

# Determinación de la resistencia al corte de una arena limpia mediante ensayo de Dilatómetro Plano (DMT) Shear strength determination of clean sand with Flat Dilatometer Test (DMT)

## INFORMACIÓN DEL ARTICULO

**Mauro Poblete<sup>1</sup>, Karen Leal<sup>1</sup>**

Historial del  
artículo:

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción.  
**mauro@ucsc.cl, teléfono: 56-41-2345047, fax: 56-41-2345300**

Recibido  
16-06-2015  
Aceptado  
19-11-2015  
Publicado  
09-12-2015

## Resumen

---

El Dilatómetro Plano (DMT) es un equipo de exploración del terreno desarrollado en la década de los 70. Detrás de un principio de funcionamiento extraordinariamente sencillo, que consiste en inflar una membrana hasta alcanzar los 1,1 mm de deformación horizontal, existe la posibilidad de obtener valiosa información de las características del subsuelo su densidad, clasificación y los parámetros de resistencia al corte necesarios para modelar el suelo mediante modelos constitutivos como Hard Soil Model por ejemplo. Se presentan los resultados de un ensayo DMT realizado en una arena limpia. Se obtienen los parámetros de resistencia al corte y se comparan con los resultados obtenidos mediante ensayos de corte directo realizados a la misma arena.

Palabras Claves:  
Arena Limpia  
Dilatómetro Plano  
DMT  
Resistencia  
al corte

## Abstract

---

The Flat Dilatometer (DMT) is a in-situ exploration device developed in the 70's. The operating is simple. It is inflating a membrane to reach a horizontal deformation of 1,1 mm. Valuable geotechnical information can be obtained. Density, shear strength, and other parameters to model the soil by constitutive models for example Hard Soil Model. DMT results on a clean sand are presented. The shear strength parameters are obtained and compared with results of shear test performed of the same sand.

Article history:

Received  
16-06-2015  
Accepted  
19-11-2015  
Available  
09-12-2015

Keywords:  
Clean Sand  
DMT  
Flat Dilatometer  
Shear Strength

## 1. Introducción

El Dilatómetro Plano (DMT) fue desarrollado originalmente por Marchetti [1] y su utilización ha sido estandarizada por la ASTM [2] y por el Eurocode [3]. De los diferentes ensayos de penetración existentes, una de las principales ventajas del DMT es la de no requerir un sondeo previo, es un equipo portátil, de fácil utilización y que permite obtener resultados independientes del operador donde la repetitividad está garantizada [4].

El hecho de que sea un ensayo de carga lateral proporciona información inmediata de la rigidez del suelo. La distorsión ocasionada por la punta es menor para el DMT que para el Cone Penetration Test (CPT) [5]. Además permite obtener un índice de la historia de tensiones del terreno cuyo conocimiento es de sumo interés porque influye en el comportamiento del mismo [6].

El ensayo de dilatómetro consiste en penetrar una hoja plana ubicada al final de una serie de barras, mediante un equipo de penetración similar a los utilizados en ensayos SPT y CPT.

Una vez alcanzada la profundidad de ensayo requerida, la membrana circular delgada de acero que se ubica a un lado de la hoja, se infla, desplazándose horizontalmente contra el terreno, como se ilustra en la Figura 1. Esta expansión se efectúa mediante cualquier gas no inflamable, no tóxico, siendo el nitrógeno comprimido y el Oxígeno los más utilizados [4].

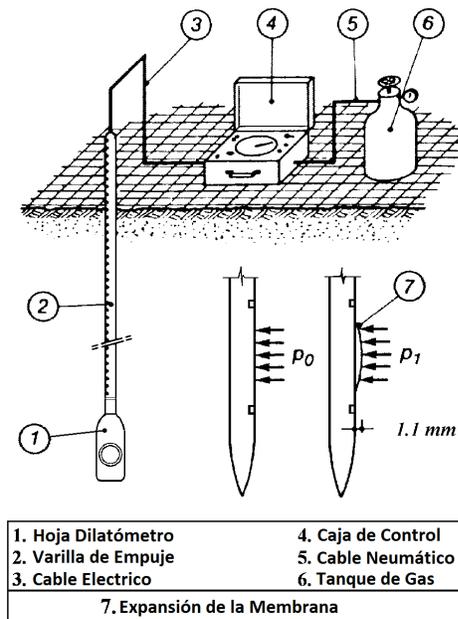


Figura 1. Esquema de ejecución de ensayo DMT. [4]

Una gran variedad de suelos se pueden investigar mediante el equipo DMT. Desde los suelos extremadamente blandos, hasta suelos densos e incluso rocas blandas [4]. El DMT resulta adecuado para arenas, limos y arcillas, cuyas partículas son pequeñas comparadas con el diámetro de la membrana de 60 mm. No se recomienda su utilización para grava y roca. Sin embargo, la hoja es lo suficientemente resistente para atravesar capas de grava con un espesor del orden de 0,5 m.

El DMT es un ensayo de exploración del terreno cuyo uso se encuentra extensamente documentado y se extiende a lo por mas de 50 países alrededor del mundo.

Se muestra a continuación el método de análisis de los resultados obtenidos en terreno y la formulación necesaria llegar a obtener a partir de dichos resultados los parámetros de interés ingenieril. Luego y a modo de ejemplo se presentan resultados de un ensayo realizado en una arena limpia de finos hasta una profundidad de 12 m para el cual se obtiene la variación del ángulo de fricción con la profundidad. Dicho resultado se compara con el resultado del ángulo de fricción obtenido mediante ensayos de corte directo tradicionales realizados a muestras remoldeadas de la misma arena.

## 2. Datos medidos, parámetros intermedios y correlaciones

Para obtener la resistencia al corte en terreno mediante el ensayo DMT se deben procesar las presiones de inflado  $p_0$  y  $p_1$  (Figura 1), que se obtienen en terreno.

### 2.1. Datos medidos

En terreno y mediante una serie de señales audibles de la caja de control (Figura 1), el operador obtiene las presiones de “cero deformación de la membrana (lectura A) y máxima deformación de la membrana (lectura B) como se muestra en el esquema de la Figura 2.

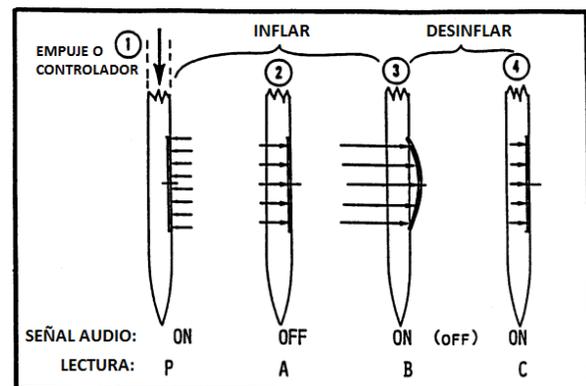


Figura 2. Lecturas durante la secuencia de ensayo DMT

Los datos (A y B) medidos en terreno para las diferentes profundidades debencorregirse por la rigidez de la membrana para determinar las presiones  $p_0$  y  $p_1$  de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2.

$$p_0 = 1.05(A - Z_m + \Delta A) - 0.05(B - Z_m - \Delta B) \quad (1)$$

$$p_1 = B - Z_m - \Delta B \quad (2)$$

Dónde:

$\Delta A, \Delta B$ : Corresponden a las correcciones por la calibración de la membrana que se realiza antes y después de cada ensayo en condiciones controladas.

$Z_m$ : Desviación del cero debida a la presión atmosférica.

### 2.2. Parámetros intermedios

A partir de los valores corregidos de  $p_0$  y  $p_1$  se pueden calcular los 3 parámetros intermedios del ensayo DMT:

El índice de material ID

El índice de esfuerzo Horizontal KD

El módulo del dilatómetro ED

El índice de material (3) está relacionado con el tipo de suelo y permite clasificarlo desde el punto de vista del comportamiento mecánico del medio. A pesar de que pueden presentarse algunas diferencias con los resultados obtenidos de un análisis granulométrico de todas formas una clasificación basada en el comportamiento mecánico muchas veces puede resultar más útil que la clásica clasificación por tamaño de las partículas utilizada en laboratorio. Por ejemplo, para el caso de arcillas de diferentes rigideces, el parámetro intermedio ID clasificará como limo a las que presenten una mayor rigidez. Esta caracterización, si bien es incorrecta desde un punto de vista del tamaño de las partículas, puede llegar a ser relevante desde el punto de vista del comportamiento mecánico.

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (3)$$

De acuerdo a [1] los valores de ID oscilan entre 0,1 y 10 y la clasificación obtenida a partir de dicho parámetro es:

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

El índice de esfuerzo horizontal depende de la tensión efectiva horizontal y se relaciona con la razón de sobreconsolidación (OCR) y permite entender la historia de tensiones del suelo [1 y 7].

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \quad (4)$$

El módulo DMT, ED se obtiene a partir de la teoría de la elasticidad. Sin embargo es un parámetro que por si mismo no debe utilizarse

como un módulo de deformación por la falta de información de la historia tensional. Por lo tanto debe utilizarse en combinación con KD e ID. No se debe confundir con el módulo de Young [4].

$$E_D = 34.7(p_1 - p_0)(4)$$

### 2.3. Parámetros geotécnicos

A partir de los parámetros intermedios presentados en 2.2 se pueden obtener rápidamente otros parámetros de interés en geotecnia y que permiten determinar la resistencia, deformabilidad e historia de tensiones de un suelo. Estos parámetros son los siguientes:

Peso unitario y estratigrafía

OCR y  $K_0$  en arcillas

Cu en suelos cohesivos

$\phi$  y D.R. en suelos granulares

MDMT (módulo edométrico) en suelos granulares y cohesivos

El peso unitario y la estratigrafía o tipo de suelo se determinan a partir de ID y ED mediante el ábaco que se muestra en la figura 3, desarrollado por Marchetti y Crapps [8].

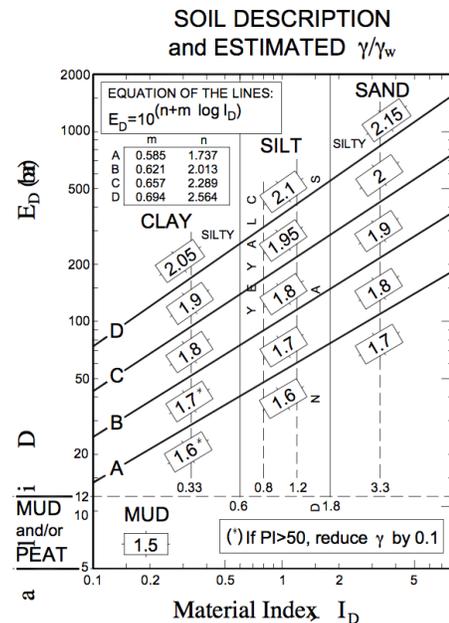


Figura 3. Ábaco para estimar el tipo de suelo y el peso unitario desarrollado por Marchetti y Crapps [8]. Las líneas A, B, C, D establecen fronteras entre los diferentes pesos unitarios. El índice de material establece los límites entre uno u otro tipo de suelo. Las cifras dentro de los rectángulos son el peso unitario aproximado del suelo en T/m<sup>3</sup>. Si  $PI > 50$ , las cifras en esta zona están sobredimensionadas en 0,10 T/m<sup>3</sup>.

El objetivo principal de este ábaco no son las estimaciones precisas del peso unitario, pero si la posibilidad de construir un perfil aproximado la tensión efectiva horizontal. El uso de este ábaco es se recomienda solamente sino se tiene información clara del sitio. Para el resto de los casos es recomendado estimar el peso unitario con los datos propios del lugar.

Los parámetros relacionados con suelos cohesivos se pueden encontrar en [4].

Para el caso de suelos granulares se puede determinar el ángulo de fricción  $\phi$  mediante dos métodos.

El primero [9] proporciona estimaciones simultaneas de  $\phi$  y  $K_0$  mediante la teoría de Durgunoglu y Mitchell, o utilizando el ábaco propuesto por Marchetti [9] de la figura 4, el cual permite estimar  $\phi$  a partir de  $K_0$  y la resistencia de punta  $q_c$  determinada a partir de Cone Penetration Test (CPT).

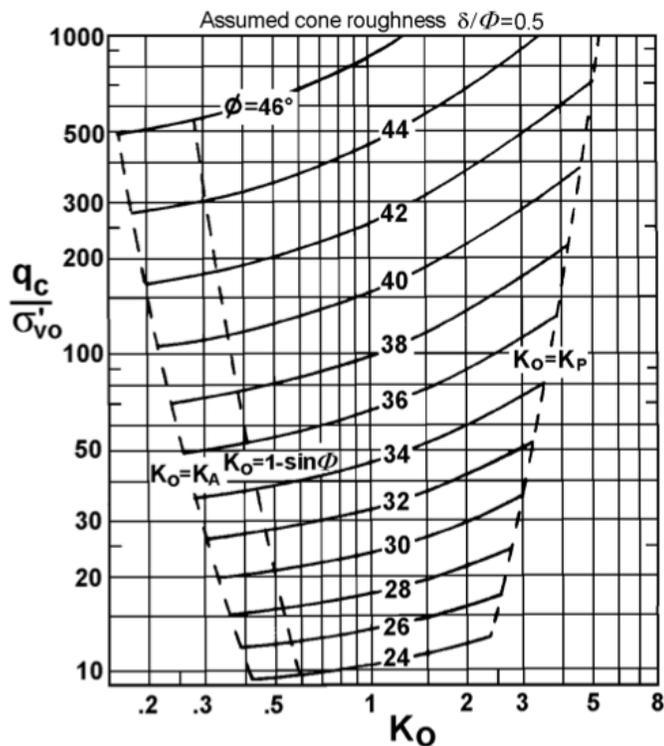


Figura 4. Ábaco  $q_c - K_0 - \phi$ . Equivalencia gráfica a partir de la teoría de Durgunoglu y Mitchell (propuesto por Marchetti [9]). Las líneas individuales para cada valor específico de  $\phi$  presentan un límite inferior para  $K_0$  establecido por el coeficiente activo de Rankine  $K_A$  y el límite superior dado por la condición pasiva  $K_p$ .

El segundo método se explica detalladamente en [10] y consiste en obtener  $\phi$  a partir de la ecuación que se muestra en la figura 5. Este resultado es de carácter conservador.

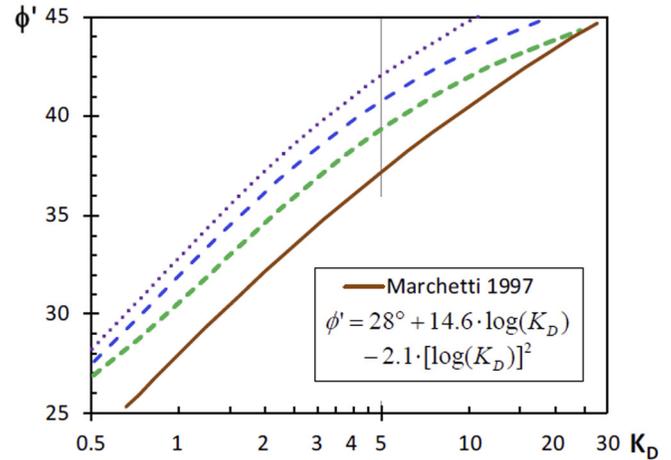


Figura 5. Determinación de  $\phi$  a partir de  $K_D$ [10]

La densidad relativa D.R. también se puede determinar a partir de  $K_D$  usando el ábaco de la Figura 6 válido para arenas no cementadas [11].

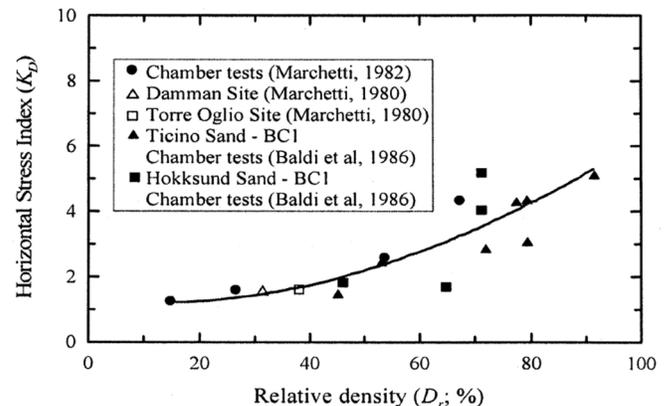


Figura 6. Densidad relativa D.R. a partir de  $K_D$ [11]

Finalmente el módulo edométrico MDMT corresponde al módulo vertical drenado (unidimensional) tangente a la presión de confinamiento  $\sigma'_{vo}$  del ensayo y equivale al determinado en el edómetro. La posibilidad que ofrece el ensayo DMT de determinar este parámetro en su estado confinado es uno de los principales aportes del ensayo.

El MDMT se obtiene a partir del parámetro intermedio  $E_D$  y un factor de corrección denominado  $R_M$  de acuerdo a 3.

$$M_{DMT} = E_D R_M \quad (5)$$

La Tabla 1 muestra las ecuaciones que definen  $R_M$ , donde se observa que  $R_M$  se encuentra en función de  $I_D$  y  $K_D$ . Además el valor de  $R_M$  aumenta con el aumento de  $K_D$ .

Si $I_D \geq 0.6$	$R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$
Si $I_D \geq 3$	$R_M = 0.5 + 2 \log K_D$
Si $0.6 < I_D < 3$	$R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_D$ con $R_{M,0} = 0.14 + 0.15 (I_D - 0.6)$
Si $K_D > 10$	$R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D$
Si $R_M < 0.85$	ajustar $R_M = 0.85$

Tabla 1: Determinación de  $R_M$

### 3. Resultados de ensayo DMT

Se realiza un ensayo DMT en un depósito de arena limpia de finos. La curva granulométrica así como los valores del coeficiente de uniformidad  $CC$ , de curvatura  $CCU$ , la gravedad específica  $G_s$  y la clasificación  $USCS$  se indican en la Figura 7.

El ensayo se realiza hasta una profundidad de 12 m obteniendo datos cada 2 m aproximadamente.

La Figura 8 resume los resultados obtenidos del ensayo, los cuales fueron corregidos y calculados de acuerdo a las ecuaciones y ábacos presentados en la sección anterior.

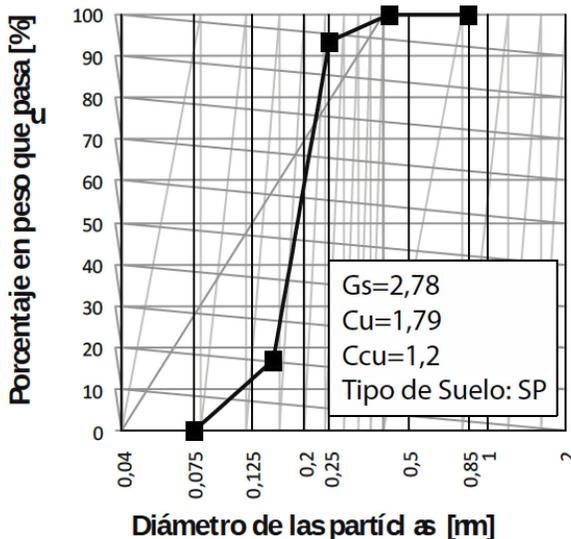


Figura 7. Curva granulométrica y propiedades de la arena estudiada.

En la Figura 8 se aprecia que los valores de  $p_0$  y  $p_1$  se incrementan con la profundidad así como la diferencia entre ambos  $\Delta P$ . El factor  $K_D$  se mantiene relativamente constante en valores alrededor de 2.

Se observa también que los valores de  $I_D$  son mayores que 1,8 por lo que de acuerdo al comportamiento mecánico del material estamos en presencia de arena en toda la profundidad. Los valores de  $E_D$  y  $M_{DMT}$  son prácticamente idénticos debido a que el factor de corrección  $R_M$  es cercano a 1.

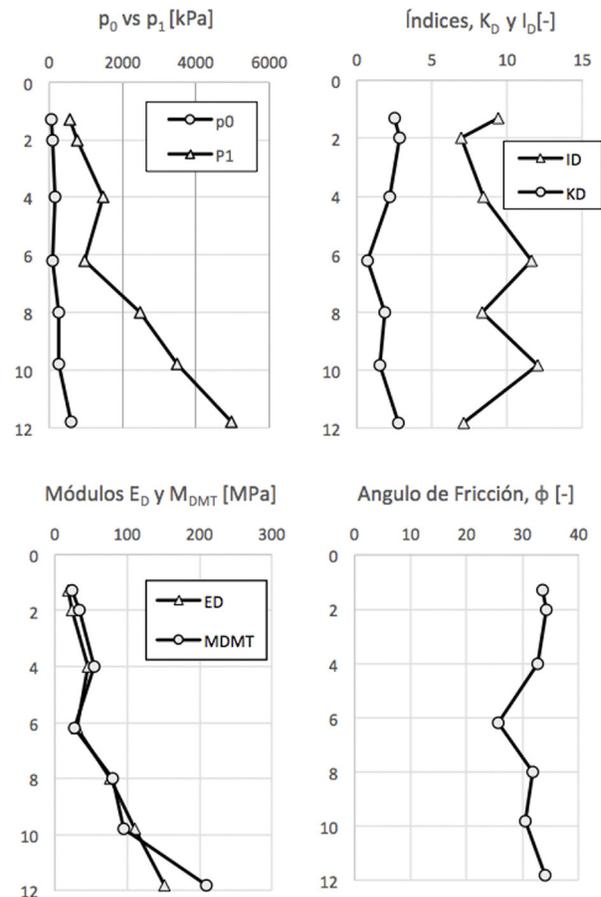


Figura 8. Resultados ensayo DMT en arena limpia

El ángulo de fricción se obtiene utilizando el segundo método presentado en la sección anterior [10] obteniendo valores conservadores de  $\phi$  que varían entre los 26 y los 34 grados.

Adicionalmente se realizan ensayos de corte directo a muestras remoldeadas a diferentes presiones normales. La Figura 9 muestra éstos resultados obteniendo un ángulo de fricción residual de 32 grados.

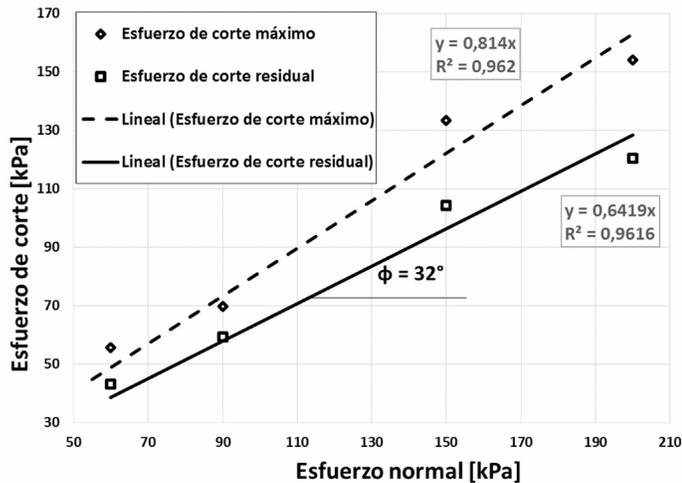


Figura 9. Resultados ensayo de corte directo en arena limpia

#### 4. Observaciones y conclusiones

Se presenta el ensayo de Dilatómetro Plano (DMT) y se describen su funcionamiento y características principales. Se destacan la facilidad y ventajas que presenta frente a otros ensayos de exploración del subsuelo. Se enumeran y explican los parámetros medidos en terreno  $p_0$  y  $p_1$ , los parámetros intermedios  $I_D$ ,  $K_0$  y  $E_D$ , y los parámetros geotécnicos que se pueden obtener a partir de correlaciones de los anteriores. Se presentan los resultados de un ensayo realizado en un depósito de arena limpia y se comparan con los resultados de un ensayo de corte directo realizado a muestras remoldeadas en laboratorio observándose que el resultado del ensayo DMT es una buena aproximación al momento de obtener el ángulo de fricción del material. El Dilatómetro Plano DMT es una excelente herramienta que permite obtener resultados confiables y rápidos de la resistencia al corte que en el futuro será utilizada con mayor frecuencia gracias a las ventajas que presenta.

#### 5. Referencias

- [1] Marchetti, S. 1980. In Situ Tests by Flat Dilatometer. Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, Vol. 106, Nº GT3, Proc. Paper 15290, p 299-321.
- [2] ASTM D6635. 2001 y 2007. Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer. Book of Standards, 14pp.
- [3] Eurocode 7 EN 1997-2:2007. 1996 y 2007. Geotechnical Design – Part 2: Ground Investigation and Testing.

[4] TC16. 2001. The DMT in soil investigations. A Report by the ISSMGE Committee TC16, pp 41

[5] Baligh, M.M. y Scott, R.F. 1975. Quasi Static Deep Penetration in Clays. Journal of the Geotechnical Engineering Division 101, No. 11, 1119-1133

[6] Marchetti, S., Marchetti, D. Y Villalobos, F. 2013. El Dilatómetro Sísmico SDMT para ensayos de suelos in situ. Obras y Proyectos 13, 20-29

[7] Baldi, G., Bellotti, R. Ghionna, V. Y 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.

[8] Marchetti, S. y Crapps, D.K. (1981). Flat Dilatometer Manual. Internal Report of G.P.E. Inc

[9] Marchetti, S. 1985. On the Field Determination of  $K_0$  in Sand. Discussion Sesión No. 2ª, Proc. XI IC SMFE, S. Francisco, Vol. 5, 2667–2673

[10] Marchetti, S. 1997. The Flat Dilatometer: Design Applications. Proc. Third Int. Geotechnical Engineering Conference. Cairo University, Keynote lecture. 421-448

[11] Reyna F. y 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