415-429.
- Balbi, D.J. y Saboya Jr., F.. 2004. *CPTU – Soil Profile Interpretation Based on Similarity Concept*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.
- Carvalho, J.C., Guimarães, R.C., Pereira, J.H.F., Paulocci, H.V.N. & Araki, M.S. 1998. *Utilização do ensaio SPT-T no dimensionamento de estacas*. Proc. COBRAMSEG XI, V2: 973-982.
- Cavalcante, E.H., Danziger, F.A.B., & Danziger, B.R. 2004. *Estimating the SPT penetration resistance from rod penetration based on instrumentation*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.
- Colàs Lafuerza, S. , Casamor, J.L., Canals, M. , Devincenzi, M.J. 2005. *Characterization of deltaic sediment bodies based on in situ CPT/CPTu profiles: A case study on the Llobregat delta plain, Barcelona, Spain*. Marine Geology, Vol. 222-223, 15 November 2005, pp 497-510.

- Cruz, N., Viana da Fonseca, A., Neves, E. 2004. *Evaluation of effective cohesive intercept on residual soils by DMT data*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol. 2. Millpress, Rotterdam.
- Cruz, N., Figueiredo, S. and Viana da Fonseca, A. 2004. *Deriving relic structure parametrical evidences by interpreting DMT+CPT(U)+lab tests*. Proc. of ISC-2, Vol.2, pp. 1799-1803. Ed. by Viana da Fonseca & Mayne. Millpress, Rotterdam.
- Decourt, L. 1996. *Investigações Geotécnicas*. In Hachich y otros, *Fundações, teoria e prática*: 119-162.
- Devincenzi, M., Powell, J.J.M. y Cruz, N. 2004. *ISC'2 Session 1: Mechanical in-situ testing methods*. . Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.
- Devincenzi, M. Colas, S., Casamor, J.L., Canals, M., Falivene, O. & Busquets, P. 2004. *High resolution stratigraphic and sedimentological analysis of Llobregat delta nearby Barcelona from CPT & CPTU tests*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.
- Devincenzi, M., Colas, S., Falivene, O., Canals, M & Busquets, P. 2003. *Aplicación del piezocono para el estudio sedimentológico de detalle de los sedimentos cuaternarios del delta del Llobregat, Barcelona*. Actas III Congreso Andaluz de Carreteras, Sevilla. V2: 937-954.
- Devincenzi, M. y Marchetti, S. 2002. *El ensayo dilatométrico de Marchetti, aplicaciones recientes en España*. Ingeopres, nº 100.
- Devincenzi, M. y Canicio M., 2001a. "Geotechnical Characterization by In Situ Tests of a Loess-Like Deposit in Its Natural State and After Saturation". Proc. International Conference on Insitu Measurement of Soil Properties and Case Histories. Insitu 2001. Bali.
- Devincenzi, M. y Canicio M., 2001b. "Caracterización de un Suelo Limoso Cementado Tipo Loésico en Estado Natural y Cementado". Ingeopres nº 90.
- Dong-Soo Kim, Won-Seok Seo & Eun Scok Bang. 2004. *Energy Ratio Measurement of SPT Equipment*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.
- Eitner, V., Katzenbach, R. & Stölben F. 2004. *International and European standards on geotechnical investigation and testing for site characterization*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1.
- Gens, A. y Lloret, A. 2003. *Monitoring a preload test on soft ground*. Proc. Field Measurements in Geomechanics, Myrvoll (ed.): 53-59.
- Jiménez Salas, J.A. y Justo Aplanes, J.L. (1975) *Geotecnia y Cimientos I: propiedades de los suelos y de las rocas*, Ed. Rueda, Madrid.
- Fityus, S.G. y Bates, L.. 2004. *Application of the CPT to the characterization of a residual clay site*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.
- Hegazy, Y.A. & Mayne, P.W. 2003. *Objective site characterization using clustering of piezocone data*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128 (No 12): 986-996.
- ISSMFE 1989. Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of soils – TC 16, with reference to Test Procedures. Swedish Geotechnical Institute, Linkoping. Information, 7.
- Marchetti, S. 1997. *The Flat Dilatometer Design Applications*. III Geotechnical Engineering Conference, Cairo University.
- Marchetti, S. 1980. *In Situ Tests by Flat Dilatometer*. ASCE Jour. GED, Vol. 106, nº 3, pp:299-321.
- Mateos, M.T. y Arroyo, M. (2005) *Cálculo de asientos mediante dilatómetro Marchetti y piezocono* Subsuelo y Obra, Junio 2005, 100-108
- Mayne, P.W. 2002. *Equivalent CPT Method for Calculating Shallow Foundation Settlements in the Piedmont Residual Soils Based on the DMT Constrained Modulus Approach*. <http://www.ce.gatech.edu/~geosys/Faculty/Mayne/papers>.
- Mayne, P.W. 1991. *Determination of OCR in clays by piezocone tests using cavity expansion and critical state concepts*. Soils and Foundations, Vol. 31 (No 2): 65-76.
- Mayne, P.W. y Liao, T. 2004. *CPT-DMT Interrelationships in Piedmont Residum*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.
- Lunne, T, Robertson, P.K. & Powell, J.J.M. 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Blackie Academic & Professional and SponPress. London.
- Odebrecht, E., Schnaid, F., Rocha, M.M. & Bernardes, G.P.. 2004. *Energy measurements for Standard Penetration Tests and the effects of the length of rods*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.

- Peixoto, A.S.P., de Carvalho, D. y Giacheti, H.L. 2004. *SPT-T: Test Procedure and Applications*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.
- Peixoto A.S.P. 2001. *Estudo do ensaio SPT-T e sua aplicação na prática de Engenharia de Fundações*. Thesis PhD. Unicamp, Brazil.
- Powell, J.J.M. 2001. *In situ testing and its value in characterising the UK National soft clay testbed site, Bothkennar*. Proc. Int. Conf In situ 2001, Bali. 365-372.
- Powell, J.J.M. and Butcher, A.P. 2002. *Characterisation of a glacial till at Cowden, Humberside*. Proc.. Int. Symposium on Characterisation and engineering properties of natural soils, Singapore, (eds Tan et al), Singapore, December 2002. Balkema, Vol 2: 983-1020.
- Ranzini, S.M.T. 1988. *SPT-F*. Solos e Rochas, vol 11: 29-30.
- Seed, H.B., Takimatsu, K., Harder, L.F. & Chung, R. 1985. *Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol. 111 (No 12): 1425-1445.
- Skempton, A.W. 1986. *Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation*. Geotechnique, Vol. 36(No 3): 425-427.
- Stölben, F., Eitner, V. & Hoffmann H. 2004. *Sampling by drilling and excavations and groundwater measurements according to EN ISO 22475 for geotechnical investigations and site characterization*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.
- Trevor, F. 2001. *Evaluation of soil parameters from results of piezocone tests in clay*. MSc Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
- Trevor, F.A. y Mayne P.W. 2004. *Undrained. Shear Strength and OCR of Marine Clays from Piezocone Test Results*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.
- Ventayol, A. 2003. *Caracterización Geotécnica de sedimentos deltaicos mediante piezoconos. Aplicación al margen izquierdo del delta del Llobregat*. Ingeniería del Terreno. INGEOTER Vol. 2, C. López Jimeno (ed.): 413-433.
- Whenham, V., Huybrechts, N., De Vos, M., Maertens, J. Simon, G. y Van Alboom, G. 2004. *Results of a comparative study on cone resistance measurements*. Proc. 2nd International Conference on Site Characterization ISC'2, Porto. Vol 1. Millpress, Rotterdam.