

Aplicaciones recientes en España.

El ensayo dilatométrico de Marchetti

Con el presente artículo el autor pretende dar a conocer un ensayo poco extendido en España, como es el ensayo dilatométrico de *Marchetti* (DMT), y que, sin embargo, se presenta como una excepcional herramienta de trabajo, que unida a otro ensayo más conocido como la prueba de penetración estática, permite determinar parámetros geotécnicos de resistencia y deformabilidad *in situ* de forma rápida y precisa.

Marcelo DEVINCENZI, IgeoTest, S.L.
Silvano MARCHETTI, Universidad de L'Aquila, Italia.

El DMT es un interesante ensayo geotécnico *in situ* cuya aplicación no está aún extendida en España. Se trata de un ensayo carga-deformación, con deformación controlada (*Marchetti*, 1975, 1980) y cuyo rango de aplicación es en suelos granulares o cohesivos, de poco a muy densos y de blandos a duros, respectivamente. Desde un punto de vista geológico/geotécnico presenta tres aplicaciones principales:

- Determinar el perfil estratigráfico del terreno.
- Evaluar los parámetros geotécnicos de las capas atravesadas.
- Calcular la capacidad portante del terreno y asentamientos frente a sollicitaciones externas.

En el presente trabajo se describen el equipo y ensayo, se presentan correlaciones con

las propiedades de los suelos y se analizan ejemplos en distintos suelos españoles.

Procedimiento y equipos del ensayo DMT

El *Dilatómetro Plano de Marchetti* (DMT) consiste una paleta plana que se hinca en el terreno y está provista de una fina membrana metálica circular, expandible horizontalmente en el suelo mediante gas a presión (*Figs. 1 y 2*).

La hincada de la paleta en el terreno se realiza mediante penetración estática, utilizando para ello los mismos camiones que se utilizan para la realización de ensayos de penetración estática y piezoconos (*Fig. 3*). El varillaje utilizado es el mismo que el de estos ensayos.

Palabras clave: ASIENTO, CARGA, COHESIVO, DEFORMACIÓN, DILATOMETRÍA, ENSAYO, GEOTECNIA, GRANULAR, IN SITU, PERFIL, SUELO.

La paleta se conecta a una unidad de control en superficie (*Fig. 4*) mediante una manguera de presión de nylon en cuyo interior contiene un cable eléctrico que transmite las señales. La manguera y cable discurre por el interior de las varillas de hinca, que son huecas.

A intervalos de 20 cm se detiene la penetración y la membrana es inflada mediante gas presurizado. Se toman dos lecturas: *A*, que corresponde a la presión necesaria para comenzar a mover la membrana, y *B*, que es a la presión requerida para producir una deformación de 1,1 mm en el terreno. El desplazamiento de la membrana de la paleta es de $1,1 \pm 0,02$ mm y, tratándose de piezas sólidas, no puede ser alterada en modo alguno por el operador. Se trata, por lo tanto, de un instrumento de gran precisión.

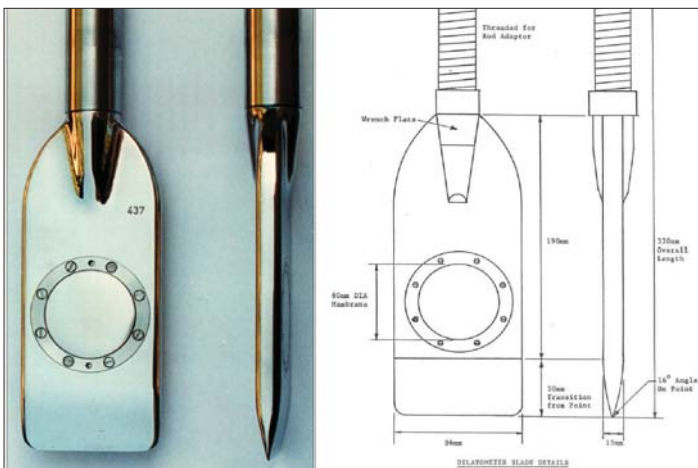


Fig. 1.- Paleta DMT.



Fig. 2.- Central de lectura DMT.

Calibrado de las membranas

Las lecturas de campo A y B deben ser corregidas por los efectos de la rigidez propia de la membrana para determinar las presiones P_0 y P_1 :

$$P_0 = A + \Delta A \quad (1)$$

$$P_1 = B + \Delta B \quad (2)$$

donde: ΔA , es la presión exterior que debe ser aplicada a la membrana al aire libre para que se mantenga en reposo sobre su apoyo, y ΔB , es la presión interna necesaria para desplazar la membrana 1,1 mm. Los valores de ΔA y ΔB se leen en campo aplicando a la paleta una presión negativa mediante vacío y una presión positiva, respectivamente.

Los valores de ΔA oscilan entre 0,05 a 0,30 bar, y los de ΔB entre 0,05 y 0,80 bar. El cambio de ΔA o ΔB no debe ser superior a 0,25 bar antes y después del ensayo, si esto sucede, debe ser repetido.

Normativas

No existe una norma publicada para este ensayo, únicamente unas recomendaciones de la ASTM. Concretamente: *ASTM subcommittee D18.02.10. 1996. Suggested Method for Performing the Flat Dilatometer Test (Geotech. Testing Journal, Vol. 9, n° 2: 93-101. June.*

Recientemente, el comité TC16 de la ISSMFE ha publicado un informe en el que se describen de forma detallada los equipos, procedimientos, interpretación y aplicaciones para el diseño del ensayo (Marchetti et al., 2001).

Interpretación del ensayo DMT

Parámetros Primarios DMT

A partir de los valores de P_0 y P_1 se derivan los tres parámetros intermedios característicos de este ensayo:

- I_D , *Material Index*, relacionado con el tipo de suelo.
- K_D , *Horizontal Stress Index*, relacionado con la razón de sobreconsolidación del suelo (OCR).
- E_D , *Módulo Dilatómetro*, determinado a partir de la teoría de la elasticidad.

A continuación se describen brevemente los conceptos básicos necesarios para la interpretación y valoración de los resultados.

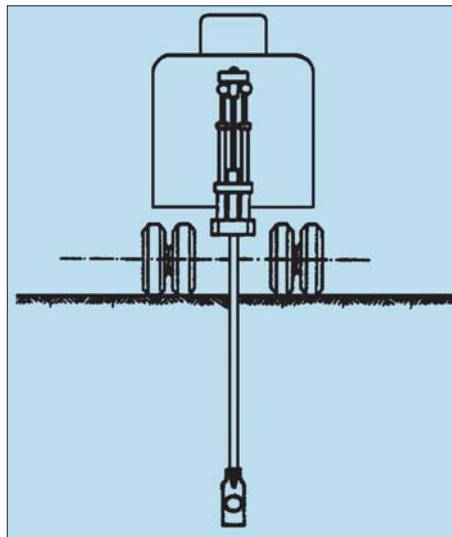


Fig. 3.- Hincado del dispositivo.

I_D : índice del material o tipo de suelo

Definido por:

$$I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - u_0} = \frac{\Delta P}{P_0 - u_0} \quad (3)$$

donde u_0 es la presión intersticial.

En general, I_D es indicativo del tipo de suelo. En el campo de los suelos cohesivos, no obstante, I_D puede clasificar a un suelo arcilloso como limoso, y viceversa. Una mezcla de arcillas y arenas también podría ser clasificada como un limo.

Al utilizar este parámetro se debe tener presente que la clasificación del suelo no es el resultado de un análisis granulométrico, sino que responde a parámetros que reflejan un comportamiento mecánico del medio, en cierto modo un índice de rigidez. Como recalca Marchetti, en cierto modo puede re-

sultar más relevante una descripción basada en un comportamiento mecánico que una basada en un análisis granulométrico.

Por ejemplo, si una arcilla por una razón determinada se comporta de una forma más rígida que la mayoría de las arcillas, desde el punto de vista del valor de I_D será clasificada como un limo. Esta caracterización, si bien es incorrecta desde el punto de vista granulométrico, puede ser relevante desde un punto de vista del comportamiento mecánico.

Los valores de I_D oscilan de 0,1 a 10 (3 órdenes de magnitud) y su valor es constante en una capa homogénea de suelo. De acuerdo a Marchetti (1980), el tipo de suelo se identifica como:

Arcilla	$0,1 < I_D < 0,6$
Limo	$0,6 < I_D < 1,8$
Arena	$1,8 < I_D < (10)$

K_D : Horizontal Stress Index

Definido por:

$$K_D = \frac{P_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \quad (4)$$

donde σ'_{v0} es la tensión efectiva vertical.

K_D es la base para la interpretación de varios parámetros del suelo, y es clave para el resultado del ensayo. Este parámetro depende de la tensión efectiva horizontal y está relacionado con la razón de sobreconsolidación del suelo (OCR). Puede decirse que representa al valor de K_0 amplificado por los efectos de la penetración de la paleta.

El perfil de K_D es similar en forma al perfil de *O.C.R.* y, por lo tanto, es sumamente útil para entender la *historia tensional* de un depósito (Marchetti, 1980, Jamiolkowski et al., 1988). El valor de K_D en arcillas normalmente consolidadas (NC) es:

$$K_{D,NC} \approx 2 \quad (5)$$

oscilando entre 1,8 y 2,3.

E_D : Módulo DMT

E_D se obtiene a partir de la teoría de la elasticidad. Resumiendo:

$$E_D = 34,7 \Delta P \quad (6)$$

Este parámetro no debe utilizarse en sí mismo como un módulo de deformación, fundamentalmente por la falta de información de la historia tensional. Sólo debe ser utilizado en combinación con K_D e I_D y, especialmente, no debe ser confundido con el módulo de Young.

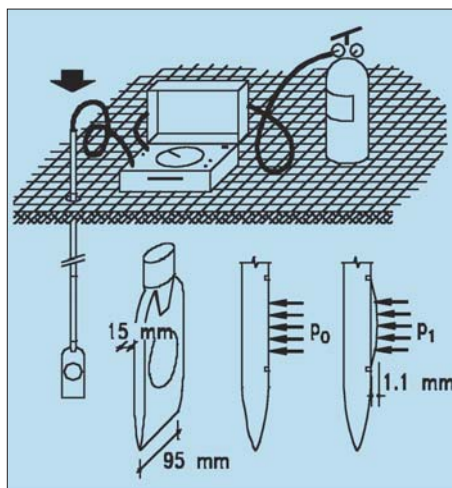


Fig 4.- Esquema de realización del ensayo DMT.

Interpretación de parámetros geotécnicos

De forma abreviada, a partir de los parámetros I_D , K_D , y E_D , definidos en los epígrafes anteriores, pueden estimarse los parámetros geotécnicos clásicos de resistencia, deformabilidad e historia tensional de un suelo:

- Tipo de suelo (estratigrafía).
- OCR y K_0 en arcillas.
- C_u en suelos cohesivos.
- $DR\%$ y ϕ en suelos granulares.
- M_{DMT} (módulo Edométrico) en suelos granulares y cohesivos.

Tipo de suelo y peso específico relativo

Marchetti y Crapps (1981) desarrollaron el ábaco de la Fig. 5 en el que se puede determinar el tipo de suelo y su peso específico relativo a partir de los parámetros I_D y E_D .

Historia Tensional (OCR)

En arcillas no cementadas, la correlación empírica entre la razón de sobreconsolidación (OCR) y K_D propuesta por Marchetti (1980) y corroborada por numerosas investigaciones posteriores se indica en la ecuación:

$$OCR_{DMT} = (0,5 K_D)^{1,56} \tag{7}$$

La ecuación 7 fue derivada en correspondencia a un valor de $K_D = 2$ para suelos arcillosos no cementados normalmente consolidados (NC), tal como demuestran numerosas investigaciones.

Otras correlaciones similares se presentan en la Fig. 6.

Esta relación no se debe aplicar en arcillas sobreconsolidadas (OC) o cementadas. No se ha encontrado una única relación entre K_D y OCR para este tipo de suelos.

La determinación (e incluso la definición) de OCR en arenas es mucho más difícil que en arcillas. La única forma de obtener cierta información de OCR en arenas, es utilizando la razón:

$$\alpha = \frac{M_{DMT}}{q_c} \tag{8}$$

donde: M , es el módulo confinado determinado a partir de E_D , y q_c es la resistencia por punta del penetrómetro estático (CPT).

El valor de α para arenas/limos NC oscila entre 5 y 10, y para arenas/limos OC entre 12 y 24 (Marchetti, 2001).

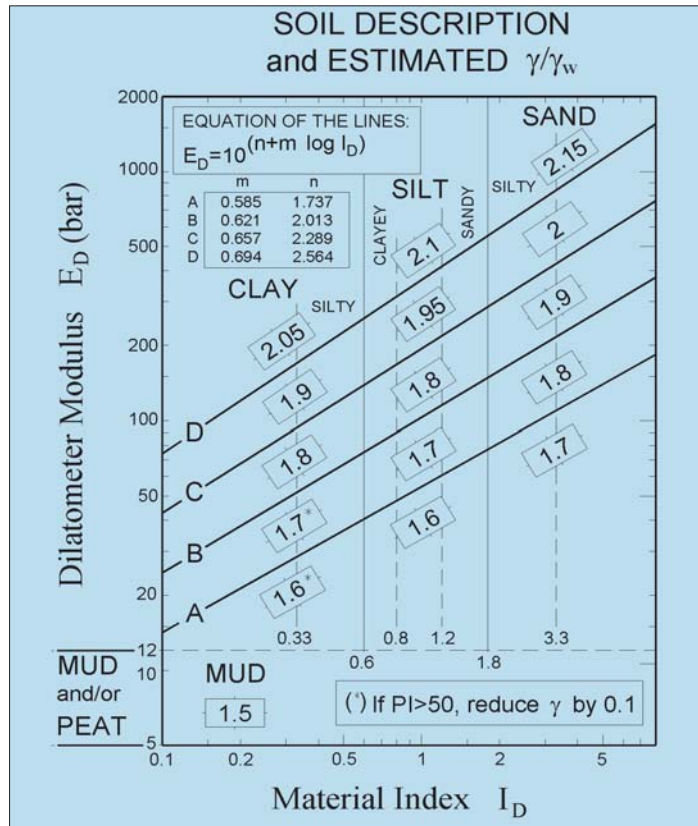


Fig. 5.- Ábaco para determinar el tipo de suelo y peso específico relativo (Marchetti y Crapps, 1891).

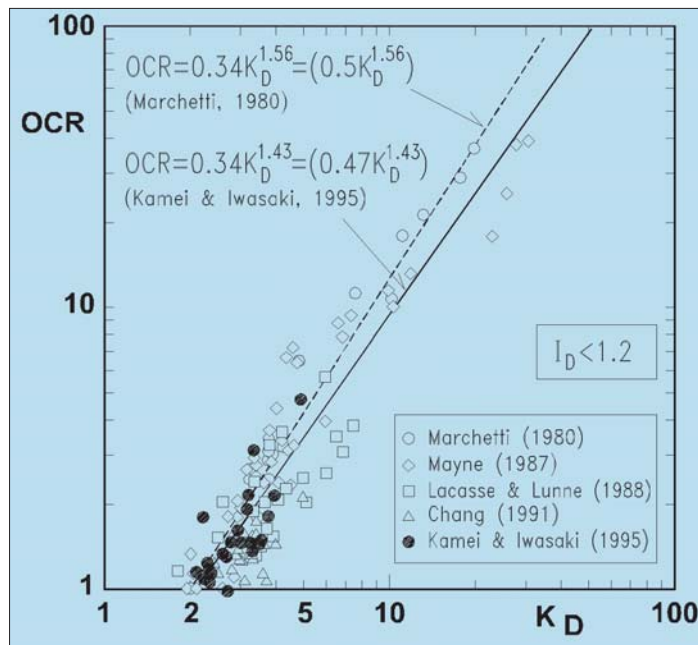


Fig. 6.- OCR y K_D (Kamey e Iwasaki, 1995).

En la Fig. 7 se presenta un ejemplo de la variación del parámetro α en un suelo limoso cementado en su estado natural y después de saturarlo (Devincenzi y Canicio, 2001 a, b). El ejemplo corresponde a un depósito cuaternario tipo loésico cercano a la ciudad de Girona. Los valores de α fueron obtenidos de la combinación de ensayos CPT y DMT , a partir de los cuales se obtuvieron los valores de q_c y M , respectivamente.

Se observa claramente que los valores de α para el suelo en su estado natural son similares a los de los suelos compactados o sobreconsolidados (OC), con una media de 20. La sobreconsolidación aparente de este suelo viene dada principalmente por una incipiente cementación carbonática. Sin embargo, en su estado saturado, el suelo ha perdido su estructura pasando a un estado normalmente consolidado (NC), y los valores de α descienden a una media de 8.

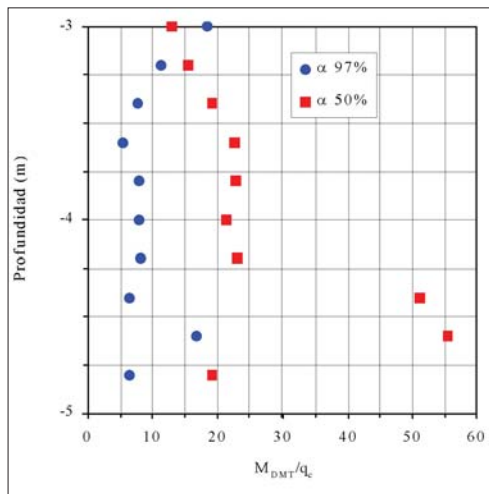


Fig. 7.- Valores M_{MDT}/q_c en un suelo limoso en estado natural y saturado. Devincenzi y Canicio, 2001.

El valor del parámetro α proporciona así una valoración aproximada de la historia tensional de los depósitos arenosos. La combinación de los ensayos *CPT* y *DMT* constituye una excelente herramienta de investigación de campo para el estudio de estos sedimentos.

Coefficiente de empuje en reposo K_0

La relación empírica para arcillas *NC* no cementadas, fue propuesta por Marchetti (1980):

$$K_0 = \left(\frac{K_D}{1,5} \right)^{0,47} - 0,6 \tag{9}$$

En arcillas cementadas, sin embargo, esta relación puede sobreestimar significativamente el valor de K_0 , ya que parte del valor de K_D es debido a los efectos de la cementación.

La determinación de K_0 en arenas, sólo es factible en arenas mediante la combinación del ensayo de penetración estática *CPT* (Schmertmann, 1982, 1983).

Baldi et al., (1986), a partir de los mencionados trabajos de Schmertmann y de las modificaciones posteriores de Marchetti (1985), propuso:

$$K_0 = 0,376 + 0,095K_D - 0,0017^{q_c} / \sigma'_{v,0} \tag{10}$$

$$K_0 = 0,376 + 0,095K_D - 0,0046^{q_c} / \sigma'_{v,0} \tag{11}$$

En la práctica actual, la *ISSMGE (TC16 2001)* recomienda la utilización de las anteriores ecuaciones utilizando para el último coeficiente valores de 0,005, en depósitos arenosos antiguos (*seasoned sands*), y de 0,002, en depósitos arenosos recientes

(*freshly deposited*); si bien, dicha elección implica cierto grado de subjetividad.

Si bien este es uno de los muy pocos métodos para estimar el valor de K_0 en arenas (o al menos, la forma del perfil de K_0), su fiabilidad es difícil de establecer debido a la falta de valores de referencia.

En la Fig. 8, se presenta un ejemplo correspondiente a los depósitos deltaicos del río Llobregat, cerca de su desembocadura. El perfil litológico puede apreciarse claramente en el gráfico del piezocono (izquierda), donde se traza el valor de q_T (q_c corregida) y el valor de u (presión intersticial). En primer término se encuentra una capa de arenas densas, seguida de una segunda en la que abundan las intercalaciones limo-arcillosas. En tercer lugar, a partir de los 22 m aproximadamente, se encuentra una capa de arcillas limosas con delgadas intercalaciones granulares finas.

En este ejemplo, se presenta la estimación de K_0 en base a la ecuación 9 (tramos cohesivos, serie de color rojo) y a la ecuación 10 (tramos arenosos, serie de color azul). Si bien, se observa una mayor disper-

sión del valor de K_0 en los tramos arenosos, la tendencia general del gráfico parece bastante razonable.

Parámetros resistentes

c_u (arcillas)

La correlación original propuesta por Marchetti (1980), es la siguiente:

$$C_u = 0,22\sigma'_{v,0} \cdot (0,5K_D)^{1,25} \tag{12}$$

Un ejemplo de comparaciones entre c_u , determinada a partir del *DMT* y otros ensayos geotécnicos *in situ* (*vane test*, presiómetro autopercutor, *CPT*) y ensayos de laboratorio (triaxiales), se presenta en la Fig. 9. Los resultados muestran la bondad de la correlación propuesta.

ϕ (arenas)

Básicamente, existen dos métodos para determinar el ángulo de rozamiento de arenas a partir del ensayo *DMT* (ver también Marchetti, 1997).

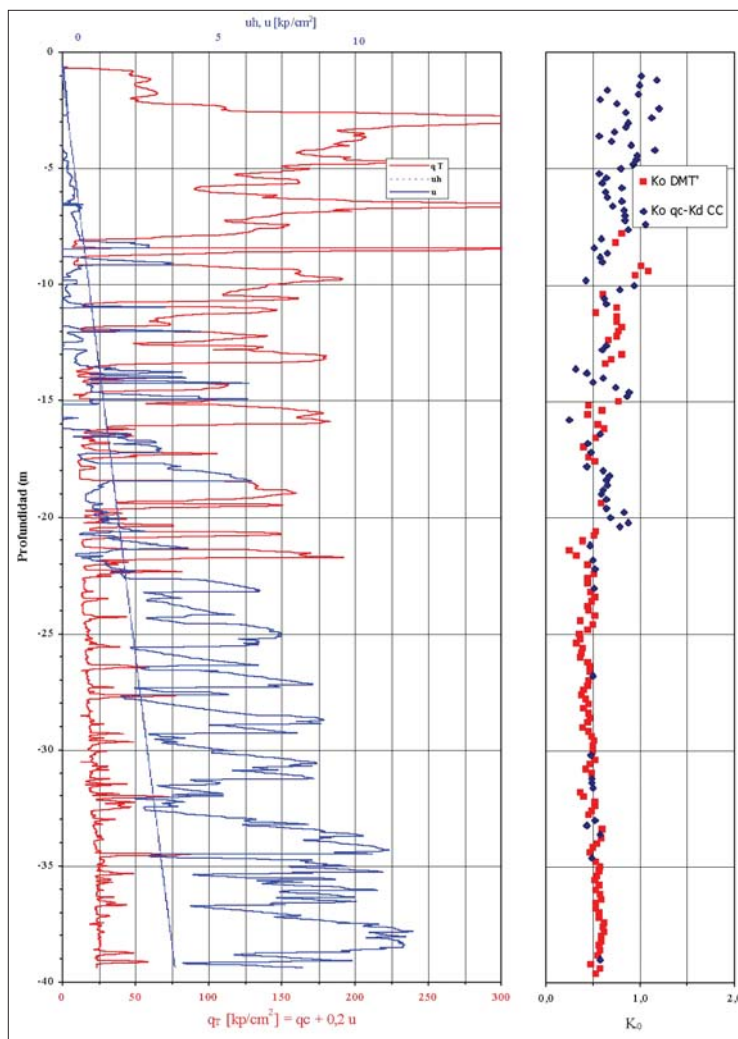


Fig. 8.- Estimación de K_0 en sedimentos deltaicos del río Llobregat, Barcelona.

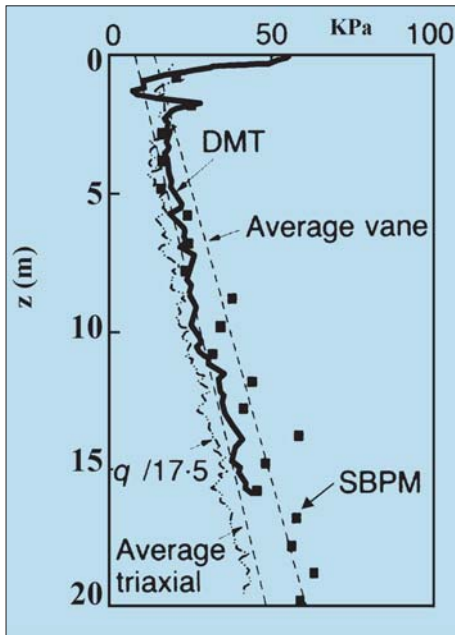


Fig. 9.- Comparación entre c_s , determinada a partir del DMT y por otros ensayos en el National Research Site of Bothkennar, UK (Nash et al. 1992).

El primer método (Schemertmann, 1982, 1983) está basado en resultados de ensayos en cámara de calibración (CC) y relaciona $K_0 - K_D - \phi$.

Una variación de este método (Marchetti, 1985) consiste en primero determinar K_0 , tal como se indicó en el epígrafe anterior, y utilizar el ábaco de la Fig. 10 para estimar ϕ a partir de K_0 , y q_c determinado a partir del ensayo CPT.

El segundo método es descrito en detalle por Marchetti (1997). Se determina ϕ a partir de K_D mediante la ecuación siguiente:

$$\phi_{sajedMT} = 28^\circ + 14,6^\circ \log K_D - 2,1^\circ \log^2 K_D \quad (13)$$

Esta ecuación es conservadora y sólo debe aplicarse si no se dispone de otra información más precisa.

Parámetros de deformación

El módulo M determinado a partir de los ensayos DMT (designado como M_{DMT}) corresponde al módulo vertical drenado (unidimensional) tangente a la presión de confinamiento σ'_{v0} del ensayo, y es igual al determinado en el edómetro.

La posibilidad de estimar el módulo confinado tanto en suelos cohesivos como granulares es una de las principales aportaciones del ensayo DMT. M_{DMT} , se obtiene aplicando al parámetro E_D el correspondiente factor de corrección R_M , de acuerdo a:

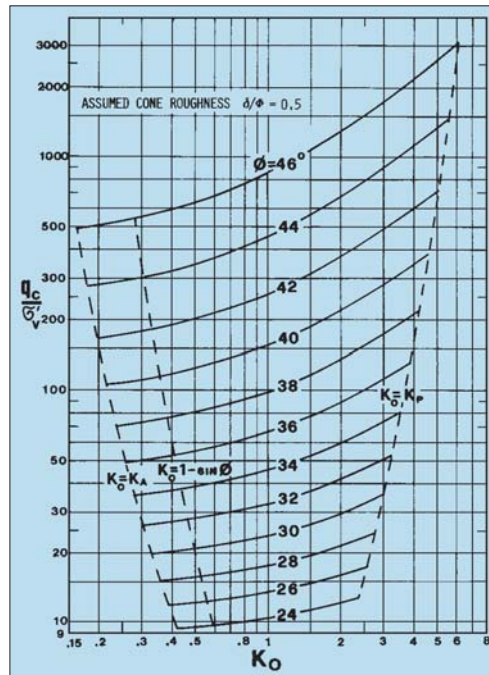


Fig. 10.- Abaco q_c , K_0 , ϕ de acuerdo a Durgunoglu & Mitchell (compilado por Marchetti 1985).

$$M_{DMT} = R_M \cdot E_D \quad (14)$$

Las ecuaciones que definen R_M en función de I_D y K_D (Marchetti, 1980) se presentan en la Tabla I. El valor de R_M se incrementa con K_D . Se debe notar que R_M , dependiente de I_D y K_D , no es una constante proporcional única que relaciona M y E_D . Los valores de R_M oscilan entre 1 y 3.

Un ejemplo de comparación de M_{DMT} y el módulo edométrico obtenido a partir de muestras inalteradas de alta calidad, se presenta en la Fig. 11.

Otras aplicaciones directas de interés

Detección de superficies de rotura en taludes de arcillas OC

Una de las interesantes aplicaciones directas del ensayo DMT, es la detección de superficies de roturas en taludes de arcillas sobreconsolidadas (OC). Este rápido y sencillo método fue presentado por Totani et al.,

$I_D \leq 0,6$	$R_M = 0,14 + 2,36 \log K_D$
si $I_D \geq 3$	$R_M = 0,5 + 2 \log K_D$
si $0,6 < I_D < 3$	$R_M = R_{M,0} + (2,5 - R_{M,0}) \log K_D$ $R_{M,0} = 0,14 + 0,15 (I_D - 0,6)$
si $K_D > 10$	$R_M = 0,32 + 2,18 \log K_D$
si $R_M < 0,85$	$R_M = 0,85$

Tabla I.- Determinación de R_M .

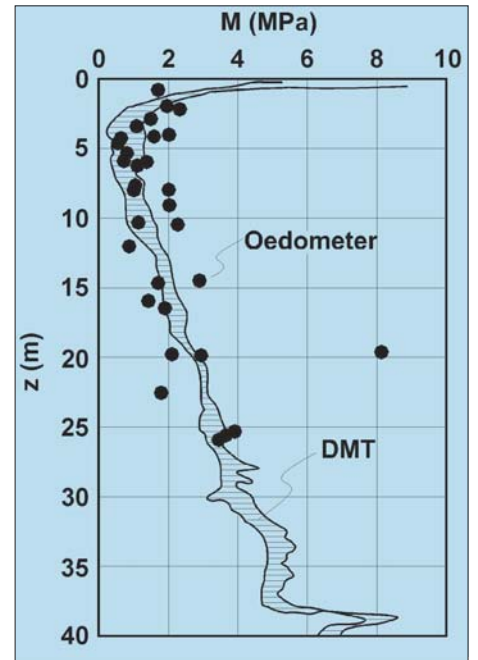


Fig. 11.- Comparación entre M , determinado a partir de DMT y edómetros de alta calidad, en arcillas de Noruega (Lacasse 1986).

(1997) y se basa en el análisis del perfil de K_D . En la Fig. 12 se resume el concepto del método.

Como consecuencia de un deslizamiento, a lo largo de la superficie de rotura del talud se produce un remoldeo del suelo, con pérdida de su estructura original, pasando éste a un estado aproximadamente NC.

Como en arcillas NC el valor típico del parámetro $K_D \approx 2$, el método en esencia consiste en identificar estas zonas dentro del talud (ver Fig. 12). Nótese que lo que se busca es un valor numérico específico ($K_D \approx 2$) y no simplemente una zona más débil. Este método ha sido ampliamente validado por inclinómetros (Marchetti, 2001).

Con éste método, no sólo se detectan superficies de deslizamiento actuales, sino que se pueden detectar deslizamientos fósiles (no identificables por inclinometría), que, dado

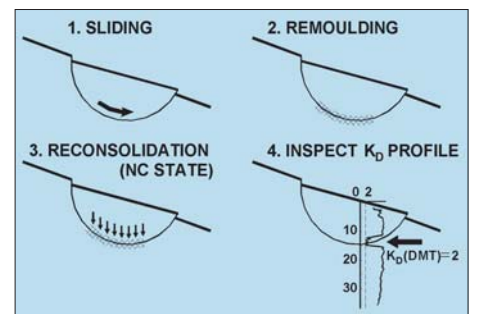


Fig. 12.- Método DMT-KD para detectar superficies de rotura en taludes arcillosos OC.

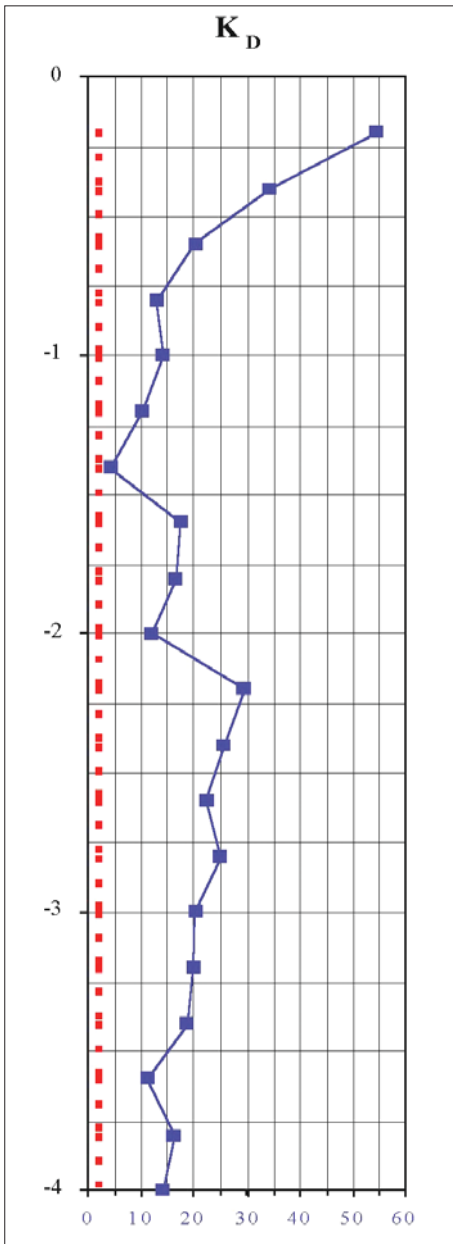


Fig. 13.- Ejemplo de deslizamiento superficial fósil en Montagut, Girona.

el caso, podrían ser susceptibles de reactivarse, por ejemplo después de una excavación.

En el ejemplo de la Fig. 13 se presenta un caso de deslizamiento fósil superficial en arcillas fuertemente sobreconsolidadas de la localidad de Montagut, Girona. La línea roja en el gráfico representa un valor de $K_D = 2$ (suelo NC). En los testigos de sondeos realizados se pudo comprobar la presencia de una zona con abundantes caras espejadas.

El método en si mismo no permite establecer si el talud se está moviendo y cómo es este movimiento, por lo tanto, en la mayoría de los casos una combinación de DMT e inclinómetros es preferible (por ejemplo,

para utilizar los perfiles de K_D y optimizar la localización y profundidad de los inclinómetros).

Control de tratamientos de mejora del terreno

El ensayo DMT ha sido utilizado frecuentemente con éxito en tratamientos de mejora de suelos blandos, debido a una mayor sensibilidad a detectar pequeños cambios en las tensiones horizontales (ver Fig. 14). Numerosos autores dan cuenta de este uso del ensayo (Schmertmann, 1986; Jendeby, 1992; Pascualini y Rosi, 1993, de Cock et al., 1993, etc.).

La compactación y/o consolidación de un suelo tratado se refleja de inmediato por un incremento de M_{DMT} y K_D .

Se ha comprobado (Schmertmann, 1986) que el incremento de M_{DMT} en depósitos arenosos es aproximadamente el doble del incremento de q_c del ensayo CPT.

La combinación DMT/CPT, no obstante, es ventajosa ya que el ensayo CPT es de más rápida ejecución. Además, la combinación DMT/CPT, a través de la razón $q_c/M_{DMT} = \alpha$, muestra el proceso de cambio estructural sufrido por el suelo, es decir el incremento de α después de un tratamiento. En la Fig. 15, se muestra este cambio. Esta figura es aná-

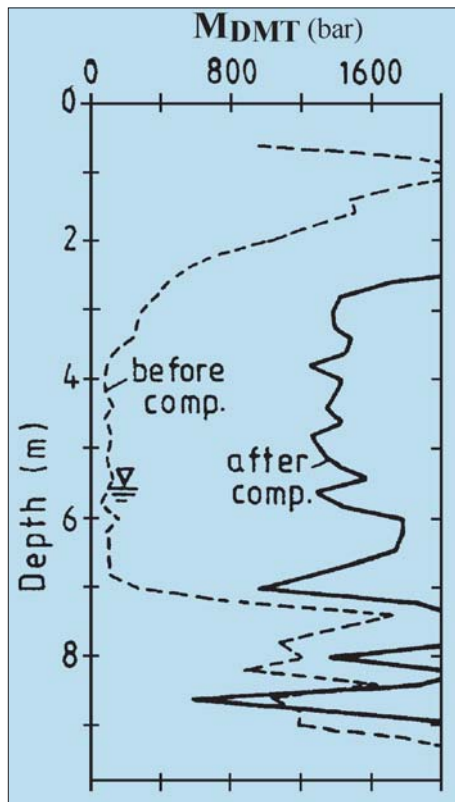


Fig. 14.- Ensayos DMT antes y después de un tratamiento de vibrocompactación, Van Impe et al., 1994.

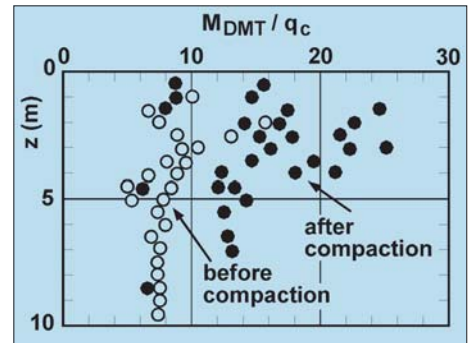


Fig. 15.- Razón $\alpha = M_{DMT}/q_c$ antes y después de una compactación dinámica en un relleno arenoso suelto (Jendeby, 1992).

loga a la Fig. 7, presentada por Devincenzi y Canicio (2001 a,b), aunque en este caso el proceso es el inverso: se trata del empeoramiento de un suelo tras ser saturado.

Control de compactación de terraplenes

Existe bastante experiencia en el uso del DMT para evaluar la idoneidad de compactación de subbases de terraplenes.

Marchetti (1994), describe detalladamente el uso del ensayo para este fin en carreteras de Bangladesh. Una vez realizados suficientes ensayos DMT en zonas aceptadas del terraplén, se obtuvo un perfil tipo M_{DMT} , utilizado luego para el control de calidad. Este perfil (Fig. 16) puede ser utilizado como un método muy eficaz y económico dado la rapidez del ensayo comparado con otros, como por ejemplo el ensayo de placa de carga.

Ejemplos

A continuación se presentan dos ejemplos de ensayos. Los resultados fueron procesados con el programa de presentación de

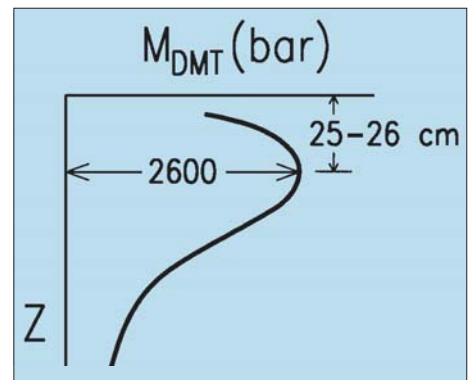


Fig. 16.- Ejemplo de perfil de aceptación M_{DMT} para control de subbases. Marchetti, 1994.

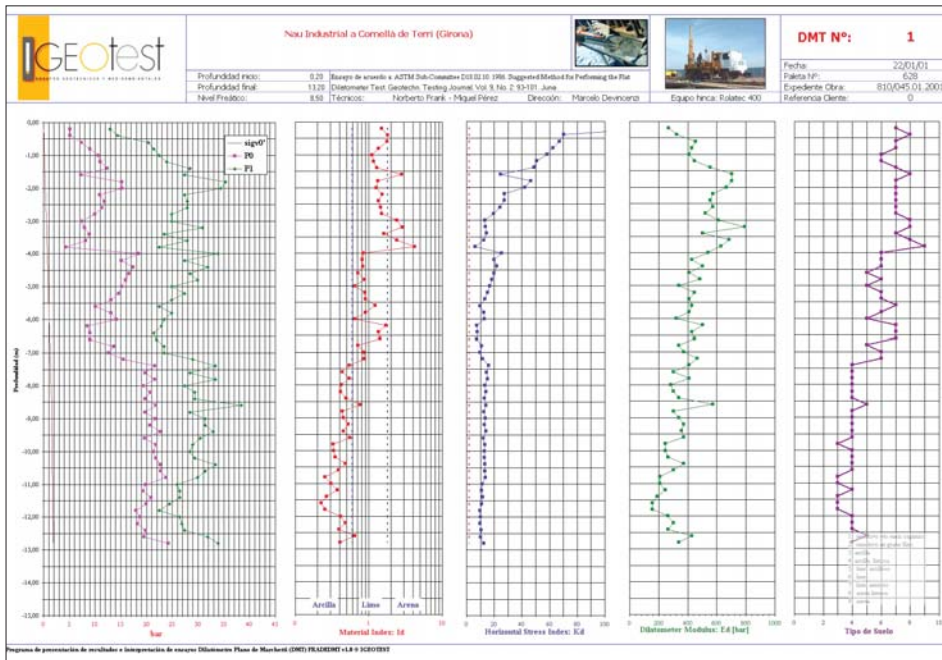


Fig. 17.- Limos arcillosos y arcillas sobreconsolidadas en Cornellà de Terri, Girona.

datos e interpretación *FradeDMT*[®] desarrollado por *Igeotest, S.L.*

Arcillas Sobreconsolidadas en Cornellà de Terri, Girona

En la *Fig. 17* se presentan los resultados de un ensayos realizados en arcillas sobreconsolidadas pliocenas en la localidad de Cornellà de Terri, Girona. En primer lugar, a partir del perfil de los parámetros, pueden distinguirse tres subunidades diferentes, hecho que resultaba prácticamente imposible

con los testigos de los sondeos también realizados. El primer nivel llega hasta los 4 m de profundidad aproximadamente, y el segundo hasta los 7,5 metros.

Obsérvese como el parámetro I_D permanece casi constante en cada una de estas unidades. La sobreconsolidación del suelo queda claramente manifestada por los elevados valores del parámetro K_D , que decrecen en profundidad.

En un estudio geotécnico previo en este solar se había recomendado una cimentación mediante pilotes. Con la ayuda del en-

sayo *DMT*, sin embargo, pudo recomendarse una cimentación superficial que resultó completamente satisfactoria.

Sedimentos deltaicos del Río Llobregat, Barcelona

En la *Fig. 18* se observa un ensayo realizado en los sedimentos de origen deltaico del río Llobregat, cerca de su desembocadura, en el término municipal del Prat de Llobregat. En este ensayo se han alcanzado con facilidad de ejecución los 40 m de profundidad.

Corresponde al mismo ejemplo a partir del cual se elaboró la *Fig. 8*, es decir que se distinguen tres unidades básicas, la primera de arenas densas hasta los 8 m de profundidad, una segunda también arenosa, pero en la que abundan las intercalaciones limo-arcillosas y, en tercer lugar, a partir de los 22 m, aproximadamente, se encuentra una capa de arcillas limosas con delgadas intercalaciones granulares finas.

Obsérvese como la diferencia entre P_0 y P_1 (ΔP) es mucho mayor en los tramos arenosos. En los sedimentos arcillosos ΔP es pequeña, y tanto P_0 como P_1 se incrementan linealmente con la profundidad.

El parámetro K_D se mantiene constante, y aproximadamente igual a 2, en los sedimentos cohesivos inferiores; mientras que las arenas y arenas con intercalaciones finas, se observa un efecto de sobreconsolidación aparente muy notable, hecho que puede atribuirse a la intensa explotación del acuífero superior.

Conclusiones

El presente artículo pretende dar a conocer un ensayo poco extendido en España, que sin embargo permite obtener importantes parámetros *in situ* de los suelos. El ensayo dilatométrico de *Marchetti (DMT)*, un ensayo de carga-deformación, con deformación controlada y aplicable, tanto en suelos granulares como cohesivos, en un amplio rango de densidades y durezas.

Del ensayo, de manera directa se obtienen los valores de I_D , K_D , y E_D :

- I_D , *Indice del Material*: es un parámetro indicativo del tipo de suelo, o bien del comportamiento mecánico de éste.
- K_D *Horizontal Stress Index*: es la base para la interpretación de varios parámetros del suelo, al depender de la tensión efectiva horizontal y estar relacionado con la razón de sobreconsolidación del suelo (*OCR*), es muy útil para conocer la historia tensional del terreno.

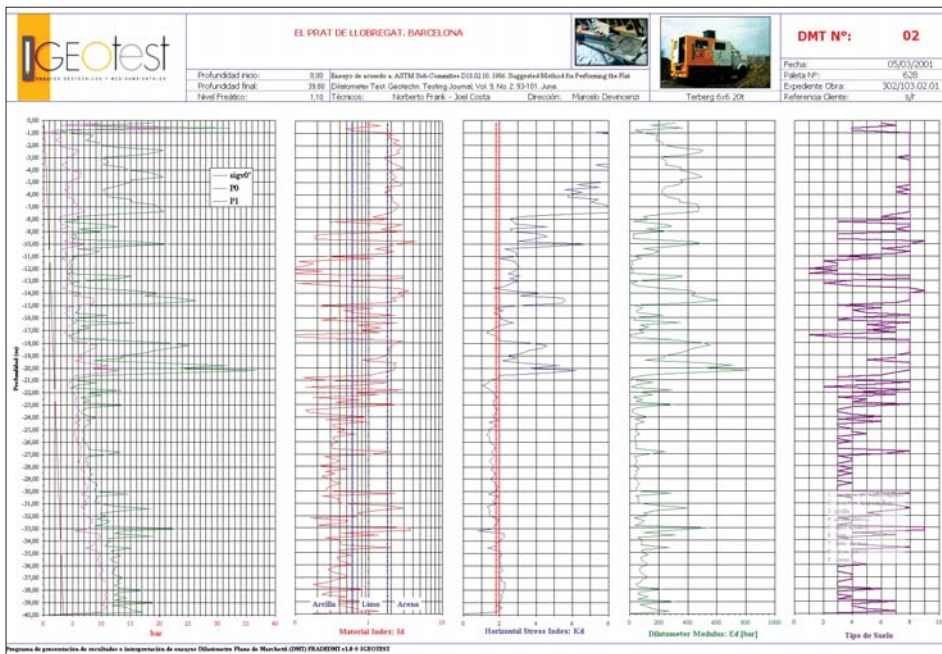


Fig. 18.- Sedimentos deltaicos del río Llobregat, Barcelona.

- E_D Módulo DMT: sólo debe ser utilizado en combinación con K_D e I_D , no debe ser confundido con el módulo de Young.

A partir de los parámetros anteriores, pueden estimarse los parámetros geotécnicos clásicos de resistencia, deformabilidad e historia tensional de un suelo (estratigrafía, OCR y K_O , C_U , en suelos cohesivos; $DR\%$ y ϕ en suelos granulares y módulo edométrico en suelos granulares y cohesivos).

En el caso de terrenos cohesivos los parámetros OCR , K_O y C_U pueden calcularse directamente a partir de los datos extraídos de los DMT.

En determinados tipos de terreno, como es el caso de los granulares finos, es de destacar la importancia de complementar el ensayo DMT con ensayos de penetración estática (CPT y/o CPTU). Esta combinación permite hacer una estimación de la historia tensional del terreno, estimar el valor de K_O y obtener un valor aproximado del ángulo de rozamiento interno ϕ .

En cuanto a los parámetros de deformación, la posibilidad de estimar el módulo confinado, directamente correlacionable con el edométrico, tanto en suelos cohesivos como granulares es una de las principales aportaciones del ensayo DMT.

En el artículo se mencionan, además de las aplicaciones del DMT comentadas, otras aplicaciones directas aplicables a casos concretos como: detección de superficies de rotura en taludes de arcillas sobreconsolidadas, control de tratamientos de mejora del terreno, y control de compactación de terraplenes. Se exponen, además, casos prácticos de la utilización conjunta de los ensayos DMT y CPT/CPTU y los resultados obtenidos.

Agradecimientos

El autor desea expresar su sincero agradecimiento al Profesor *Silvano Marchetti* y a la señora *Paola Monaco*, ambos de la Universidad de L'Aquila, por poner a su disposición gran parte de las figuras presentadas.

Bibliografía

- A.G.I., *Associazione Geotecnica Italiana*-Burghignoli, A., Cavallera, L., Chieppa, V., Jamiolkowski, M., Mancuso, C., Marchetti, S., Pane, V., Paoliani, P., Silvestri, F., Vinale, F. & Vittori, E. (1991). *Geotechnical characterization of Fucino clay*. Proc. X ECSMFE, Firenze, Vol. 1, 27-40.
- ASTM Subcommittee D 18.02.10 - Schmertmann, J.H., Chairman (1986). *Suggested Method for Performing the Flat Dilatometer Test*. ASTM Geotechn. Testing Journal, Vol. 9, No. 2, 93-101. June.
- Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V. & Jamiolkowski, M. (1988). *Stiffness of Sands from CPT, SPT and DMT*. ICE, Proc. Penetration Testing in the UK, Univ. of Birmingham, Paper No. 42, 299-305. July.
- Borden, R.H., Aziz, C.N., Lowder, W.M. & Khosla, N.P. (1986). *Evaluation of Pavement Subgrade Support Characteristics by Dilatometer Test*. Proc. 64th Annual Meeting of the Transportation Res. Board. TR Record 1022. June.
- CEN, *European Committee for Standardization* (1999). *Eurocode 7: Geotechnical design, Part 3: Design assisted by field tests, Section 9: Flat Dilatometer Test (DMT)*. Final edition, luglio 1999, ENV 1999-3.
- Cestari, F. (1990). *Prove geotecniche in situ*. Ed. Geo-Graph.
- De Cock, F., Van Impe, W.F. & Peiffer H. (1993). *Atlas screw piles and tube screw piles in stiff tertiary clays*. Proc. BAP II, Ghent, Balkema, 359-367.
- 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 In Situ 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*. Ingeoprés n° 90, 2001.
- Hayes, J.A. (1990). *The Marchetti Dilatometer and Compressibility*. Seminar on In Situ Testing and Monitoring, Southern Ont. Section Canad. Geot. Society, Sept., 21 pp.
- Jendebj, L. (1992). *Deep Compaction by Vibrowing*. Nordic Geotechnical Meeting NGM-92, Vol. 1, 19-24.
- Kamei, T e Iwasaki, K. (1995). *Evaluation of undrained shear strength of cohesive soils using flat dilatometer*. Soils and Foundations, Vol. 35, n° 2.
- Lacasse, S. (1986). *Interpretation of Dilatometer Test*. Final Report on In Situ Site Investigation Techniques and Interpretation for Offshore Practice. Norwegian Geotechnical Inst. Sept.
- Marchetti, S. (1975). *A New in situ Test for the Measurement of Horizontal Soil Deformability*. Proc. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE Sepec. Conf. Raleigh, V 2.
- Marchetti, S. (1980). *In Situ Tests by Flat Dilatometer*. ASCE Jnl GED, Vol. 106, No. 3, Mar, 299-321.
- Marchetti, S. & Totani, G. (1989). *C_h Evaluations from DMTA Dissipation Curves*. Proc. XII ICSMFE, Rio de Janeiro, Vol. 1, 281-286.
- Marchetti, S., Totani, G., Calabrese, M. & Monaco, P. (1991). *P-y curves from DMT data for piles driven in clay*. Proc. 4th Int. Conf. on Piling and Deep Foundations, DFI, Stresa, Vol. 1, 263-272.
- Marchetti, S. (1997). *The Flat Dilatometer: Design Applications*. Proc. Third Int. Geotechnical Engineering. Conference, Cairo University, Keynote lecture, 421-448.
- Marchetti, S. (1999a). *The Flat Dilatometer and its applications to Geotechnical Design*. Presentation at the International Seminar on the DMT held at the Japanese Geotechnical Society, Tokyo, 12 Feb 1999, 80 pp.
- Marchetti, S. (1999b). *On the calibration of the DMT membrane*. L'Aquila University, Italy, Unpublished report (March 1999).
- Marchetti, S. (1999c). *Sand liquefiability assessment by DMT*, L'Aquila University, Italy, Unpublished report (May 1999).
- Marchetti 2001 TC16 (2001) - Marchetti S., Monaco P., Totani G. & Calabrese M. *The Flat Dilatometer Test (DMT) in soil investigations*. A Report by the ISSMGE Committee TC16. Proceedings IN SITU 2001, Intl. Conf. On In situ Measurement of Soil Properties, Bali, Indonesia.
- Massarsch, K.R. (1994). *Settlement Analysis of Compacted Granular Fill*. Proc. XIII ICSMFE, New Delhi, Vol. 1, 325-328.
- Nash, D.F.Y., Powell, J.J.M. & Lloyd, I.M. (1992). *Initial investigations of the soft clay test site at Bothkennar*. Géotechnique 42, No. 2, 163-181.
- Pasqualini, E. & Rosi, C. (1993). *Esperienze relative ad un intervento di vibroflottazione*. Atti Riunione annuale dei Ricercatori di Ingegneria Geotecnica del CNR, Roma, 237-240.
- Reyna, F. & Chameau, J.L. (1991). *Dilatometer Based Liquefaction Potential of Sites in the Imperial Valley*. 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geot. Earthquake Engrg. and Soil Dyn., St. Louis. May
- Robertson, P.K., Davies, M.P. & Campanella, R.G. (1987). *Design of Laterally Loaded Driven Piles Using the Flat Dilatometer*. Geot. Testing Jnl, Vol. 12, No. 1, 30-38.
- Robertson, P.K. (1998). *Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test*. Canad Geot. J., Vol. 35, No. 3, 442-459.
- Schmertmann, J.H. (1986). *Dilatometer to compute Foundation Settlement*. Proc. In Situ '86, ASCE Spec. Conf., Virginia Tech, Blacksburg, June, 303-321.
- Schmertmann, J.H. (1986). *CPT/ DMT Quality Control of Ground Modification at a Power Plant*. Proc. In Situ '86, ASCE Spec. Conf., Virginia Tech, Blacksburg, VA, June, 985-1001.
- Tanaka, H. & Tanaka, M. (1998). *Characterization of Sandy Soils using CPT and DMT*. Soils and Foundations, Japanese Geot. Soc., Vol. 38, No. 3, 55-65.
- Totani, G., Calabrese, M., Marchetti, S. & Monaco, P. (1997). *Use of in situ flat dilatometer (DMT) for ground characterization in the stability analysis of slopes*. Proc. XIV ICSMFE, Hamburg, Vol. 1, 607-610.
- Totani, G., Calabrese, M. & Monaco, P. (1998). *In situ determination of ch by flat dilatometer (DMT)*. Proc. First International Conference on Site Characterization (ISC '98), Atlanta, 19 - 22 April, Vol. 2, pp. 883-888.
- Totani, G., S. Marchetti, P. Monaco y M. Calabrese (2001) *Use of the Flat Dilatometer Test (DMT) in geotechnical design*, Proc. Intl. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, IN SITU 2001, Bali, Indonesia, May 2001.
- Van Impe, W.F., De Cock, F., Massarsch, R. and Menge', P. (1994). *Recent Experiences and Developments of the Resonant Vibrocompaction Technique*. Proc. XIII ICSMFE, New Delhi, Vol. 3, 1151-1156.