

El Dilatómetro Sísmico (SDMT) para ensayos de suelos *in situ*

S. Marchetti

silvano@marchetti-dmt.it

Universidade L'Aquila, L'Aquila, Italia

D. Marchetti

diego@marchetti-dmt.it

Studio Prof. Marchetti, Roma, Italia

RESUMEN: En las últimas décadas hemos sido testigos de una mutación importante de pruebas de laboratorio a ensayos de campo a tal punto que hoy en día los ensayos *in situ* constituyen generalmente la mayor parte de una investigación geotécnica. Las recomendaciones presentadas en el Estado Actual del Conocimiento del Congreso Internacional de Ingeniería Geotécnica en 2009 señalan que las pruebas de campo de penetración directa, tales como la Prueba de Penetración de Cono (CPT) y la Prueba con Dilatómetro Plano (DMT), resultan ensayos *in situ* rápidos y muy convenientes para investigaciones rutinarias del subsuelo. El objetivo de este trabajo es describir la prueba DMT, la información obtenida y las aplicaciones en ingeniería. El SDMT, es un DMT con un módulo sísmico agregado para medir también la velocidad de ondas de cortante, V_s . Tanto el DMT como el SDMT pueden resultar particularmente útiles en proyectos donde la rigidez del suelo y las predicciones de asentamientos resultan críticas para el diseño.

Palabras clave: DMT – SDMT – In Situ – Dilatómetro – Asentamientos

ABSTRACT: : In the last decades we have assisted at a considerable shift from laboratory testing to in situ testing, to the point that, today, in situ testing is often the major part of a geotechnical investigation. Recommendations given in the State of the Art at the last Geotechnical World Conference in 2009 indicate that direct-push in situ tests, such as the Cone Penetration Test (CPT) and the Flat Dilatometer Test (DMT), are fast and very convenient in situ tests for routine site investigation. Scope of this paper is to describe the DMT, the obtained information and engineering applications. The paper also describes the more recently developed Seismic Dilatometer (SDMT). The SDMT is a DMT with an add-on seismic module for measuring also the shear wave velocity V_s . DMT and SDMT may be particularly helpful in projects where soil stiffness and settlements predictions are critical to the design

Key Words: DMT – SDMT – In Situ – Dilatometer – Settlements

INTRODUCCIÓN

El Dilatómetro Plano (DMT) es una herramienta para pruebas *in situ* desarrollada hace cerca de cuatro décadas (Ref. [1], [4]). Su uso ha ido en aumento constante con el correr de los años y se emplea en prácticamente todos los países industrializados. Ha sido estandarizado por la ASTM Ref. [3] y el Eurocode Ref. [4].

Algunas de las características distintivas del DMT se describen a continuación:

- El DMT es un ensayo de penetración directa. Como tal, tiene la gran ventaja de no requerir de un sondeo previo.
- El DMT, siendo una prueba de carga lateral, proporciona información sobre la rigidez del suelo, información que no se puede obtener a partir de las pruebas de penetración, que esencialmente miden las características de “ruptura”, con lo cual se obtiene únicamente información acerca de la resistencia. Por otro lado, las distorsiones causadas por la sonda del DMT son apreciablemente menores que la alteración ocasionada por las puntas cónicas.
- El equipo DMT es portátil, fácil de usar y independiente del operador y repetible.
- El DMT proporciona un “índice de la historia de esfuerzos”. La historia de esfuerzos como tal no se utiliza en el diseño; sin embargo, su conocimiento es de sumo interés porque tiene una influencia dominante en el comportamiento del suelo.

En lo que se refiere al SDMT, el módulo sísmico interconstruido ha agregado a los parámetros medibles por el DMT la medición de la velocidad de ondas de cortante, V_s . Este parámetro se mide actualmente cada vez más por las siguientes razones:

- La necesidad cada vez más frecuente de análisis sísmicos, para los cuales V_s es un parámetro básico de entrada.
- En el recientemente introducido reglamento sísmico Eurocode 8 se recomienda la determinación de V_s en los primeros 30 m de profundidad de todos los sitios de construcción ubicados en zonas sísmicas.
- El SDMT proporciona la rigidez G_0 stiffness bajo deformaciones pequeñas (el módulo de cortante es igual a $G_0 = \rho V_s^2$) así como la rigidez para deformaciones operativas (representada por el módulo restringido M_{DMT}). Esos dos valores de la rigidez pueden servir de orientación al seleccionar las curvas $G-\gamma$ curves, es decir, la disminución del módulo de cortante G en función de la deformación por cortante γ .

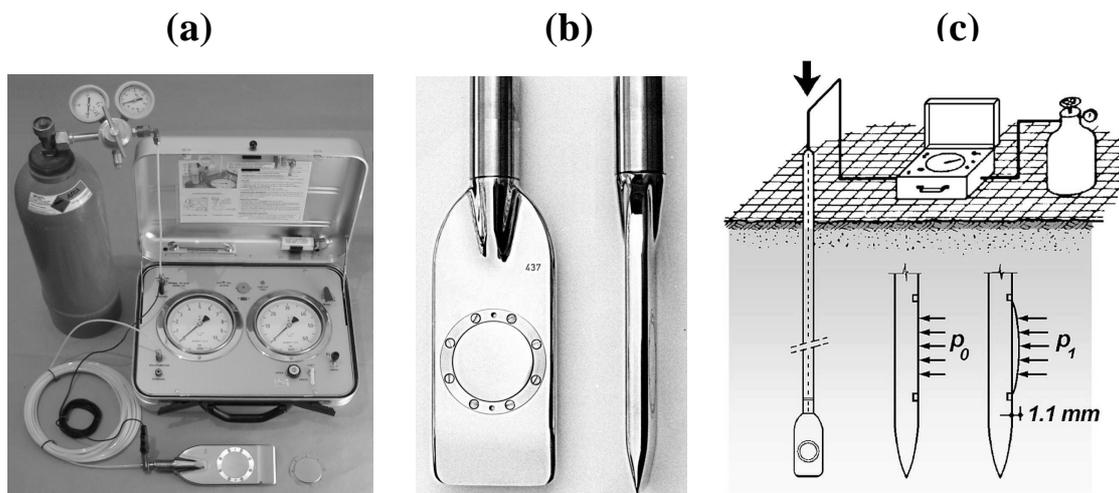


Figura. 1. Dilatómetro plano: (a) Equipo (b) Cuchilla del Dilatómetro (c) Diagrama prueba DMT.

PRUEBAS CON EL DILATÓMETRO (DMT)

El dilatómetro plano está formado por una cuchilla de acero que contiene una delgada membrana circular expandible de acero montada en una de sus caras. Estando en reposo, la membrana queda al ras con la superficie plana de la cuchilla que la rodea. La cuchilla está conectada, mediante una manguera electro-neumática que corre a lo largo de las barras de hincado, a una caja de control en la superficie (Fig. 1 a,b,c).

La unidad de control está equipada con manómetros, una señal audiovisual, una válvula de regulación de la presión del gas (proporcionado por un tanque) y válvulas de escape. La cuchilla se introduce en el terreno usando equipo de campo convencional, es decir, por penetración estática (al igual que en la prueba de penetración de cono CPT) o por penetración dinámica/percusión (equipos de perforación para un sondeo SPT convencional). La prueba se inicia introduciendo la cuchilla del dilatómetro verticalmente en el terreno. Cuando la cuchilla ha alcanzado la profundidad de prueba deseada se suspende la penetración. El suelo presiona la membrana contra la cuchilla emitiendo una señal acústica en la superficie. Entonces, el operador infla la membrana y toma, en un lapso de 30 segundos dos lecturas: la presión *A*, necesaria para justamente empezar a desplazar la membrana (presión de ‘despegue’) y la presión *B*, requerida para empujar el centro de la membrana una distancia de 1.1 mm contra el suelo. Se puede también tomar opcionalmente una tercera lectura *C* (‘presión de cierre’) al desinflar lentamente la membrana justamente después de alcanzar la presión *B* y regresar la cuchilla a su posición original. Se continúa hincando la cuchilla hasta alcanzar la siguiente profundidad de prueba, en incrementos típicos de avance de 20 centímetros.

Las lecturas de presión *A* y *B* obtenidas en el campo se corrigen para tomar en cuenta la rigidez de la membrana. La interpretación se presenta a continuación. En primer lugar las lecturas de campo corregidas se convierten en los parámetros intermedios de DMT conocidos como I_D , K_D y E_D (índice del material, índice de esfuerzo horizontal y módulo del dilatómetro, respectivamente). Luego se convierten I_D , K_D y E_D , mediante correlaciones de uso común, en: módulo confinado M , resistencia al esfuerzo cortante no drenada C_u , K_o (arcillas), OCR (arcillas), ángulo de fricción interna ϕ' (arenas) y peso volumétrico aparente. Se pueden estimar los coeficientes de consolidación y de permeabilidad mediante la realización de pruebas de disipación (Ref. [5]).

Un ejemplo de los perfiles obtenidos mediante el DMT (y SDMT) se muestra en la Fig. 3, donde:

- I_D es el índice del material, que proporciona información acerca del tipo de suelo (arena, limo, arcilla)
- M es el módulo confinado vertical drenado (bajo esfuerzo geoestático)
- C_u es la resistencia al esfuerzo cortante no drenado
- K_D es el Índice de Esfuerzo Horizontal. El perfil de K_D es similar en forma al perfil de la relación de sobreconsolidación OCR . Un valor $K_D \approx 2$ equivale en arcillas a $OCR = 1$; $K_D > 2$ indica preconsolidación. El perfil de K_D a menudo proporciona, a primera vista, el conocimiento de la historia de esfuerzos del depósito.

Más información detallada acerca del equipo DMT, el procedimiento de prueba y todas las fórmulas de interpretación se puede consultar en el informe amplio preparado por el comité técnico ISSMGE TC16 Ref. [6].

PRUEBAS CON EL DILATÓMETRO SÍSMICO (SDMT)

El SDMT es la combinación del dilatómetro plano con un módulo sísmico agregado para la medición de la velocidad de ondas de cortante (Ref. [7], [8]). El módulo sísmico (Fig. 2a) es un elemento cilíndrico colocado encima de la cuchilla DMT, equipado con dos receptores localizados a 0.5 m de distancia. Cuando se genera una onda de cortante en la superficie, llega primero al receptor superior y luego, transcurrido un retraso, al receptor inferior. Los sismogramas generados por los dos receptores, una vez amplificados y digitalizados, se transmiten a una PC en la superficie, que determina el retraso. La velocidad V_s se obtiene (Fig. 2b) como la relación entre la diferencia en distancia entre la fuente y los dos

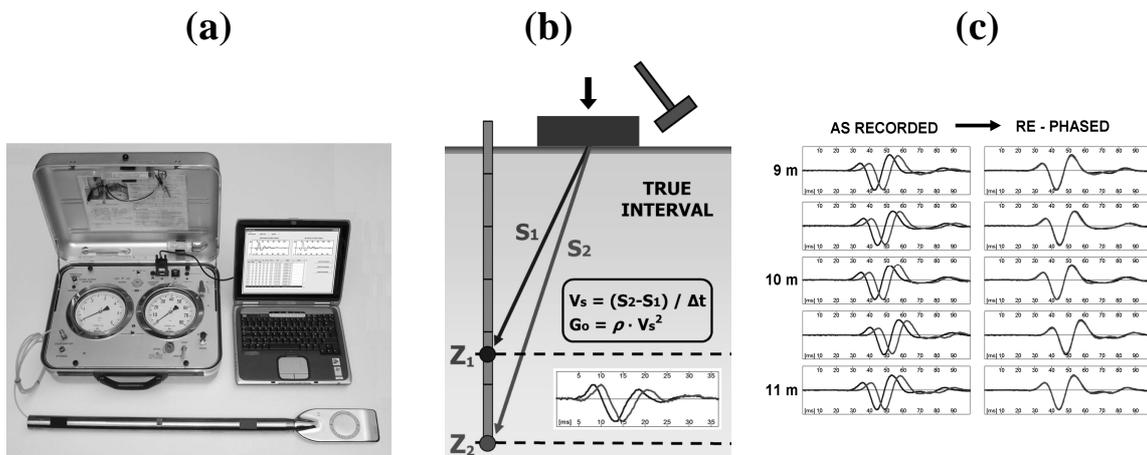


Figura 2. Dilatómetro sísmico: (a) Cuchilla del DMT y módulo sísmico; (b) Diagrama esquemático de la prueba con el dilatómetro sísmico, y (c) Ejemplo de sismogramas registrados al instante (izq) y después de ser traslapados (der).

receptores (S2 - S1) y el retraso entre el primer receptor y el segundo (Δt). Utilizar dos receptores evita la posible imprecisión en la determinación del “tiempo cero” al momento del impacto del martillo que a veces se observa en la configuración con un solo receptor dentro del pseudointervalo. Por otro lado, el par de sismogramas registrado por los dos receptores para una cierta profundidad de prueba corresponde al mismo impacto del martillo y no a diferentes golpes en serie, no necesariamente idénticos. De ahí que la repetibilidad de las mediciones de V_s mejora considerablemente (repetibilidad observada de $V_s \approx 1\%$, es decir, unos cuantos m/s). Las mediciones de V_s se toman a cada 0.5 m de profundidad.

La fuente de ondas de cortante en la superficie es un martillo de péndulo (≈ 10 kg) que golpea horizontalmente a una base en forma de paralelepípedo empujada verticalmente contra el suelo (con el peso del camión) y orientada con su eje mayor paralelo al eje de los receptores de tal forma que puedan ofrecer la sensibilidad más alta a la onda de cortante.

En la Fig. 2c se muestra un ejemplo de los sismogramas obtenidos por el SDMT en varias profundidades de prueba en una obra en Fucino. La Fig. 3 ilustra un ejemplo de resultados con el SDMT. El quinto diagrama es el perfil de V_s obtenido por el módulo sísmico.

SUELOS PROPIOS PARA ENSAYARSE

Los suelos que se pueden investigar mediante el equipo DMT varían entre suelos extremadamente blandos, suelos duros y rocas blandas. El DMT resulta adecuado para arenas, limos y arcillas, cuyas partículas son pequeñas comparadas con el diámetro de la membrana (60 mm). No se recomienda para grava y roca. Sin embargo, la cuchilla es lo suficientemente robusta para atravesar capas de grava con un espesor del orden de 0.5 m. Las lecturas del DMT son muy precisas incluso en suelos de consistencia prácticamente líquida. Por otro lado, la cuchilla es muy robusta (puede soportar con seguridad fuerzas de empuje de hasta 250 kN) e incluso puede penetrar roca blanda. Las arcillas se pueden ensayar entre valores de C_u de 2 a 4 kPa hasta valores de 1000 kPa (margas). El intervalo de variación del módulo M medible oscila entre 0.4 MPa y 400 MPa (TC16, 2001).

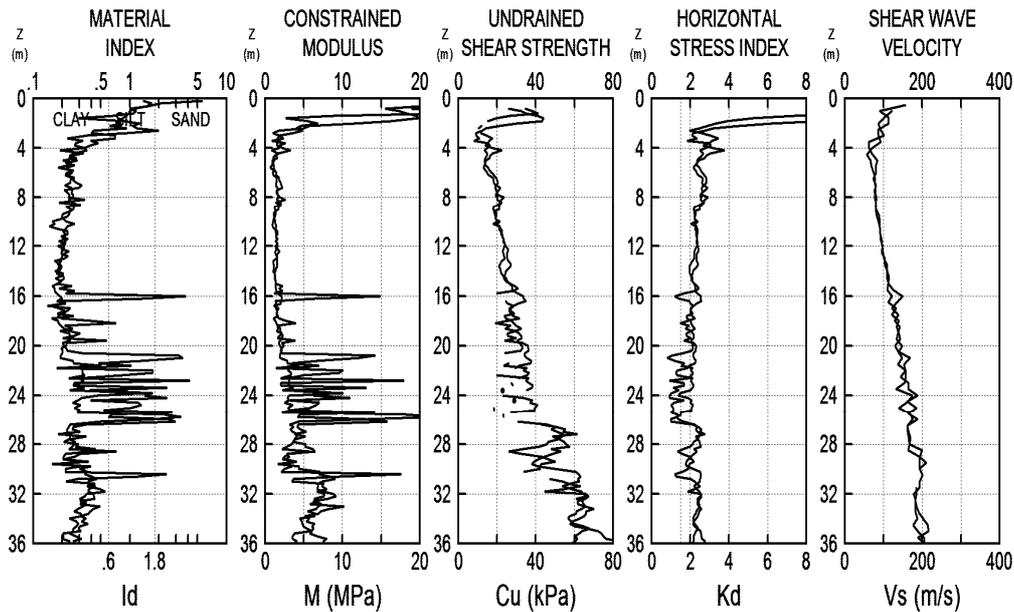


Figura 3. Ejemplo de resultados de SDMT (a partir de dos DMT cercanos entre sí).

APLICACIONES A PROBLEMAS DE INGENIERÍA

Diseño por medio de parámetros

Con los resultados de campo, se obtienen principalmente la resistencia al esfuerzo cortante no drenada, C_u , y el módulo confinado, M , para evaluar la capacidad de carga, los asentamientos, etc.

Asentamientos de cimentaciones superficiales

La predicción de asentamientos de cimentaciones superficiales es la aplicación principal del DMT, sobre todo en arenas en las que no se pueden recuperar muestras inalteradas.

Los asentamientos se calculan generalmente mediante la fórmula unidimensional (Fig. 4a) :

$$S_{1-DMT} = \sum \frac{\Delta\sigma_v}{M_{DMT}} \Delta z \quad (1)$$

calculando $\Delta\sigma_v$ de acuerdo con Boussinesq y estimando el módulo confinado M_{DMT} mediante la prueba DMT. Obsérvese que la fórmula (1), basada en elasticidad lineal, calcula un asentamiento proporcional a la carga y no es posible obtener una predicción no lineal. El asentamiento estimado se considera el *asentamiento en "condiciones de trabajo"* (es decir, para un factor de seguridad $F_s = 2.5$ a 3.5).

También se puede notar que el asentamiento estimado de esta manera es el asentamiento primario (es decir, el neto entre inmediato y secundario).

La validez del método ha sido confirmada por un gran número de concordancias observadas entre los asentamientos medidos y los calculados con DMT. La buena capacidad de predicción del DMT se considera que se debe a que: (a) Las cuñas distorsionan menos el suelo que los conos (Fig. 4b); (b) El módulo de una prueba de minicarga (por la membrana) está inherentemente mucho más relacionada con el módulo del suelo que la resistencia a la penetración. (c) DMT proporciona, además de E_d , también K_d , un indicador efectivo de la historia de esfuerzos, que es una información fundamental para predecir los asentamientos.

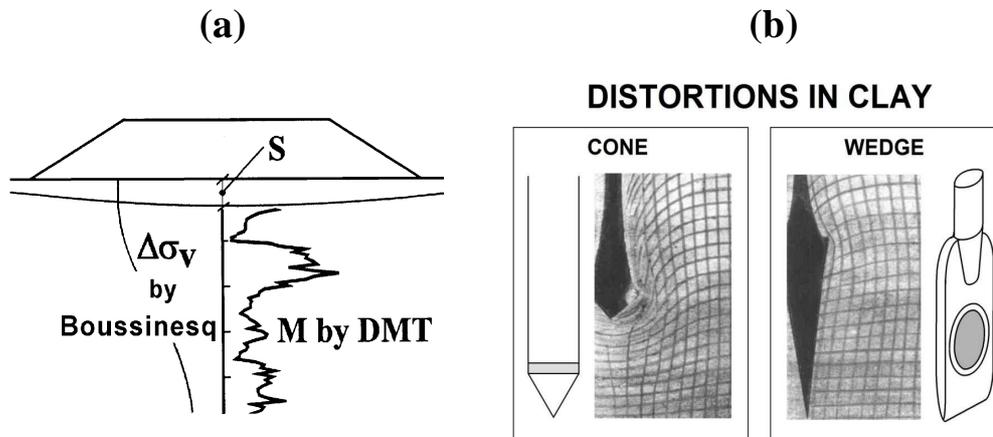


Figura 4. (a) Predicción de asentamientos con el DMT; (b) Distorsiones en el suelo causadas por sondas de diferente forma (Baligh y Scott Ref. [9]).

Pilotes cargados lateralmente

Los resultados de los sondeos con DMT permiten dibujar las curvas P - y a partir de los resultados de las pruebas DMT (Ref. [10], [11]). Varias validaciones independientes (NGI, Georgia Tech y pruebas en sedimentos de Virginia) han indicado que los dos métodos generan predicciones semejantes que concuerdan bastante bien con el comportamiento observado. Tomese en cuenta que todos los métodos se aplican al caso de carga monotónica aplicada por primera vez.

Detección de superficies de deslizamiento en arcilla OC

Totani *et al.* Ref. [12] desarrolló un método rápido para detectar superficies de deslizamiento activas o antiguas en taludes de arcilla sobreconsolidada (OC), tomando como base la inspección de los perfiles del indicador K_D . Básicamente, el método consiste en identificar zonas de arcilla normalmente consolidada (NC) en un talud que, de otra manera, exhibe un perfil OC. Los estratos de arcilla NC, remodelados por el deslizamiento y luego reconsolidados bajo el peso del suelo sobreyacente, se pueden identificar aplicando un valor $K_D \approx 2$ como identificador de las zonas NC.

Monitoreo de la densificación y del aumento de esfuerzos

Para monitorear los tratamientos de *densificación de suelos* se pueden realizar sondeos DMT antes y después del tratamiento. Schmertmann Ref. [13] y Jendebay Ref. [14] indican que el aumento porcentual en M_{DMT} es de aproximadamente el *doble* del incremento de q_t . En pocas palabras, la densificación hace crecer tanto a q_t como a M_{DMT} , pero M_{DMT} aumenta con mayor rapidez. El método DMT es adecuado para detectar variaciones pequeñas en el esfuerzo horizontal, por ejemplo, en el suelo relajado detrás de muros Milán durante la excavación.

Evaluación del potencial de licuación

La Fig. 5 muestra dos diagramas que proporcionan estimaciones de la llamada Relación de Resistencia Cíclica (CRR) de una arena limpia ($FC < 5\%$) mediante el uso combinado de DMT/SDMT (Ref. [15]). Obsérvese que el DMT proporciona una estimación de CRR basada en K_D , mientras que el SDMT proporciona además una segunda estimación independiente de CRR basada en V_s . La curva para estimar CRR a partir de K_D es la propuesta por Monaco *et al.* Ref. [16], y para estimar CRR a partir de V_s es la de Andrus y Stokoe Ref. [17].

Datos experimentales (Ref. [18]) y un amplio programa comparativo en cámara de calibración de Korea University (Ref. [19]) han mostrado que K_D es considerablemente más sensible que q_t a la historia de esfuerzos (incluyendo el *envejecimiento*). En contraste, q_t es “casi independiente del estado de deformaciones histórico a lo largo de la línea K_0 ” Ref. [20] y “no es muy sensible a la historia de esfuerzos” Ref. [21]. Sin embargo, la historia de esfuerzos es importante para el fenómeno de licuación debido a que con éste se aumenta apreciablemente el valor de CRR . La estimación de CRR a partir de la prueba CPT sin contar con la historia de esfuerzos trae como resultado una amplia dispersión. Consultese, por ejemplo, Baldi *et al.* (1985) Ref. [20]: “*Reliable predictions of sand liquefiability... require some new in situ device [other than CPT or SPT], more sensitive to effects of past stress-strain histories*” (Predicciones confiables de la licuación de arenas... justifican algún nuevo dispositivo de pruebas *in situ* [diferente al CPT o al SPT] que sea más sensible a los efectos de historias anteriores de esfuerzo-deformación). Debido a que la historia de esfuerzos es un parámetro fundamental para la determinación del CRR , no es de extrañar que, en ausencia de ésta, las correlaciones CPT- CRR tengan una gran dispersión. La mayor sensibilidad de K_D a la historia de esfuerzos sugiere que K_D pudiera tener una relación más estrecha con CRR que la existente para q_t .

En investigaciones recientes Yu Ref. [22] ha identificado la relación entre K_D y el parámetro de estado ψ (ψ = distancia vertical entre la línea de estado actual y la de estado crítico en la presentación convencional $e - \ln p'$ para el mismo esfuerzo normal medio efectivo p'). El parámetro ψ gobierna la tendencia de una arena a aumentar o disminuir de volumen ante esfuerzos cortantes por lo que ψ está íntimamente relacionado con la resistencia a la licuación CRR . Por lo tanto, la relación anterior $K_D - \psi$ constituye otro elemento en el que se apoya la probabilidad de una buena relación $K_D - CRR$. De hecho, a pesar de la fuerte relación $\psi - CRR$, incluso ψ es un indicador imperfecto de CRR , ya que ψ es insensible a la historia de esfuerzos mientras que CRR aumenta con la historia de esfuerzos. No parecerá entonces ilógico esperar que K_D , siendo un parámetro relacionado con ψ , pero al mismo tiempo inclusivo de la historia de esfuerzos, la cual no existe para ψ , pudiera estar exclusivamente bien correlacionada con CRR .

Según se indicó anteriormente, el SDMT también proporciona una segunda estimación independiente de CRR , la cual se puede obtener a partir de V_s . En caso de diferencias entre las dos estimaciones de CRR , generalmente se le asigna un mayor valor a CRR (K_D), debido a que V_s es más bien insensible a la historia de esfuerzos. Además, V_s es una medición correspondiente a una deformación muy pequeña y se correlaciona desfavorablemente con un fenómeno de deformaciones mucho más grandes como es el caso de la licuación.

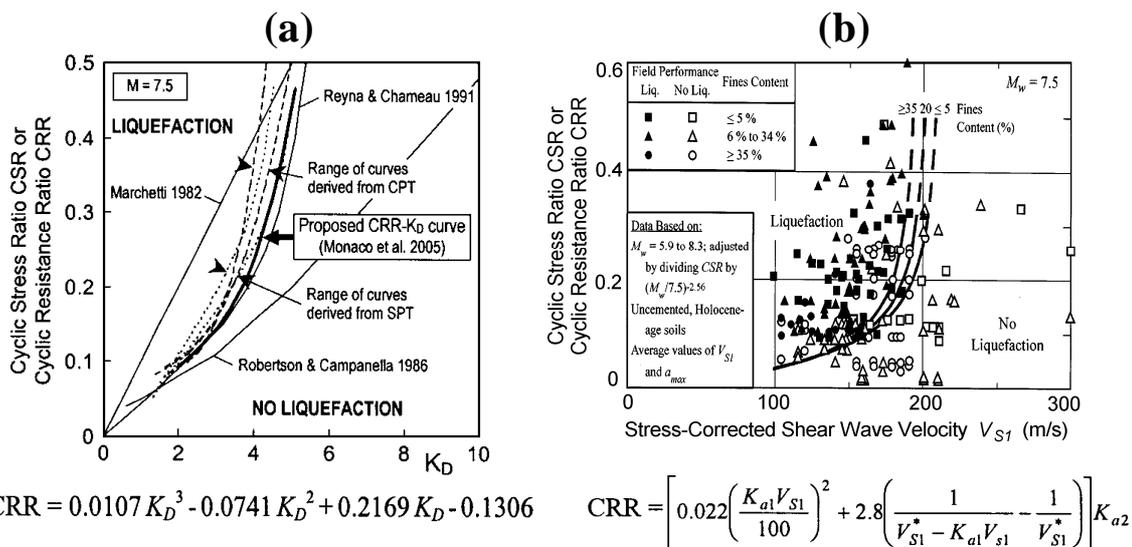


Figura 5. Curvas para evaluar CRR en arena limpia: (a) A partir de K_D (Monaco 2005 Ref. [16]; (b) A partir de V_s (Andrus & Stokoe 2000 Ref. [17])

Control de la compactación de la subrasante

La prueba DMT se ha usado como herramienta de rápida aceptación de la compactación de la subrasante en la que se apoyará la superestructura de la carretera (Ref. [23]). El perfil de aceptación M_{DMT} se puede establecer como sigue:

Ejecútense una cuantas pruebas preliminares DMT sobre la subrasante *aceptada* (tomando como base los métodos originalmente especificados, tales como Proctor, valor relativo de soporte (CBR) y pruebas carga de placa). Luego, dibújese un perfil M_{DMT} promedio.

El perfil de aceptación M_{DMT} podrá entonces usarse como un método económico de producción para el control de calidad de la compactación, quedando pendientes verificaciones ocasionales únicamente mediante los métodos originalmente especificados.

Una tendencia en el diseño actual de pavimentos es usar los módulos en lugar del CBR o de otros parámetros. Por lo tanto, los perfiles de M_{DMT} podrán proporcionar información alternativa útil al diseñador.

Uso del DMT para obtener parámetros del método de elementos finitos (FEM)

- La forma más simple estriba en adoptar el modelo elástico lineal, en el cual el módulo de Young E' se calcula como $E' \approx 0.8 M_{DMT}$ (Ref. [24]).
- La capacidad de predicción de asentamientos del equipo DMT se puede usar para obtener una verificación de la serie de parámetros FEM que el diseñador espera usar en su programa de computadora del FEM. Una forma de obtener esa verificación se describe a continuación. Ejecútese una prueba DMT en el lugar. Úsese el perfil de M_{DMT} para predecir el asentamiento para un caso simple de carga, por ejemplo, bajo un tanque circular uniformemente cargado que transmite una carga de 100 kPa. Luego hagase la misma predicción mediante el programa de cómputo FEM. Si los dos asentamientos calculados son muy diferentes, tal vez haga falta ajustar los parámetros FEM. La idea es usar la prueba DMT en sustitución de una prueba de carga de campo.
- Al adoptar el modelo de suelo duro Plaxis, el dato de entrada básico recomendado es $E_{50,ref}$ (E_{50} calculado a partir de una prueba triaxial, normalizada a 1 bar). La investigación amplia hecha por Schanz Ref. [25] ha demostrado que el valor de $E_{50,ref}$ se correlaciona con M y que, para muchas arenas cuarzosas, el valor de $E_{50,ref}$ se encuentra dentro del intervalo de variación de 15 a 75 MPa. Este intervalo es sorprendentemente similar al intervalo correspondiente a M_{DMT} que se encontrado en varias arenas. Por lo tanto, $E_{50,ref}$ y M_{DMT} tienen, cuando menos aproximadamente, valores semejantes. Por lo tanto, al seleccionar $E_{50,ref}$, se debería usar un valor no muy alejado de M_{DMT} .

CONCLUSIONES

El Dilatómetro es una herramienta moderna de penetración directa para la exploración de suelos. Entre sus ventajas principales destacan la portabilidad, la rapidez, la sencillez de su operación, la variedad de maneras de penetrar la cuchilla así como de los tipos de suelos para explorar. Con la unión del módulo sísmico con el DMT se pueden obtener perfiles de Vs además de Cu, M, OCR y otros parámetros en un mismo sondeo. Las correlaciones y los procedimientos utilizados son ampliamente utilizados en el mundo y tienen el respaldo de las Normas ASTM y del Eurocode.

REFERENCIAS (°)

- [1] 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 Spec. Conf., Raleigh, Vol. 2: 255-259.
- [2] Marchetti, S. (1980). "In Situ Tests by Flat Dilatometer". Jnl GED, ASCE, 106, GT3 : 299-321.
- [3] ASTM D6635-01 (2001 & 2007). "Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer." Book of Standards, 14 pp.

- [4] Eurocode 7 (1997 & 2007). "Geotechnical Design - Part 2: Ground Investigation and Testing." EN 1997-2:2007.
- [5] Totani, G., Calabrese, M. & Monaco, P. (1998). "In situ determination of Ch by Flat Dilatometer (DMT)", Proc. First Intl Conf. On Site Characterization ISC '98, Atlanta, Georgia (USA) : 883-888.
- [6] TC16 (2001). "The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations". A Report by the ISSMGE Committee TC16. May 2001, 41 pp. Reprinted in Proc. 2nd Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington D.C. : 7-48.
- [7] Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G. & Marchetti, D. (2008). "In Situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT)" Proc. From Research to Practice in Geotechnical Engineering, ASCE Geotech. Spec. Publ. No. 180 (honoring J.H. Schmertmann) : 292-311.
- [8] Monaco, P., Marchetti, S., Totani, G. & Marchetti, D. (2009) "Interrelationship between Small Strain Modulus Go and Operative Modulus". International Symposium IS-Tokyo 2009 on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, 8 pp.
- [9] Baligh, M.M. & Scott, R.F. (1975). "Quasi Static Deep Penetration in Clays". ASCE Jnl GE, 101, GT11 : 1119-1133.
- [10] 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, Mar. : 30-38.
- [11] 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.
- [12] 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, 1 : 607-610.
- [13] Schmertmann, J.H., Baker, W., Gupta, R. & Kessler, K. (1986). "CPT/DMT Quality Control of Ground Modification at a Power Plant". Proc. In Situ '86, ASCE Spec. Conf. on "Use of In Situ Tests in Geotechn. Engineering", Virginia Tech, Blacksburg, ASCE Geot. Special Publ. No. 6 : 985-1001.
- [14] Jendeby, L. (1992). "Djuppäckning med Vibro-sond av typ Vibro-wing" (in Swedish) (Deep Compaction by Vibrowing), Nordic Geotechnical Meeting NGM-92, Vol. 1 : 19-24.
- [15] Monaco, P. & Marchetti, S. (2007). "Evaluating liquefaction potential by seismic dilatometer (SDMT) accounting for aging/stress history". Proc. 4th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering ICEGE, Thessaloniki, 12pp.
- [16] Monaco, P., Marchetti, S., Totani, G. & Calabrese, M. (2005). "Sand liquefiability assessment by Flat Dilatometer Test (DMT)". Proc. XVI ICSMGE, Osaka, 4: 2693-2697.
- [17] Andrus, R.D. & Stokoe, K.H., II. (2000). "Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity". Jnl GGE, ASCE, 126,11 : 1015-1025.
- [18] Marchetti S. (2010) "Sensitivity of CPT and DMT to stress history and aging in sands for liquefaction assessment", Proc. CPT 2010 Int.nl Symposium Huntington Beach, California.
- [19] Lee, M.J., Choi, S.K., Kim, M.T. & Lee, W (2011). "Effect of Stress History on CPT and DMT results in sand". Elsevier Engineering Geology 117 : 259-265.
- [20] Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M. & Pasqualini, E. (1985). "Penetration Resistance and Liquefaction of Sands". Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, 4 : 1891-1896.
- [21] Schnaid, F. (2009). "In Situ Testing in Geomechanics – the main tests". Taylor and Francis Group, London, 327 pp.
- [22] Yu, H.S. (2004). "In situ soil testing: from mechanics to interpretation". Proc. 2nd Int. Conf. on Site Characterization, ISC-2, Porto. 1 : 3-38.
- [23] Marchetti, S. (1994). "An example of use of DMT as an help for evaluating compaction of subgrade and underlying embankment", Internal Technical Note, 4pp.
- [24] Hamza, M. & Richards, D.P. (1995). "Correlations of DMT, CPT and SPT in Nile Basin Sediment", Proc. 11th Afr. Conf. SMFE, Cairo Egypt : 437-446.
- [25] Schanz, T. (1997) "Hardening Soil Model – Parameter Selection" Quoted in Plaxis Bulletin Oct. 1997, Column Vermeer.

(°) Muchas de las referencias se puede descargar desde el sitio www.marchetti-dmt.it