



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANUAL DE OPERACIÓN Y EJECUCIÓN DE ENSAYES
TRIAXIALES EN LA CÁMARA GCTS.**

INFORME

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

IVÁN ENRIQUE OREA VELÁZQUEZ

TUTOR: M.I. ÓSCAR J. LUNA GONZÁLEZ



MÉXICO, D.F. 2011

Dedico este trabajo a mis padres: Raúl Hernández Murillo y Rosa Zaragoza Pacheco que han sido, son y serán la base de mi educación; también lo dedico a mi esposa e hija que con su amor y cariño me impulsan a seguir adelante cada día.

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM

Mi segunda casa, mi alma máter de la cual me siento tan orgulloso de ser parte.

A la Facultad de Ingeniería

Porque en sus aulas he tenido la oportunidad de seguir el ejemplo de grandes ingenieros, de llevar siempre una actitud de hacer ingeniería de calidad y de vanguardia.

A mis Profesores

Porque me han enseñado a apreciar y respetar la naturaleza, a sentir el color moreno de nuestra piel, a disfrutar del sencillo hecho del saber, a emprender las cosas con actitud y que la solución a todos los problemas es más sencilla de lo que parece.

Al Ing. Óscar Luna y al Ing. César Dumas

Por la confianza que han depositado en mí. Sinceramente les agradezco todo el apoyo que me han brindado.

A mis amigos

Carmen, Rosario, Mauricio, Gabriel y Carlos, porque siempre me han apoyado en todo momento.

A Iván Orea Velázquez

Por su valiosa amistad y por impulsarme a seguir adelante cuando más lo necesitaba.

INDICE

INTRODUCCIÓN		5
I. OBJETIVOS		6
I.1. OBJETIVO GENERAL		6
I.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS		6
II. ANTECEDENTES		7
II.1. EXPLORACIÓN EN CAMPO		7
II.1.1. SPT (Standard Penetration Test), 1902		7
II.1.2. CPT (Cone Penetration Test), 1932		8
II.1.3. CPT (Electronic Cone Penetration Test), 1949		9
II.1.4. PMT (Pressuremeter), 1954		10
II.1.5. CPTu (Piezocone), 1974		11
II.1.6. SCPTu (Seismic Piezocone), 1986		12
II.1.7. DMT (Marchetti Dilatometer), 1975		13
II.1.8. SDMT (Seismic Dilatometer), 1988		14
III. SONDEOS CON DILATÓMETRO (DMT)		15
III.1. DEFINICIONES		15
III.1.1. Prueba del dilatómetro		15
III.1.2. Consola del dilatómetro		16
III.1.3. Cuchilla del dilatómetro		16
III.1.4. Tanque de gas		17
III.1.5. Regulador con manómetros		17
III.1.6. Mangueras		18
III.1.7. Membrana		18
III.1.8. Anillo metálico		19
III.1.9. Cilindros		19
III.1.10. Jeringa de calibración		20
III.1.11. Cable de tierra física		20
III.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO		20
III.2.1. Antes de salir a campo		20
III.2.2. “Check list rápido”		21
III.2.3. Durante o en el sitio de proyecto		22
III.2.4. Cambio de membrana		22
III.2.5. Calibración de la cuchilla		24
III.2.6. Instalación del equipo		26
III.2.7. Toma de lecturas		27
III.2.8. Después del sondeo		29
III.3. IMPORTANCIA DE LA EXACTITUD DE ΔA Y ΔB		29
III.4. RECOMENDACIONES		30



IV. RESULTADOS	32
V. CORRELACIONES	33
V.1. PARÁMETROS DIRECTOS	33
V.1.1. Determinación de P_0 y P_1	33
V.2. PARÁMETROS INTERMEDIOS	33
V.2.1. Índice de material, I_D (tipo de suelo)	33
V.2.2. Índice de esfuerzo horizontal, K_D	35
V.2.3. Módulo del dilatómetro, E_D	35
V.3. PARAMETROS INDIRECTOS	38
V.3.1. Peso unitario, γ (tipos de suelo)	38
V.3.2. OCR en arcillas	39
V.3.3. Indicaciones prácticas para estimar el OCR en arcillas	39
V.3.4. K_0 en arcillas	41
V.3.5. K_0 en arenas	41
V.3.6. Resistencia no drenada, c_u	41
V.3.7. Ángulo de fricción, ϕ	43
V.3.8. Módulo odométrico, M	43
V.3.9. Módulo de Young, E'	45
V.3.10. Módulo de cortante máximo, G_0	45
V.3.11. Coeficiente de consolidación, c_h	45
V.3.12. Coeficiente de permeabilidad, k_h	46
V.3.13. Presión de poro, u	46
VI. SIMILITUD CON OTROS SONDEOS	47
VI.1. PROYECTO "REFINERÍA MADERO, CIUDAD MADERO TAMAULIPAS"	47
VII. CONCLUSIONES	57
VII.1. VENTAJAS	57
VII.2. DESVENTAJAS	58
REFERENCIAS	59



INTRODUCCIÓN

El presente informe describe las actividades que realicé durante el periodo de mayo de 2011 a la fecha en la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en el Departamento de Mecánica de Suelos (DMS), como uno de los encargados del Equipo de Pruebas “In situ” (EPI).

El Departamento de Mecánica de Suelos de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC) de la Subgerencia de Geotecnia y Materiales (SGM) cuenta con un área de pruebas “In situ”, como su nombre lo dice, se encarga de la ejecución de todas las pruebas de campo con los diferentes dispositivos que se tienen: Piezocono, Cono Eléctrico, Dilatómetro, Dilatómetro Sísmico, Phicómetro, Presiómetro de Menard, Presiómetro Roctest, SPT Analyzer, Equipos para medir la integridad de las pilas (PIT), PANDA, además cuenta también con 2 Penetrómetros de 10 y 20 toneladas de empuje para el hincado del Piezocono, Cono Eléctrico, Dilatómetro y Dilatómetro Sísmico.

El Dilatómetro fue uno de los primeros equipos adquiridos por el DMS desde el 2006, y recientemente se han comprado dos más con la capacidad de medir las velocidades de onda cortante (Dilatómetro Sísmico).

El objetivo de este informe es presentar la experiencia profesional que he adquirido como Ingeniero Civil a lo largo de este tiempo y mostrar la aplicación de las pruebas con el equipo del Dilatómetro, como una valiosa herramienta para la caracterización geotécnica del subsuelo, que se requiere en el análisis y diseño geotécnico de las obras civiles.



I. OBJETIVOS

I.1. OBJETIVO GENERAL

- Dar un panorama global general acerca de la prueba de Dilatómetro (DMT) y de sus aplicaciones en los diferentes campos de la Ingeniería.

I.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir los pasos para la ejecución adecuada del DMT.
- Indicar el alcance, así como las limitaciones, que tiene este tipo de prueba.
- Mostrar la forma adecuada de interpretar los resultados que arroja la prueba del DMT, para luego obtener, a partir de correlaciones desarrolladas por diversos autores, los respectivos parámetros geotécnicos que se necesiten de acuerdo con los diferentes tipos de suelos.



II. ANTECEDENTES

II.1. EXPLORACIÓN EN CAMPO

Los ensayos “In situ” con equipos instrumentados se están convirtiendo en una herramienta muy importante para la evaluación y diseño geotécnico de obras con estructuras de gran magnitud, a través de una estimación rápida y confiable de los parámetros del subsuelo, sobre todo si están situados sobre terrenos donde la extracción de muestras representativas para hacer ensayos de laboratorio es difícil, por este motivo los ensayos “In situ” están tomando mucha fuerza en este campo y se usan cada vez más para hacer previsiones de asentamientos y estimación de resistencia.

Existen varios tipos de ensayos que permiten hacer este tipo de estimaciones, aunque algunos presentan inconvenientes importantes. A continuación se muestra un breve resumen sobre las características generales de diversos sondeos tradicionales y finalmente una descripción más detallada del dilatómetro de Marchetti.

II.1.1. SPT (Standard Penetration Test), 1902

El coronel Charles R. Gow (Gow Construction Co., Boston) inició en 1902 con la ejecución de sondeos exploratorios por medio de muestreadores hincados de 25 mm de diámetro. Hacia finales de 1920, este procedimiento fue estandarizado por Harry Mohr (Raymond Concrete Pile Co.), quien desarrolló un muestreador ligeramente de mayor diámetro e incorporó el registro de número de golpes por pie de penetración, usando un mazo de 140 libras y 30 pulgadas de caída dando lugar a la prueba SPT. El muestreador de Gow no era muy popular hasta que Karl Terzaghi lo descubrió. Terzaghi y Casagrande hicieron un gran esfuerzo para que el sistema SPT se adoptara por parte de la ASCE.

Las primeras correlaciones del SPT con otras propiedades del suelo fueron desarrolladas en conjunto entre Mohr y Terzaghi, y aparecieron por primera vez publicadas en 1948. El SPT se volvió un estándar en Estados Unidos cuando en 1958 se adoptó oficialmente por ASTM con la norma D1586.

En la figura 1 se presenta un esquema de la ejecución típica del ensayo SPT.



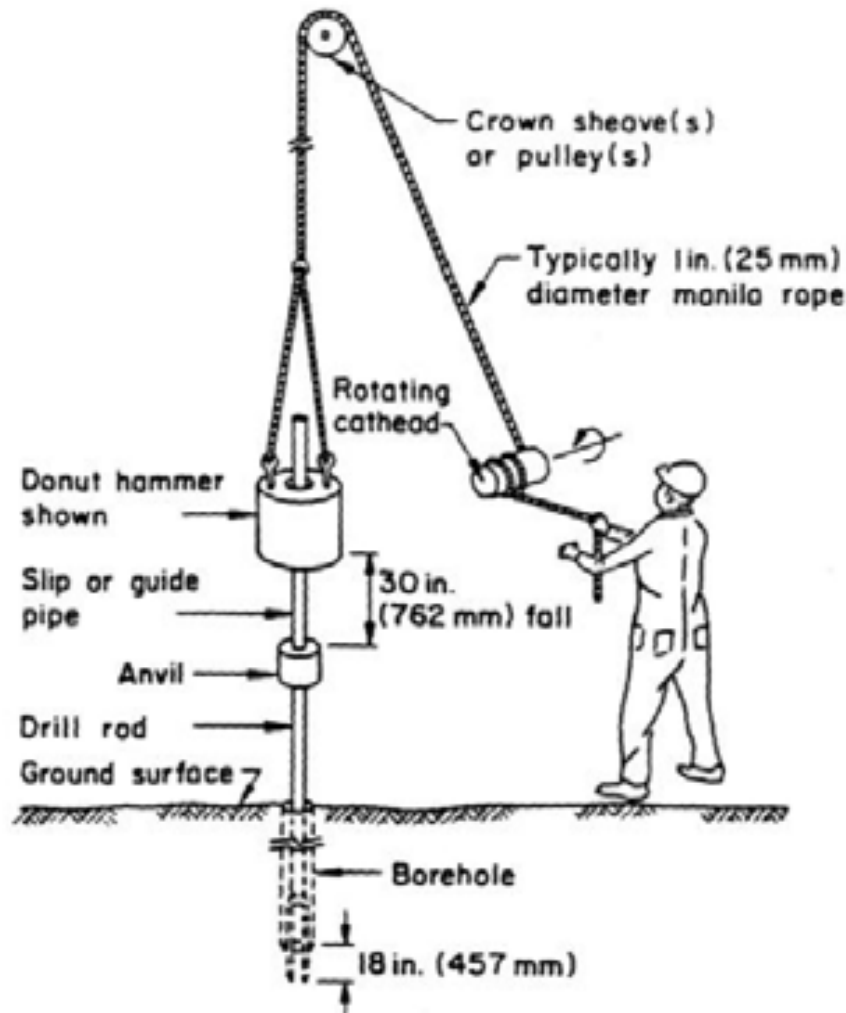


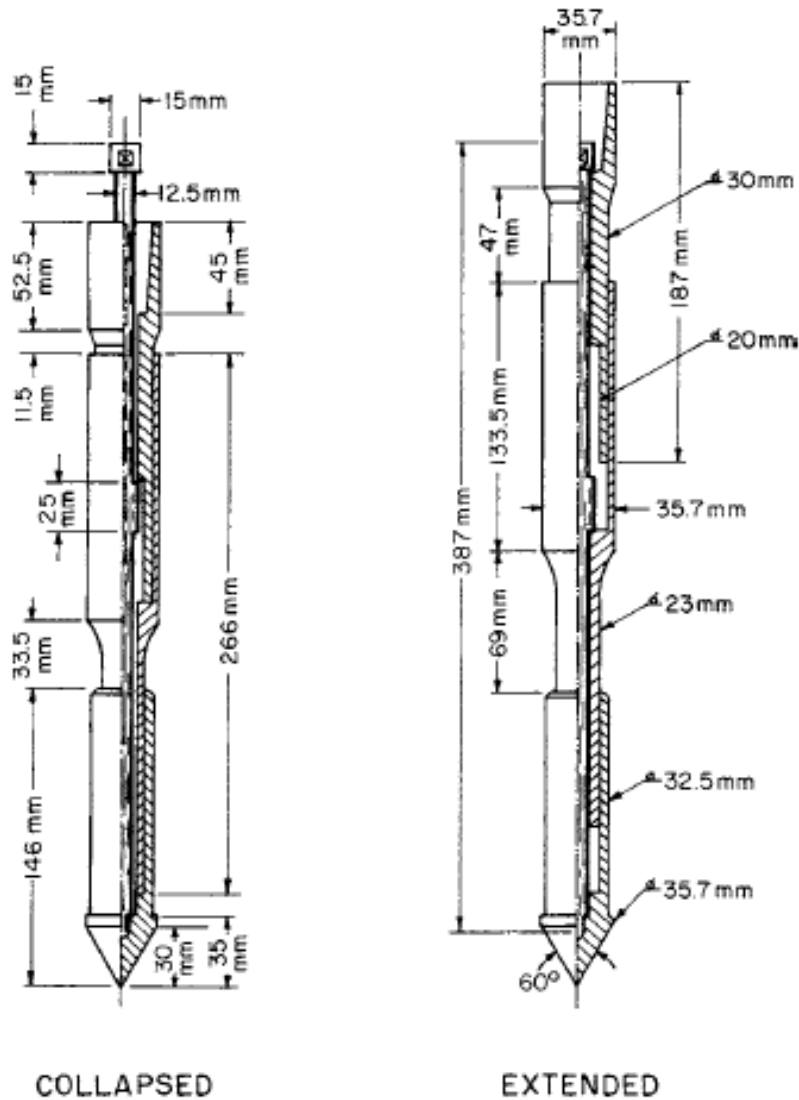
Figura 1.- Esquema de la ejecución típica de un ensayo SPT.

II.1.2. CPT (Cone Penetration Test), 1932

El primer cono holandés fue fabricado en 1932 por el Ing. P. Barentsen del Departamento de Obras Públicas de Holanda. Con este primer dispositivo, se medía únicamente la resistencia a la penetración de la punta y se alcanzaron profundidades de 10 a 12 metros. La inserción se llevaba a cabo manualmente. Se produjeron algunas mejoras al primero de estos por parte de Delft Soil Mechanics Laboratory y otros ingenieros belgas y holandeses, sin embargo el avance más significativo fue introducido por Begemann quien perfeccionó el cono holandés con la incorporación de una camisa móvil (jacket) detrás de la punta. Con este nuevo tipo de cono, fue posible medir tanto la resistencia de punta con la fricción en el fuste (fricción local), obteniéndose dos parámetros independientes del terreno cada 20 cm de profundidad. El ensayo con cono mecánico es normado en ASTM D3441.



En la figura 2 se presenta la sección de un cono mecánico tipo Begemann.



**FIG. 2 Example of a Mechanical Friction-Cone Penetrometer Tip
(Begemann Friction-Cone)**

Figura 2.- Sección esquemática de un cono mecánico tipo Begemann.

II.1.3. CPT (Electronic Cone Penetration Test), 1949

El primer cono eléctrico fue desarrollado en Berlín durante la Segunda Guerra Mundial. Las señales eran transmitidas a la superficie del terreno a través de cables insertados dentro de barras huecas de penetración. La principal mejora con respecto a este dispositivo fue la posibilidad de obtener datos de manera continua y directa, así como el uso de celdas de carga más sensibles que permitían mediciones más precisas. La primera evolución importante

del cono eléctrico se dio en DSML (Delft Soil Mechanics Laboratory) entre 1949 y 1957, de manera tal que fuera posible medir tanto la resistencia de punta como la fricción local. El ensayo con cono eléctrico es normado en ASTM D5778.

En la figura 3 se presenta la sección de un cono eléctrico típico.

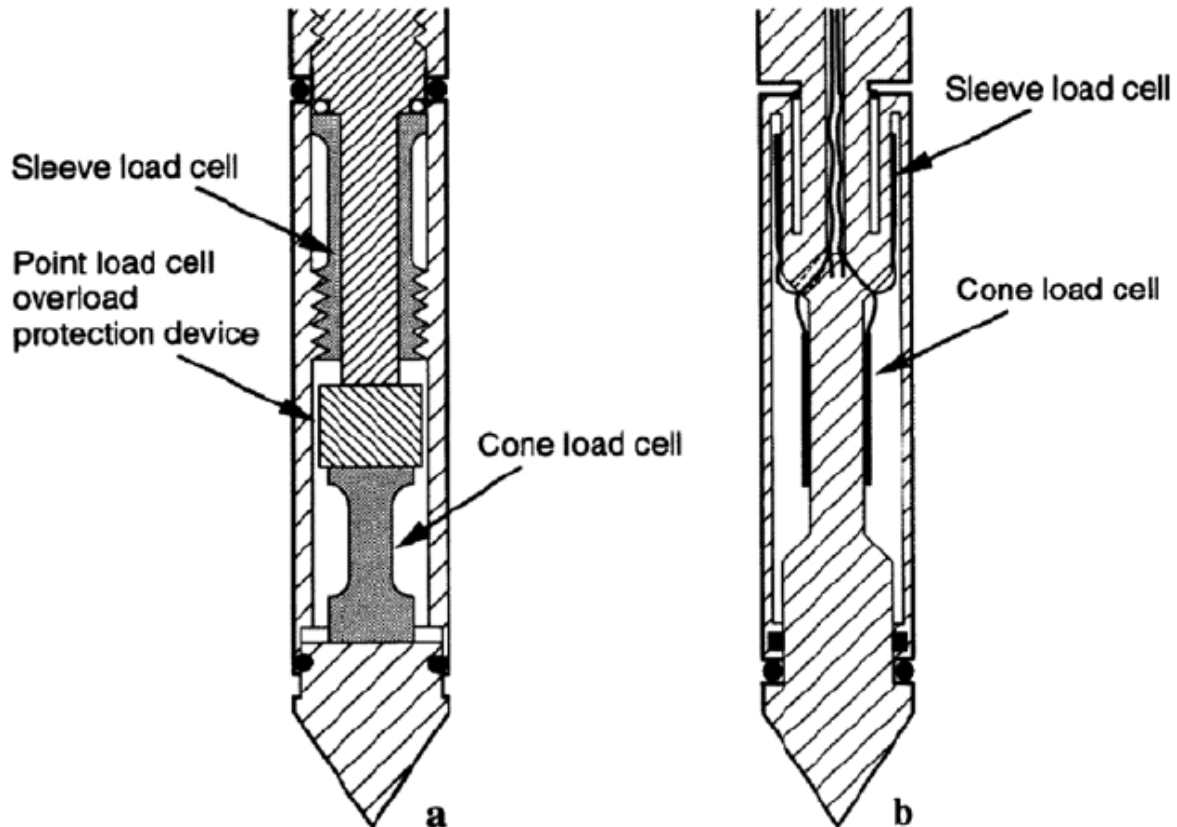


Figura 3.- Sección esquemática de dos conos eléctricos típicos con las celdas de carga y fricción ubicadas en diferentes posiciones.

II.1.4. PMT (Pressuremeter), 1954

Un presiómetro es un sensor cilíndrico que tiene una membrana flexible expandible diseñada para aplicar una presión uniforme a las paredes de un barreno existente (hueco cilíndrico). La primera evidencia de trabajo en el diseño de un presiómetro data de 1933. Sin embargo, fue hasta 1954 que Menard, en la Universidad de Illinois, inició el desarrollo del primer presiómetro moderno. El presiómetro Menard se utilizó en Chicago por primera vez en 1957 para obtener propiedades de diseño para la cimentación de algunas estructuras.



Menard no sólo desarrollo el aparato sino también todo el método de diseño basado en el instrumento. Independiente, en el año 1959, Fukuoka de Japón desarrolló otro tipo de presiómetro denominado presiómetro OYO. Una de las últimas versiones de presiómetro fue desarrollada por el Prof. Jean-Louis Briaud en conjunto con ROCTEST de Canadá, y se conoce como el Presiómetro TEXAM (Año 1982). El ensayo PMT se encuentra estandarizado con la norma ASTM D4719.

En la figura 4 se presenta un esquema típico del equipo Menard.



Figura 4.- Equipo requerido para ejecución de ensayos con el Presiómetro Menard.

II.1.5. CPTu (Piezocone), 1974

A partir de 1974 se empezó a incorporar en el cono eléctrico tradicional la medición de la presión de poro generada durante la penetración del aparato. El primer piezocono eléctrico

fue desarrollado en el NGI (Norwegian Geotechnical Institute). Janbu y Senneset (1974), así como Schmertmann (1974) presentaron artículos relacionados con el uso de piezoconos. Schmertmann fue el primero en reconocer la importancia de la medición de presión de poro en la interpretación de los datos CPT. Los modelos originales han sufrido modificaciones, pero básicamente se trata de un elemento poroso (figura 5) que está conectado directamente con una cámara llena de líquido, cuya presión es monitoreada por un sensor de presión. El elemento poroso puede estar ubicado cerca de la punta (u_1), detrás del cono (u_2) o detrás del fuste de fricción (u_3). La ubicación más típica es detrás del cono (u_2).

En la figura 5 se presenta un piezocono que registra la presión de poro u_2 . El piezocono se encuentra normado en ASTM D5778.



Figura 5.- Piezocono tipo ENVI Memocone.

II.1.6. SCPTu (Seismic Piezocone), 1986

La versión moderna del cono sísmico fue desarrollada por Campanella y Robertson en la Universidad de British Columbia, en 1986. El cono sísmico consiste en un piezocono típico con un geófono receptor. La ventaja del SCPTu es que combina las mediciones tradicionales típicas del piezocono (resistencia de punta, fricción local y presión de poro) con mediciones geofísicas (velocidad de onda cortante y velocidad de onda compresional). De esta manera, se tienen mediciones en los dos extremos del espectro de deformación (a bajas deformaciones y a altas deformaciones), de manera simultánea. Esta herramienta es considerada uno de los avances más importantes en la era moderna de la exploración geotécnica "In situ", puesto que un mismo sondeo permite recolectar hasta 5 parámetros geotécnicos independientes, de manera simultánea.

En la figura 6 se presenta una vista esquemática del SCPTu.

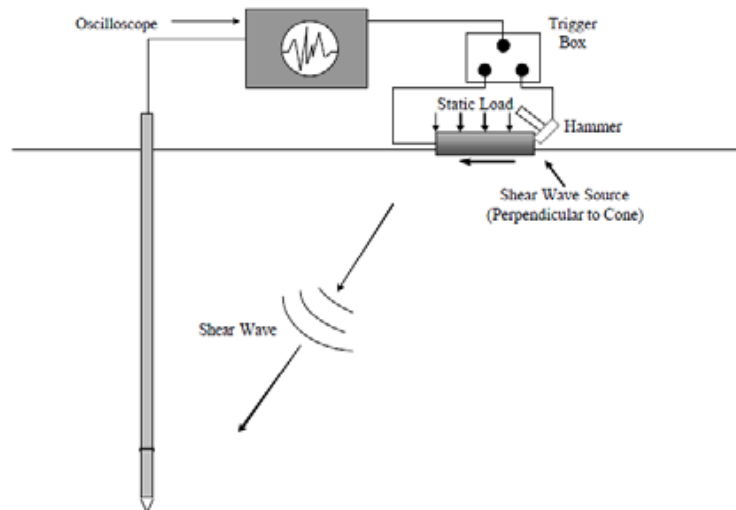


Figura 6.- Esquema típico del Piezocono sísmico (SCPTu).

II.1.7. DMT (Marchetti Dilatometer), 1975

El DMT fue desarrollado por el Profesor Silvano Marchetti en 1975, y probado en diversos ambientes geotécnicos en Italia hasta preparar en 1980 el primer artículo publicado en la ASCE sobre las experiencias del uso del DMT. Posteriormente, fue introducido a Estados Unidos por el Profesor Schmertmann, y actualmente es usado en más de 50 países alrededor del mundo.

El ensayo de dilatómetro (DMT, ASTM D6635 y Eurocode 7 – Part 2) consiste en empujar una cuchilla plana ubicada al final de una serie de barras. Una vez que se alcanza la profundidad de ensayo, una membrana circular delgada de acero, localizada a un lado de la cuchilla, se empieza a expandir horizontalmente contra el terreno. Esta expansión se efectúa mediante inflado con gas Nitrógeno.

La presión que registra el manómetro en superficie se determina para tres momentos específicos del ensayo: p_0 , p_1 y p_2 . La membrana se desinfla y la cuchilla plana se avanza a la siguiente profundidad de muestreo.

En la figura 7 se presenta el equipo principal utilizado para efectuar ensayos DMT.





Figura 7.- Equipo principal utilizado en ensayos con Dilatómetro Marchetti.

II.1.8. SDMT (Seismic Dilatometer), 1988

El Dilatómetro Sísmico (SDMT) es la combinación de la tradicional paleta Marchetti (figura 7) con un módulo sísmico para medir la velocidad de onda cortante. El ensayo es conceptualmente similar al SCPT y fue introducido por primera vez por Hepton (1988) y mejorado por Martin y Mayne (1998) en el Georgia Tech, Atlanta. El sistema SDMT más moderno, distribuido comercialmente, fue desarrollado por Studio Marchetti en Italia a partir del año 2000.

En la figura 8 se presenta una vista esquemática del equipo.

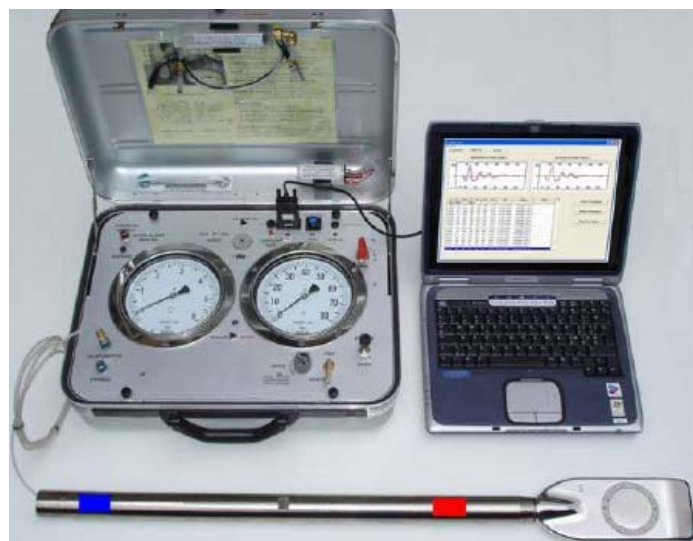


Figura 8.- Esquema típico del Dilatómetro sísmico (SDMT)

III. SONDEOS CON DILATÓMETRO (DMT)

III.1. DEFINICIONES

III.1.1. Prueba del dilatómetro

La prueba del dilatómetro consiste en la penetración de una cuchilla plana al suelo, la cual contiene en una de sus caras una membrana circular metálica que se va inflando internamente de manera gradual reaccionando sobre el suelo circundante registrando las presiones necesarias para que la membrana se ubique en posición plana a la cuchilla (P_0), una posición expandida (P_1) y en posición inicial nuevamente pero desplazado el suelo (P_2) (figura 9).

La prueba comienza cuando la membrana está colocada en la profundidad requerida, entonces el suelo ejerce una presión sobre la cuchilla cerrando un circuito eléctrico, emitiendo una señal acústica o pitido. Posteriormente se inyecta presión dentro del sistema para que la membrana se infle y empuje el suelo, aumentando la presión hasta que ésta se desplace 1.1mm. En cada registro se anotarán las lecturas A (momento cuando deja de emitir pitido) y B (momento cuando vuelve a emitir pitido). Las lecturas se tomarán en alguno de los 2 manómetros de la consola, dependiendo el valor de la presión aplicada (figura 10).

La prueba se realiza en incrementos de 20 a 50 cm de profundidad aproximadamente y en cada incremento se realiza un juego de lecturas A y B (También se realiza la lectura C de ser requerido). Estas pruebas se pueden realizar en arenas, limos, arcillas y suelos orgánicos. No se recomienda realizar sondeos en suelos con gravas o rocas puesto que puede dañar la membrana.

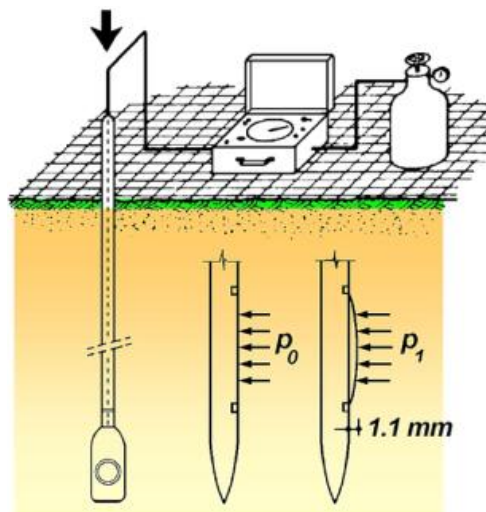


Figura 9.- Esquema general de la prueba

III.1.2. Consola del dilatómetro

Caja metálica con 2 manómetros. El manómetro izquierdo registra presiones de 0 a 6 bares y el manómetro derecho registra de 0 a 80 bares (figura 10). Contiene una válvula para abrir/cerrar el paso del gas a la consola, otra para abrir/cerrar el paso del gas a la cuchilla y otras 2 que liberan el gas dentro de la paleta (una rápida “Fast” y otra lenta “Lectura C”).



Figura 10.- Consola de adquisición de datos

III.1.3. Cuchilla del dilatómetro

Paleta de acero que se coloca al principio del tren de barras. Se compone por la cuchilla base de acero (figura 11), la membrana metálica, cilindros de acero y plexiglás, resorte, plato sensitivo, anillo metálico y empaque. El cilindro de plexiglás tiene la función de aislar el cilindro metálico del disco sensitivo durante su desplazamiento.



Figura 11.- Cuchillas de acero

III.1.4. Tanque de gas

Tanque de cualquier tamaño con gas nitrógeno en él. Deberá tener gas suficiente y a una presión mínima de 40 bares para poder ejecutar el sondeo (figura 12).



Figura 12.- Cilindro de gas

III.1.5. Regulador con manómetros

Regulador con 2 manómetros, el izquierdo registra la presión de salida del tanque de gas mientras que el manómetro derecho registra la presión de salida hacia la consola (figura 13). Su función principal es limitar la presión de salida del gas a una presión definida hacia la consola. De esta manera, aunque la presión de salida del tanque sea de 120 bares, se puede enviar una presión constante definida mediante el tornillo del manómetro, el cual se gira en sentido horario para abrir paso a la presión que irá hacia la consola (40 bares).



Figura 13.- Regulador con dos manómetros

III.1.6. Mangueras

Tubería plástica flexible con un alambre de cobre en su interior. Conecta la consola del dilatómetro con la cuchilla del dilatómetro y conduce el paso del gas de la consola hacia la cuchilla, así como la señal eléctrica proveniente de la cuchilla.

Existen 4 entradas diferentes que se manejan en este sistema (figura 14).

- Entrada macho saliente de la manguera hacia la consola (a)
- Entrada macho saliente de la manguera hacia la cuchilla (b)
- Entrada hembra saliente de la consola hacia la manguera (c)
- Entrada hembra saliente de la cuchilla hacia la manguera (d)

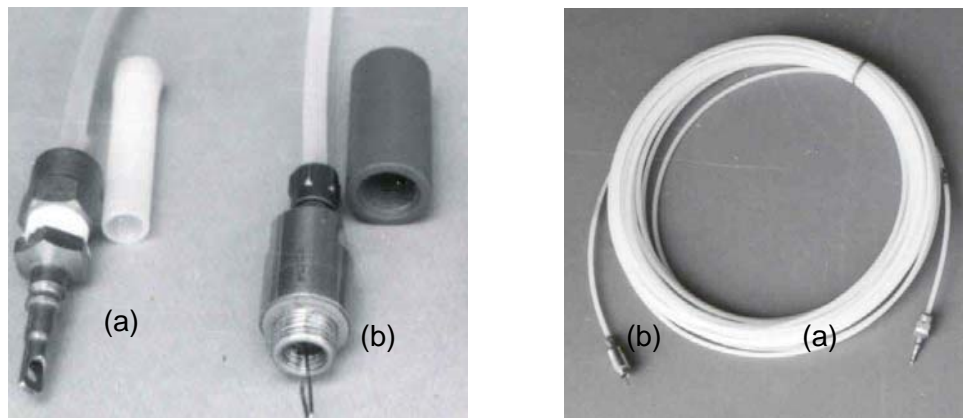


Figura 14.- Diferentes conexiones de las mangueras a y b.

III.1.7. Membrana

Pieza circular de acero (figura 15), delgada y flexible de 60 mm de diámetro sujeta de sus bordes mediante tornillos y un anillo metálico, montada en una cara de la cuchilla del dilatómetro.

Se expande dentro del suelo en una forma aproximadamente esférica a lo largo de un eje perpendicular al plano de la cuchilla como resultado de una presión de gas interna.

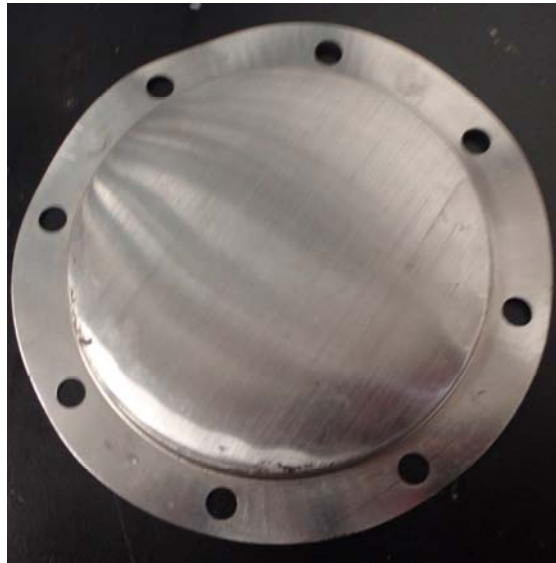


Figura 15.- Muestra de una membrana ensayada.

III.1.8. Anillo metálico

Anillo con 8 perforaciones para tornillos sujetadores y 2 para tornillos extractores (figura 16). Los tornillos sujetadores presionan la membrana al dilatómetro. Se acompaña de un empaque de goma que va entre éste y la cuchilla para evitar fugas de gas.

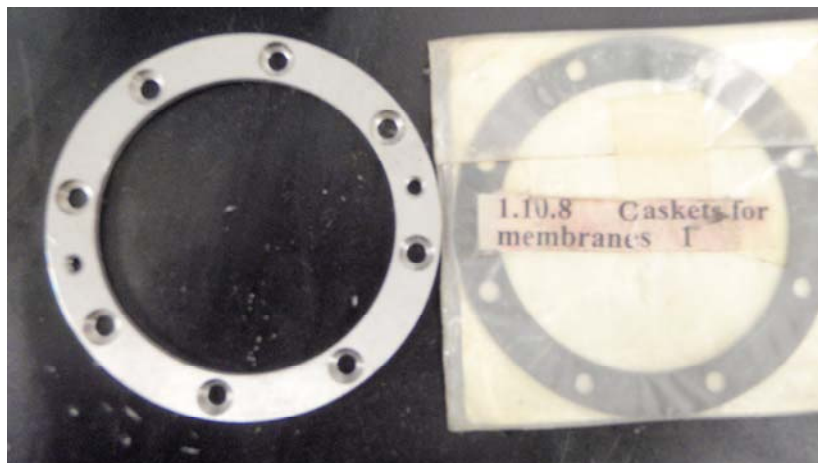


Figura 16.- Anillo metálico y junta de hule.

III.1.9. Cilindros

La parte interna de la cuchilla contiene un disco sensitivo, en su centro tiene una perforación que contiene un resorte, un cilindro metálico y un cilindro de plexiglás (figura 17).

El cilindro de plexiglás aísla el disco sensitivo del cilindro metálico mientras que este último transmite la señal eléctrica para la toma de lecturas. El resorte empuja ambos cilindros conforme se va inflando la membrana durante la prueba.

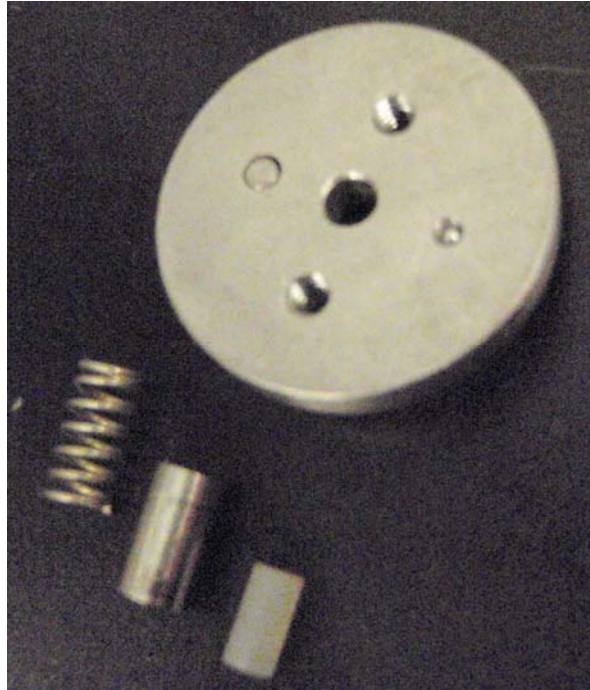


Figura 17.- Cilindros interiores de la paleta

III.1.10. Jeringa de calibración

Dispositivo para la obtención de las lecturas ΔA y ΔB de calibración. Para obtener el parámetro ΔA se aplica succión en la membrana, es decir, se extrae aire de la misma y al momento en que la unidad de control envíe la señal sonora y visual se toma la lectura; Para la toma de la lectura de ΔB , se aplica presión con la jeringa al sistema hasta escuchar la señal de audio.

III.1.11. Cable de tierra física

Permite el cierre del circuito de continuidad eléctrica entre el tren de barras y la unidad de control.

III.2.2. DESCRIPCIÓN DE PROCEDIMIENTO

III.2.1. Antes de salir a campo



Se necesita conocer la siguiente información:

- Cantidad de sondeos requeridos
- Profundidad de los sondeos
- Equipo de penetración a utilizar
- Tipo de suelo
- Vías de acceso
- Clima
- Topografía del sitio
- Geología del lugar

Posteriormente se prepara el equipo necesario para los sondeos con un “check list rápido” en la bodega del equipo.

III.2.2. “Check list rápido”

- Consola dilatométrica (dentro incluye: jeringa de calibración, mangueras de calibración y verificador de continuidad)
- Cuchilla con membrana flexible en buenas condiciones y funda protectora
- Manguera con conexión a cuchilla y consola (18, 29 ó 34 m)
- Tanque de nitrógeno
- Juego de manómetros con manguera de conexión al tanque de nitrógeno
- Cable de tierra
- Regla de ajuste
- Membranas flexibles extra
- Kit para cambio de membrana (desarmadores, escobilla, punta para limpieza, extractor de membrana, extractor de disco interno, micrómetro con nivel y martillo de goma)
- Jeringa de excitación de membrana
- Cinta de teflón
- Marcador
- Flexómetro
- Franela
- Recipiente de 19 lt
- 2 llaves Steelson
- Llave española para tanque
- Llave española para cuchilla
- Cople para el tipo de barras usadas a la cuchilla dilatométrica



- Registros de campo
- Sombrilla

Una vez seleccionado todo el equipo del dilatómetro, se procede al embalaje y carga en el vehículo dispuesto.

III.2.3. Durante o en el sitio de proyecto

Se busca que el sitio sea lo más nivelado posible para la ejecución de la prueba, en un área de 30 a 40 m² aproximadamente de acuerdo con el equipo de penetración que se utilice, además de que exista un camino de acceso para al menos un vehículo pick up.

III.2.4. Cambio de membrana

Antes de iniciar o incluso cuando se inicie la calibración de la membrana, se deberá revisar cuidadosamente las condiciones de ésta, si no presenta daño aparente se procede con la toma de la lectura ΔA o ΔB , pero, si los valores iniciales de calibración se encuentran fuera de rango (al menos uno de ellos), inmediatamente se procederá al cambio de la membrana.

Primeramente se limpia la cuchilla en la parte donde se ubican los tornillos (figura 18), en una bolsa azul que incluye el equipo, se halla el “kit de cambio de membrana” donde se encuentra una punta metálica que sirve para este propósito, luego se quitan los tornillos uno a uno y se limpian los huecos; además de los huecos de los tornillos que sujetan la membrana, existen un par más que se utilizan para extraer la membrana, en la bolsa azul también se encuentra un par de tornillos extractores que se atornillan en estos huecos y se aprietan hasta que la membrana sale de su posición.

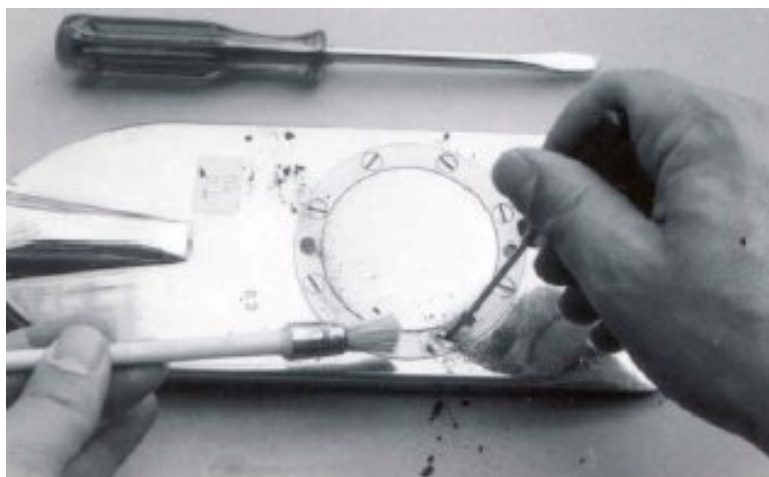


Figura 18.- Limpieza de la cuchilla metálica.

Se debe de tener mucho cuidado en este paso, ya que el cilindro de plexiglás no está sujeto con nada y puede salirse de su posición muy fácilmente, en este mismo punto se encuentra el disco metálico y debajo de él el cilindro metálico y el resorte (figura 19).



Figura 19.- Vista interna de la cuchilla.

En el “kit de cambio de membrana” está el micrómetro y su base (figura 20), este dispositivo sirve para nivelar el disco metálico con respecto de la cuchilla, dicho disco deberá estar 0,05 mm por encima de la cuchilla y el tornillo que cerrará el circuito 0,05 mm por encima del disco, para ajustar el disco metálico se utiliza el martillo de goma para golpear levemente el disco hasta que este se coloque en la posición indicada, la tolerancia para ubicar el disco puede estar entre 0,04 y 0,07 mm.



Figura 20.- Micrómetro

Una vez colocado y nivelado el disco metálico, se coloca el empaque de goma, la membrana nueva y el anillo metálico, los tornillos deberán colocarse y apretarse gradual y alternadamente con el de la posición opuesta para asegurar un sello homogéneo.

Luego de la colocación de la membrana nueva, se utiliza una jeringa que se coloca en la conexión de la cuchilla cuyo propósito es de excitar la membrana para darle un poco de flexibilidad, además este procedimiento se realiza en un balde de agua para ver que no existan fugas (figura 21).

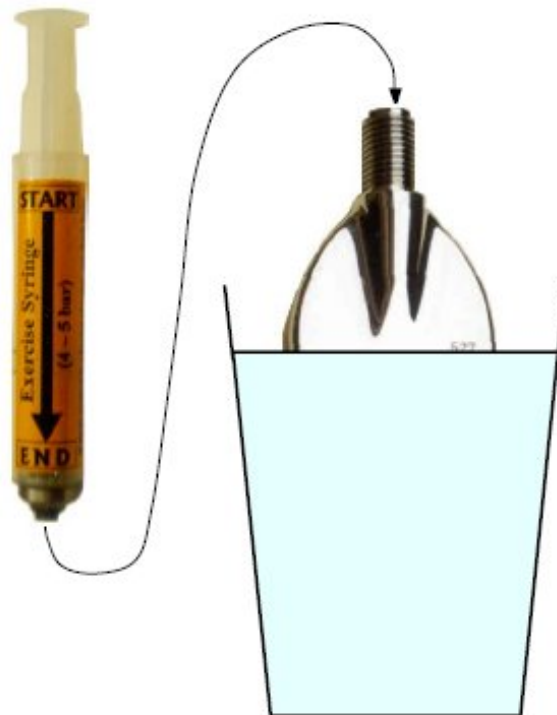


Figura 21.- Excitación de la membrana

III.2.5. Calibración de la cuchilla

Para la calibración de la cuchilla se utilizan los cables cortos y la jeringa que se encuentran en la unidad de control, se conectan el cable electro-neumático a la cuchilla y a la unidad de control en la conexión "Dilatometer", y el cable eléctrico a la conexión "Ground", se conecta la jeringa y finalmente se coloca el interruptor de la unidad de control en la posición "ON".

Para la toma de lecturas será necesario tener cerradas todas las válvulas, para ΔA será necesario realizar succión, por lo cual se deberá insertar el émbolo de la jeringa; para esta

acción es necesario abrir la válvula de escape rápido, una vez en esta posición se volverá a cerrar la válvula; acto seguido se jala el émbolo hasta escuchar la señal auditiva (un “beep” continuo), y se anota la lectura en el registro de campo. Se repite la misma acción para la lectura de ΔB , pero para este caso se aplicará presión al sistema, es decir, empujando el émbolo de la jeringa (figura 22).

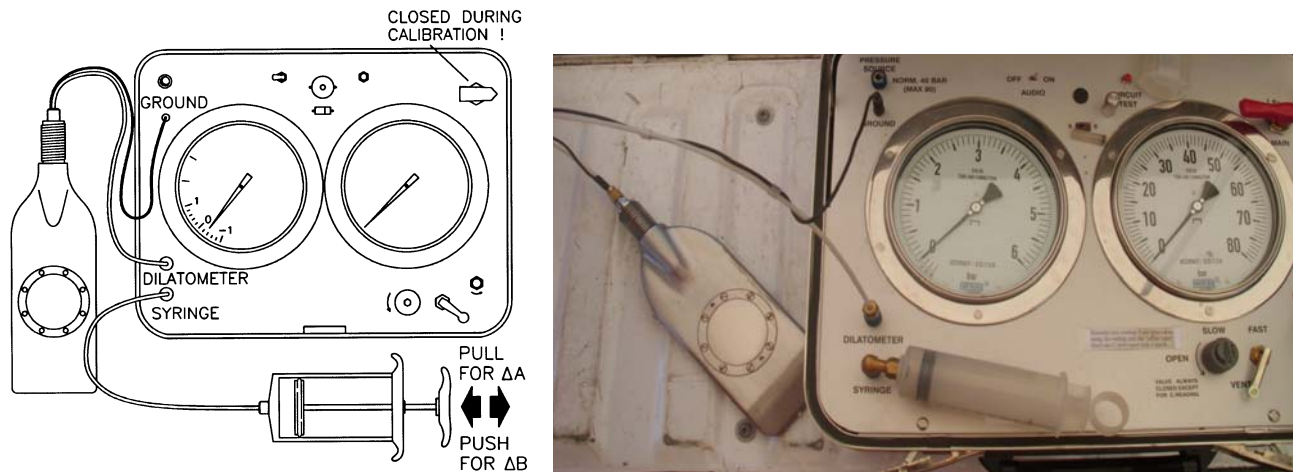


Figura 22.- Conexiones para la calibración

Los rangos de los parámetros ΔA y ΔB son los siguientes:

	<i>kPa</i>	<i>Bares</i>
ΔA	De 5 a 30	De 0.05 a 0.3
ΔB	De 5 a 80	De 0.05 a 0.8

Tabla 1.- Valores iniciales de calibración

Previo al inicio del sondeo se deberá contar con el formato correspondiente para la toma de las lecturas, para este caso nos apoyamos en el formato EPI-C-003-R0/A1, denominado registro de prueba con dilatómetro, donde además se deberá anotar la información correspondiente al proyecto, sitio, sondeo, fecha, etc. Figura 23.

**EJECUCIÓN E INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS IN SITU CON EL EQUIPO DEL
DILATÓMETRO (DMT)**

OCTAVIO HERNÁNDEZ ZARAGOZA

REGISTRO DE PRUEBA CON DILATÓMETRO

Cliente:				Sondeo No.	Cuchilla No.	ΔA (bar) 0.05-0.20	ΔB (bar) 0.20-0.80	Δmm (1)	Aspecto de la membrana (2)
Operador:	Revisó:	X:	Y:	Z:	inicio (3)				Elastic
(1) Coaxiality error (L Square)	NAF:				ZE=				
(2) Elastic, overinflated, wrinkled, snapping, scratches	Tipo de barra para incado:				ZE=				
(3) Depth reached from extracted blade	Prueba detenida por:		Fecha:		ZE=				

Prof.	A	B	C	Prof.	A	B	C	Prof.	A	B	C	Prof.	A	B	C	Prof.	A	B	C	Prof.	A	B	C
0.2				6.2				12.2				18.2				24.2				30.2			
0.4				6.4				12.4				18.4				24.4				30.4			
0.6				6.6				12.6				18.6				24.6				30.6			
0.8				6.8				12.8				18.8				24.8				30.8			
1.0				7.0				13.0				19.0				25.0				31.0			
1.2				7.2				13.2				19.2				25.2				31.2			
1.4				7.4				13.4				19.4				25.4				31.4			
1.6				7.6				13.6				19.6				25.6				31.6			
1.8				7.8				13.8				19.8				25.8				31.8			
2.0				8.0				14.0				20.0				26.0				32.0			
2.2				8.2				14.2				20.2				26.2				32.2			
2.4				8.4				14.4				20.4				26.4				32.4			
2.6				8.6				14.6				20.6				26.6				32.6			
2.8				8.8				14.8				20.8				26.8				32.8			
3.0				9.0				15.0				21.0				27.0				33.0			
3.2				9.2				15.2				21.2				27.2				33.2			
3.4				9.4				15.4				21.4				27.4				33.4			
3.6				9.6				15.6				21.6				27.6				33.6			
3.8				9.8				15.8				21.8				27.8				33.8			
4.0				10.0				16.0				22.0				28.0				34.0			
4.2				10.2				16.2				22.2				28.2				34.2			
4.4				10.4				16.4				22.4				28.4				34.4			
4.6				10.6				16.6				22.6				28.6				34.6			
4.8				10.8				16.8				22.8				28.8				34.8			
5.0				11.0				17.0				23.0				29.0				35.0			
5.2				11.2				17.2				23.2				29.2				35.2			
5.4				11.4				17.4				23.4				29.4				35.4			
5.6				11.6				17.6				23.6				29.6				35.6			
5.8				11.8				17.8				23.8				29.8				35.8			
6.0				12.0				18.0				24.0				30.0				36.0			

Figura 23.- Formato EPI-C-003-R0/A1

III.2.6. Instalación del equipo

Para la ejecución de la prueba del dilatómetro, se pueden utilizar varios tipos o métodos de inserción de la cuchilla, un método poco utilizado en CFE es mediante una máquina perforadora montada en camión o en patines, con estos equipos la cuchilla puede hincarse a presión o percusión con aditamentos y coples especiales. El método que más se utiliza en CFE es mediante penetrómetros con capacidades de 10 y 20 toneladas, con estos equipos se garantiza una verticalidad tolerable y una fuerza de empuje considerablemente buena (figura 24).





Figura 24.- Equipos para penetración de la cuchilla

III.2.7. Toma de lecturas

La prueba de DMT básicamente consiste en la siguiente secuencia de operaciones:

- a) El operador de DMT se asegura que la válvula de flujo micrométrico este cerrada y abierta la válvula de escape rápido, entonces él da la señal de partida al operador del equipo (los dos operadores deben posicionarse de tal manera que puedan intercambiar órdenes).
- b) El operador del equipo empuja la cuchilla verticalmente en el suelo a la profundidad de la prueba seleccionada.
- c) En cuanto la profundidad de la prueba se alcanza, el operador del equipo detiene la penetración y le da luz verde al operador del DMT.
- d) El operador del DMT cierra la válvula de escape rápido y despacio abre la válvula de flujo de micrómetro para presurizar la membrana. Durante este tiempo él oye una señal de audio firme o un timbre en la unidad de control. En el momento en que la señal se detiene (es decir cuando la membrana se empieza a dilatar), el operador toma la primera lectura de presión en el medidor de presión y anota el valor de la columna A del formato.



e) Sin detener el flujo, el operador del DMT continúa inflando la membrana (señal off) hasta que la señal se reactiva (es decir el movimiento de la membrana = 1.1 mm). El operador observa en el medidor la segunda lectura de presión debiendo realizar los siguientes cuatro pasos:

- 1) Inmediatamente abre la válvula de escape rápido para despresurizar la membrana.
- 2) Cierra la válvula de flujo de micrómetro para evitar suministrar demás exceso de presión al dilatómetro (estos primeros dos funcionamientos previenen expansión extensa de la membrana que puede deformarlo permanentemente y puede cambiar sus calibraciones, y deben realizarse rápidamente después de la lectura B, de otra forma la membrana puede dañarse).
- 3) Debe decir al operador del equipo que continúe con la penetración de la cuchilla, generalmente de entre 20 a 50 cm (la válvula de escape rápido debe permanecer abierta durante la penetración para evitar empujar la cuchilla con la membrana extendida).
- 4) Debe anotar la segunda lectura en la columna B del formato.
- 5) Se repite la sucesión anterior a cada profundidad hasta el extremo del sondeo. Al final del sondeo, cuando la cuchilla se extrae, se realiza la última calibración (figura 25).
- 6) Si se toma la lectura C, hay sólo una diferencia en la sucesión anterior; después de tomar la lectura B, se abre la válvula de apertura lenta en lugar de la válvula de escape rápido y se espera (aproximadamente 1 minuto) hasta que los valores de presión se acerquen al cero en el medidor; en el instante en que la señal auditiva regresa se toma la lectura C.



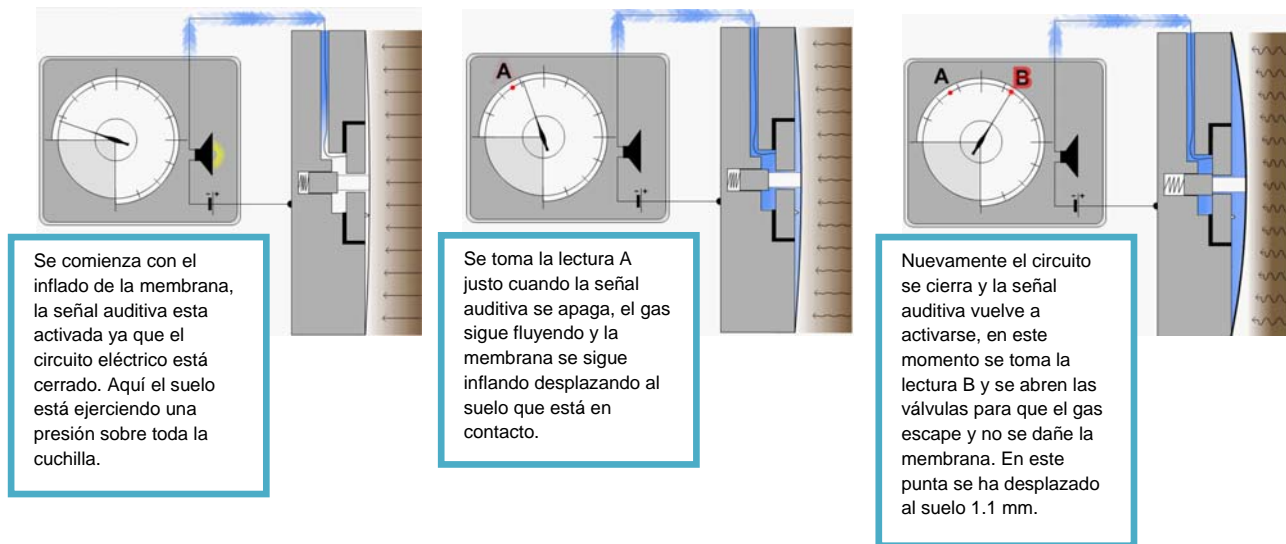


Figura 25.- Secuencia de toma de lecturas

III.2.8. Después del sondeo

Una vez alcanzada la profundidad del sondeo o cuando el equipo de penetración no pueda pasar un estrato competente, se deberá evaluar la posibilidad de dar por terminada la prueba o buscar la manera de avanzar en la perforación para continuar a mayor profundidad.

III.3. IMPORTANCIA DE LA EXACTITUD DE ΔA Y ΔB

Si los valores de ΔA y ΔB obtenidos antes de penetrar la paleta en suelo se encuentran fuera de los límites descritos en la tabla 1, la membrana se debe reemplazar antes de realizar la prueba, además, el cambio entre ΔA y ΔB al final del sondeo no debe exceder 25 kPa (0,25 bar), de lo contrario los resultados de la prueba no son confiables.

Los valores típicos de ΔA y ΔB son: $\Delta A = 15$ kPa (0,15 bar), $\Delta B = 40$ kPa (0,4 bar). Los valores de ΔA y ΔB también indican cuándo es tiempo de reemplazar una membrana. Una membrana vieja no necesita ser reemplazada si los valores de ΔA y ΔB son tolerables (tabla 1), de hecho una membrana vieja es preferible a una nueva, teniendo un ΔA y ΔB más estable y más bajo. Sin embargo, en caso de arañones, rasguños graves, etc., una membrana debe cambiarse aun cuando ΔA y ΔB se encuentren en los límites de tolerancia (aunque no es probable que los valores de ΔA y ΔB sean tolerables si la membrana está deteriorada).



ΔA y ΔB inexactos son virtualmente la única fuente potencial de un error instrumental del DMT, debido a que desde ΔA y ΔB , son corregidas todas las lecturas A, B de un sondeo, y cualquier inexactitud en ΔA y ΔB se propagaría a todos los datos.

La importancia de ΔA y ΔB en los suelos blandos deriva del hecho de que, en el caso extremo de arcillas muy blandas, o licuación de arenas, A y B son números pequeños, sólo un poco superiores que ΔA y ΔB . Desde que la corrección involucra diferencias entre números similares, la exactitud de ΔA y ΔB es muy necesaria en muchos suelos.

ΔA y ΔB deben ser, como una regla, medidos antes y después de cada sondeo. Su promedio es usado para corregir todas las lecturas de A y B. Claramente, si la variación es pequeña, el promedio representa un ΔA y ΔB muy confiable en toda la profundidad; si la variación es grande, el promedio puede ser inadecuado en algunas profundidades. De hecho, en los suelos blandos, el operador puede estar seguro que los resultados de la prueba sólo son aceptables al final del sondeo, si cuando verifique ΔA y ΔB él encuentra que son muy similares a sus valores iniciales.

En un suelo duro ΔA y ΔB son una parte pequeña de A y B, las inexactitudes tan pequeñas en ΔA y ΔB tienen un efecto despreciable.

III.4. RECOMENDACIONES

1. Al momento de conectar el equipo, nunca perder de vista la fragilidad de la manguera. Conduce electricidad y gas a presión, por lo que una torcedura podría generar errores en las mediciones. Es por eso que al conectar la manguera a la cuchilla, se debe girar la cuchilla y NO el cable.
2. Cuando la cuchilla ya esté conectada con la manguera, se debe girar el tren de barras y NO la cuchilla con el cable ya conectado.
3. Verificar que en el transcurso de la penetración del tren de barras, la presión ejercida por el equipo de hincado no rebase los 100 kN, pues posiblemente la membrana se puede romper debido a la dureza del suelo o la existencia de rocas o gravas que la rasguen. Si se decide penetrar aun con estas presiones, se deberá hacer lentamente y con mucha precaución.



4. No inflar con más de 80 bares la presión interna de la membrana. Si se rebasa esta presión, la membrana podría deformarse permanentemente de tal manera que las lecturas posteriores serán erróneas.
5. Cuando se realice la lectura "C" en el sondeo, abrir la válvula rápida una vez que se ha tomado la lectura para evitar deformaciones a la membrana.
6. Alejar cualquier objeto punzocortante de la membrana, pues esta podría lastimarse severamente.
7. Revisar constantemente la presión de los manómetros reguladores. Si esta disminuye, la prueba puede no contar con la presión de gas suficiente para operar.



IV. RESULTADOS

La figura 26 muestra el formato gráfico recomendado del DMT, tal gráfica se muestra en cuatro perfiles: I_D , M , c_u y K_D . Estos cuatro parámetros generalmente son el grupo más significativo de la prueba. Note que K_D , aunque no es un parámetro común del suelo, se ha incluido como uno generalmente útil en el "entendimiento" de la historia del sitio, siendo similar en cierta forma al perfil de OCR. También se recomienda que los diagramas se presenten lado a lado.

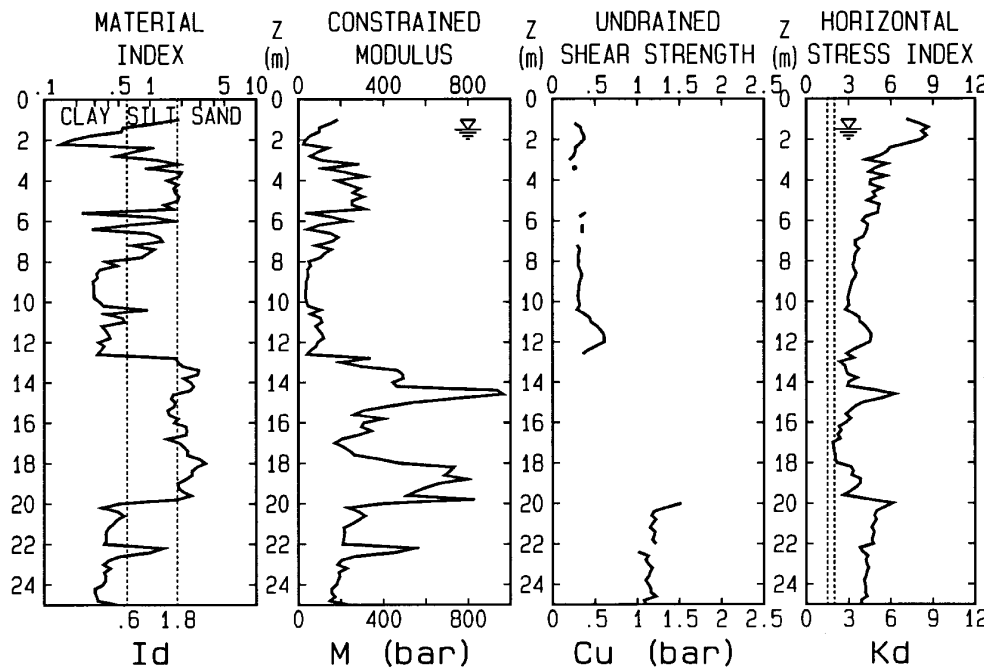


Figura 26.- Presentación gráfica recomendada de resultados de DMT - (1 bar = 100 kPa)

Todos los datos anotados, en particular las lecturas de campo no corregidas A y B y los valores de la calibración ΔA y ΔB , siempre deben incluirse, o en un documento separado o como las columnas agregadas en la tabla de resultados.



V. CORRELACIONES

V.1. PARÁMETROS DIRECTOS

V.1.1. Determinación de P_0 y P_1

$$P_0 = 1.05 (A - Z_M + \Delta A) - 0.05 (B - Z_M + \Delta B) \dots\dots\dots (1)$$

$$P_1 = B - Z_M + \Delta B \dots\dots\dots (2)$$

Donde: ΔA y ΔB = Correcciones determinadas por la calibración de la membrana.
 Z_M =Desviación del cero debida a la presión atmosférica.

V.2. PARÁMETROS INTERMEDIOS

V.2.1. Índice de material, I_D (tipo de suelo)

Las presiones corregidas P_0 y P_1 son utilizadas posteriormente en lugar de las lecturas A y B en la interpretación y de aquí se derivan tres parámetros intermedios característicos de este ensaye:

I_D , Índice del material (*Material Index*), relacionado directamente con el tipo de suelo ensayado.

El índice de material I_D se define como sigue:

$$I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - u_0} \dots\dots\dots (3)$$

Donde el u_0 es la presión inicial de poro in situ.

La definición anterior de I_D fue introducida teniendo en cuenta que los márgenes entre P_0 y P_1 son sistemáticamente "cercaños" en arcillas y "lejanos" en arenas (figura 27).



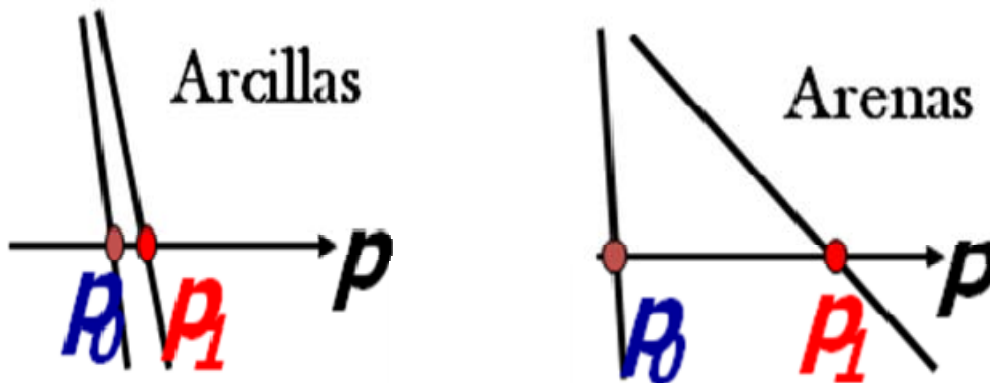


Figura 27.- Márgenes definidos entre P_0 y P_1

Según Marchetti (1980), el tipo de suelo puede identificarse de la siguiente forma (tabla 2):

Tipo de suelo	Valores
Turba	$I_D < 0.1$
Arcilla sensitiva	$I_D < 0.1$
Arcilla	$0.1 < I_D < 0.35$
Arcilla limosa	$0.35 < I_D < 0.6$
Limo arcillosos	$0.6 < I_D < 0.9$
Limo	$0.9 < I_D < 1.2$
Limo arenoso	$1.2 < I_D < 1.8$
Arena limosa	$1.8 < I_D < 3.3$
Arena	$I_D > 3.3$

Tabla 2.- Identificación del tipo de suelo

Cuando se usa I_D , se debe tener presente el resultado de un análisis granulométrico, como un parámetro que refleja la conducta mecánica (algún tipo de "índice de rigidez"). Es decir, si una arcilla por alguna razón se comporta "más rígidamente" que la mayoría de las arcillas, tal arcilla probablemente se interpretará por I_D como limo; de hecho, si uno está interesado en la conducta mecánica, a veces podría ser más útil para su aplicación una descripción basada en una respuesta mecánica en lugar de la distribución de tamaños de grano real; si, por otro lado, el interés está en la permeabilidad, entonces I_D debe complementarse por el índice de presión de poro u_0 .

V.2.2. Índice de esfuerzo horizontal, K_D

K_D , Índice de esfuerzo horizontal (*Horizontal stress index*), relacionado con el grado de preconsolidación del suelo, **OCR**.

El índice de esfuerzo horizontal K_D se define como sigue:

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

Donde el σ'_{v0} es esfuerzo efectivo vertical in situ.

El índice de esfuerzo horizontal K_D puede considerarse como K_0 amplificado por la penetración. En arcillas NC el valor de $K_D \approx 2$.

El perfil de K_D es similar en la forma al perfil de OCR, que generalmente se utiliza para "entender" la estratigrafía del suelo y su historia de esfuerzos (Marchetti 1980, el Jamiolkowski et al. 1988).

V.2.3. Módulo del dilatómetro, E_D

E_D , Módulo del dilatómetro (*Dilatometer Modulus*), determinado a partir de la teoría de la elasticidad.

El módulo del dilatómetro E_D se obtiene a partir de P_0 y P_1 por la teoría de elasticidad (Gravesen 1960). Para el diámetro de 60 mm de la membrana y el desplazamiento de 1.1 mm se encuentra:

$$E_D = 34.7 (P_1 - P_0) \dots\dots\dots(5)$$

En general E_D no debe usarse como tal, debido a la falta la información sobre el historial de esfuerzos. E_D sólo debe usarse en combinación con K_D e I_D .

Los parámetros intermedios I_D , K_D , E_D son parámetros "directos", calculados a partir del P_0 y P_1 y usando las formulas mostradas en la tabla 2.



Los valores de la presión de poro in situ u_0 y esfuerzo efectivo vertical σ'_{v0} antes de la penetración de la paleta también debe introducirse en las formulas y tienen que ser conocidos, por lo menos de manera aproximada.

Los parámetros para los cuales el DMT ha servido como estimador (tabla 3) son:

- El módulo odométrico M (todos los suelos)
- Resistencia no drenada c_u (en la arcilla)
- Coeficiente de presión lateral de suelos in situ K_0 (en la arcilla)
- Relación de preconsolidación OCR (en la arcilla)
- El coeficiente de consolidación horizontal c_h (en la arcilla)
- El coeficiente de permeabilidad k_h (en la arcilla)
- El ángulo de fricción ϕ (en arenas)
- El peso volumétrico γ y estratigrafía (todos los suelos)
- La presión de poro u_0 (en arena).

Las correlaciones para la arcilla se aplican cuando $I_D < 1.2$. Las correlaciones para arena se aplican cuando $I_D > 1.8$.



EJECUCIÓN E INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS IN SITU CON EL EQUIPO DEL DILATÓMETRO (DMT)

OCTAVIO HERNÁNDEZ ZARAGOZA

SIMBOLO	DESCRIPCIÓN	EXPRESIONES	
p₀	Corrección de la primera lectura	$p_0 = 1.05 (A - Z_M + \Delta A) - 0.05 (B - Z_M + \Delta B)$	
p₁	Corrección de la segunda lectura	$p_1 = B - Z_M + \Delta B$	
I_D	Índice del Material	$I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0)$	
K_D	Índice del Esfuerzo Horizontal	$K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_{v0}$	
E_D	Módulo del dilatómetro	$E_D = 34.7 (p_1 - p_0)$	
K₀	Coefficiente del suelo en reposo	$K_{0,DMT} = (K_D / 1.5)^{0.47} - 0.6$	
OCR	Relación de preconsolidación	$OCR_{DMT} = (0.5 K_D)^{1.56}$	
c_u	Resistencia no drenada	$c_{u,DMT} = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25}$	
Φ	Ángulo de fricción interna	$\Phi_{safe,DMT} = 28^\circ + 14.6^\circ \log K_D - 2.1^\circ \log^2 K_D$	
c_h	Coefficiente de consolidación horizontal	$c_{h,DMTA} \approx 7 \text{ cm}^2 / t_{flex}$	
k_h	Coefficiente de permeabilidad	$k_h = c_h \gamma_w / M_h (M_h \approx K_0 M_{DMT})$	
γ	Peso volumétrico	Ver carta de Marchetti y Crapps (1981)	
M	Módulo odométrico (módulo drenado confinado)	$M_{DMT} = R_M E_D$	
		Si $I_D \leq 0.6$	$R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$
		Si $I_D \geq 3$	$R_M = 0.5 + 2 \log K_D$
		Si $0.6 < I_D < 3$	$R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_D$ donde $R_{M,0} = 0.14 + 0.15 (I_D - 0.6)$
		Si $K_D > 10$	$R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D$
	Si $R_M < 0.85$	considerar $R_M = 0.85$	
u₀	Presión de poro hidrostática	$u_0 = p_2 = C - Z_M + \Delta A$	

Tabla 3.- Resumen de las formulas básicas del DMT



V.3. PARÁMETROS INDIRECTOS

V.3.1. Peso unitario, γ (tipos de suelos)

El objetivo principal del esquema presentado en la figura 28, no es la estimación exacta de γ , pero si la posibilidad de construir un perfil aproximado del esfuerzo efectivo vertical σ'_{v0} .

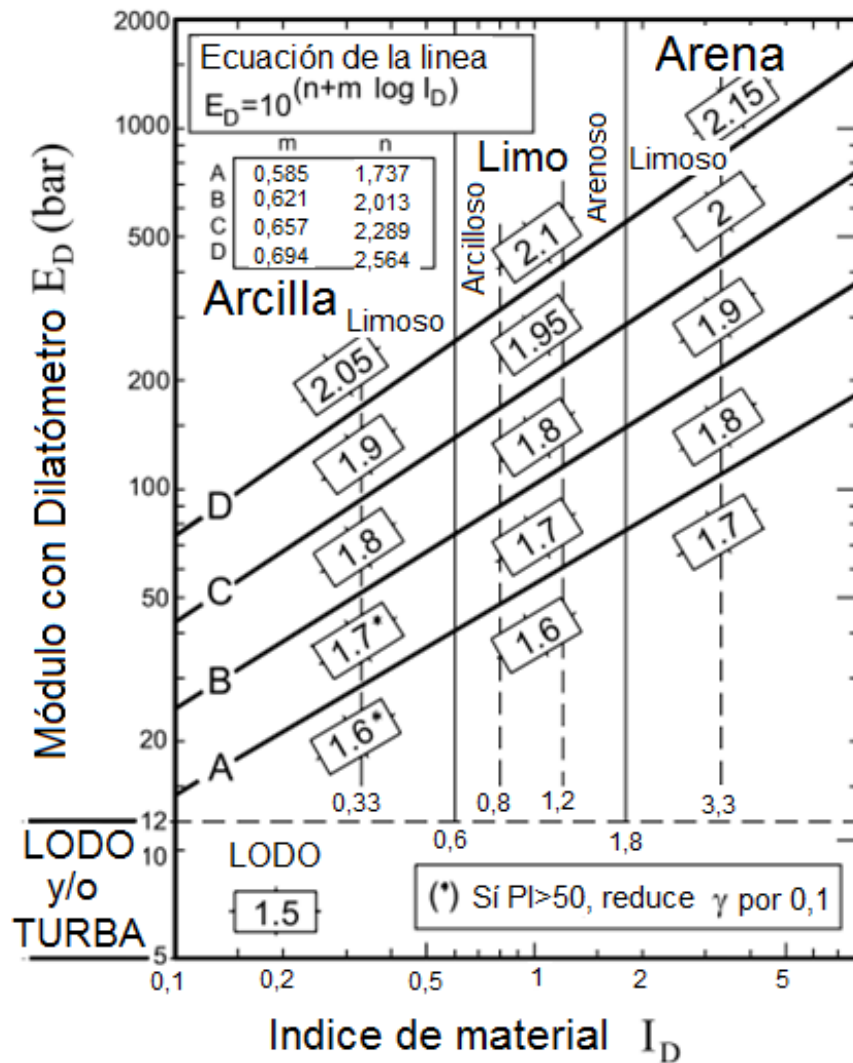


Figura 28.- Esquema para estimar tipos de suelo y peso volumétrico (normalizado al $\gamma_w = \gamma$ agua) - Marchetti & Crapps 1981 - (1 bar = 100 kPa)

Es importante mencionar que en la tabla de la figura 28, sólo se debe utilizar sino se tiene información clara del sitio, de otra manera es mejor estimar el γ con datos propios del lugar.



V.3.2. OCR En Arcillas

La correlación original de la relación de preconsolidación OCR, se deriva del índice de esfuerzo horizontal K_D (basado en los datos sólo para arcillas sin consolidar) y fue propuesto por Marchetti (1980) al observar la similitud entre el perfil de K_D y el perfil de OCR:

$$OCR_{DMT} = (0.5 K_D)^{1.56} \dots\dots\dots(6)$$

En la ecuación 6, se da la correspondencia $K_D = 2$ para $OCR = 1$ (es decir $K_{D,NC} \approx 2$). Esta correspondencia ha sido confirmada en muchos depósitos de arcilla NC.

La correlación de OCR- K_D original para la arcilla también fue comprobada por un análisis de datos recolectados por Kamei & Iwasaki 1995 (figura 29), y, teóricamente, por Finno 1993 (figura 30).

Un $K_D \approx 2$ representa el mínimo valor para $K_{D,NC}$. Si una arcilla NC tiene $K_D > 2$, indica la existencia probable de alguna estructura o cimentación.

V.3.3. Indicaciones prácticas para estimar OCR en arcillas

- La correlación de OCR- K_D original (ecuación 6) es una buena base para conseguir una primera interpretación del perfil de OCR (o por lo menos, información generalmente exacta sobre su forma).
- En general el perfil de K_D es útil para "entender" el historial de esfuerzos. El perfil de K_D permite discernir arcillas NC de las arcillas OC. El perfil de K_D es a menudo el primer diagrama que el ingeniero inspecciona, porque de él puede obtener una idea general de su historial de esfuerzos.



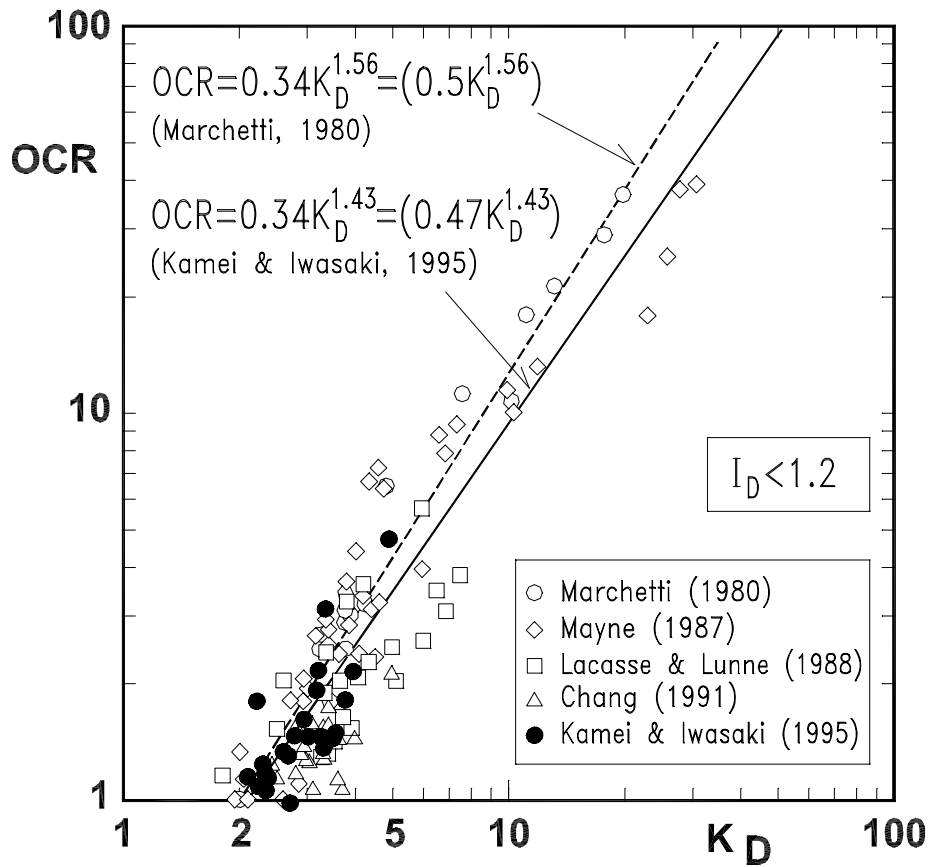


Figura 29.- Correlación K_D -OCR para los suelos cohesivos de varias áreas geográficas (Kamei & Iwasaki 1995)

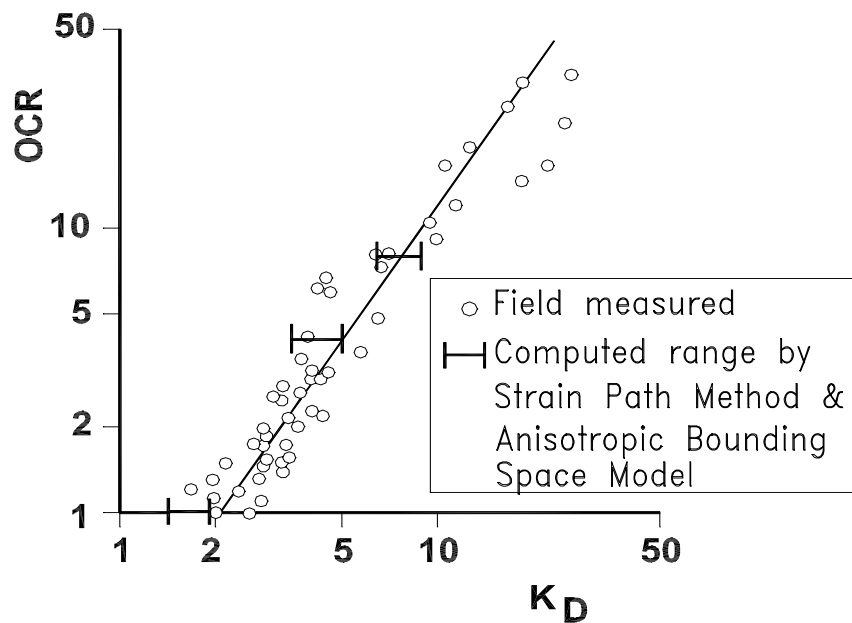


Figura 30.- K_D teórico contra OCR (Finno 1993)



V.3.4. K_0 en arcillas

La correlación original para K_0 , relativa a las arcillas no consolidadas (Marchetti 1980), es:

$$K_0 = (K_D / 1.5)^{0.47} - 0.6 \dots \dots \dots (7)$$

V.3.5. K_0 en arenas

El coeficiente de presión lateral de suelos en reposo se obtiene para valores de $I_D < 1.2$ con la siguiente ecuación:

$$K_{0,DMT} = (K_D / 1.5)^{0.47} - 0.6 \dots \dots \dots (8)$$

Para el caso en que los valores de I_D son mayores, es utilizada entonces la ecuación general:

$$K_0 = 0.376 + 0.095 K_D - 0.0046 q_c / \sigma'_{v0} \dots \dots \dots (9)$$

V.3.6. Resistencia no drenada, c_u

La correlación original para determinar el c_u a partir del DMT (Marchetti 1980) es la siguiente:

$$c_u = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25} \dots \dots \dots (10)$$

Un ejemplo de comparaciones entre el c_u determinado por DMT y c_u hallado por otras pruebas se muestran en las figuras 31 y 32.



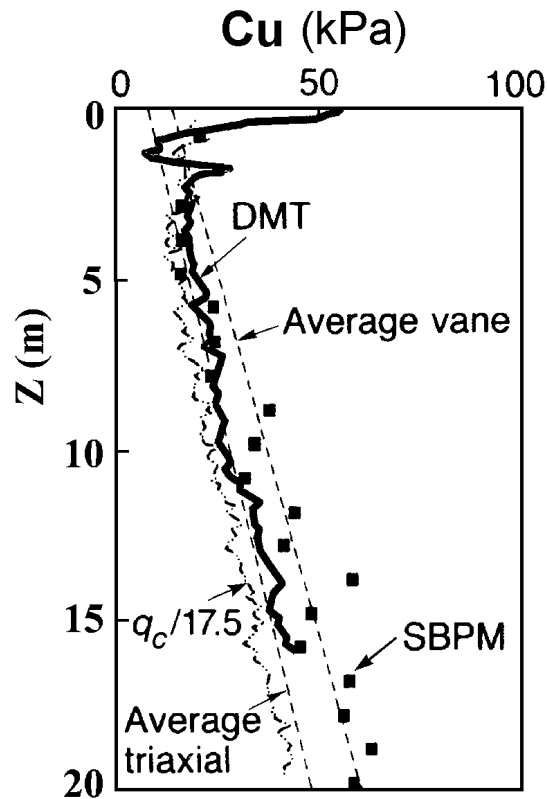


Figura 31.- Comparación entre c_u determinado por DMT y por otras pruebas en el mismo Sitio de la Investigación Nacional de Bothkennar, REINO UNIDO (el Nash et al. 1992)

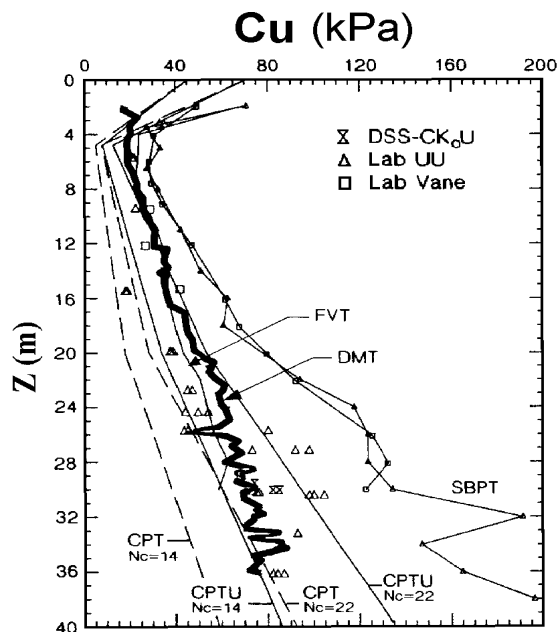


Figura 32.- Comparación entre c_u determinado por DMT y por otras pruebas al Sitio de la Investigación Nacional de Fucino, Italia (el Burghignoli et al. 1991)



V.3.7. Ángulo de fricción, ϕ

Existen dos métodos para estimar ϕ con DMT. El primer método (Método 1) proporciona las estimaciones simultáneas de ϕ y K_0 derivadas del par K_D y q_D (Método 1a) o del par K_D y q_c (Método 1b). El segundo método (Método 2) proporciona una estimación de ϕ sólo basada en K_D . Para efectos prácticos en los análisis de resultados de DMT se utiliza con mayor frecuencia el segundo método, cuya ecuación es:

$$\phi_{safe,DMT} = 28^\circ + 14.6^\circ \log K_D - 2.1^\circ \log^2 K_D \dots\dots\dots(11)$$

V.3.8. Módulo Odométrico, M

El módulo M determinado mediante el DMT (a menudo designado como M_{DMT}) es una estimación del módulo obtenido con el odómetro ($E_{oed} = 1/m_v$).

M_{DMT} se obtiene aplicando a E_D el factor de la corrección R_M según la siguiente expresión:

$$M_{DMT} = R_M E_D \dots\dots\dots(12)$$

Las ecuaciones que definen $R_M = f(I_D, K_D)$ (Marchetti 1980) se muestran en la tabla 2. El valor de R_M aumenta con K_D .

Un ejemplo de comparación entre M_{DMT} y M obtenido con odómetro de alta calidad se muestra en las figuras 33 y 34.



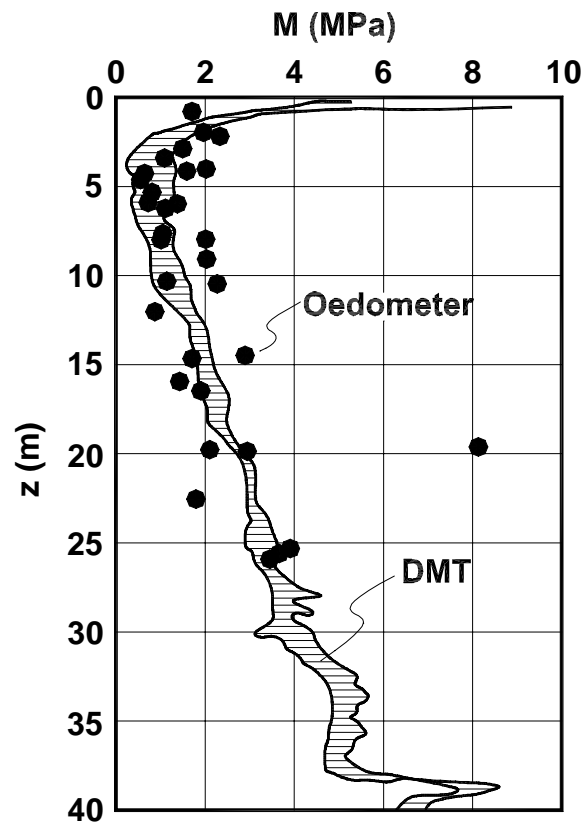


Figura 33.- Comparación entre M determinado con el DMT y con pruebas odométricas, arcilla de Onsøy, Noruega (Lacasse 1986)

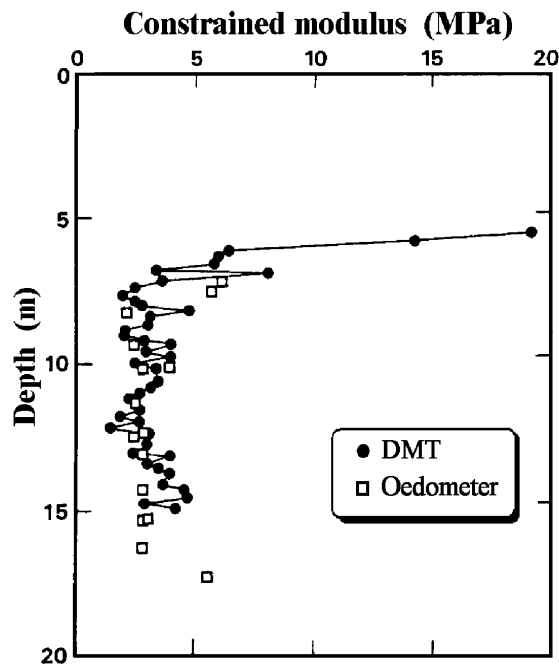


Figura 34.- Comparación entre M determinado con el DMT y con pruebas odométricas, sitio de Komatsugawa, Japón (el Iwasaki et al. 1991)



V.3.9. Módulo de Young, E'

El Módulo de Young E,' de la estructura del suelo puede derivarse de M_{DMT} usando la teoría de elasticidad:

$$E' = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} M \dots\dots\dots(13)$$

(Por ejemplo para una razón de Poisson $\nu = 0.25-0.30$ uno obtiene $E' \approx 0.8 M_{DMT}$).

El Módulo de Young E' no debe confundirse con el Módulo del dilatómetro E_D.

V.3.10. Módulo de cortante máximo, G₀

Originalmente los resultados del DMT no proporcionaban una correlación para el módulo de cortante máximo G₀, en consecuencia, muchos investigadores han propuesto correlaciones que relacionan los resultados de DMT con G₀.

En arcillas NC (donde K_D ≈ 2) G₀ /E_D ≈ 7.5, en arenas G₀ /E_D disminuye al incrementarse K_D, en particular G₀ /E_D disminuye de ≈ 7.5 para un K_D pequeño (1.5-2) a ≈ 2 para K_D > 5.

V.3.11. Coeficiente de consolidación, c_h

El método recomendado por los autores para estimar c_h de las disipaciones del DMT es el método DMT-A (Marchetti & Totani 1989, ASTM Draft 2001).

El coeficiente de consolidación horizontal c_h se infiere entonces de la proporción descendente.

La interpretación de la dispersión DMT-A para evaluar c_h es muy confiable (Marchetti & Totani 1989):

- 1) Graficar la curva A-log t
- 2) Identificar los puntos de inflexión en la curva y asociarlos con el tiempo (t_{flex})
- 3) Obtener c_h como:

$$c_h, OC \approx 7 \text{ cm}^2 / t_{flex} \dots\dots\dots(14)$$



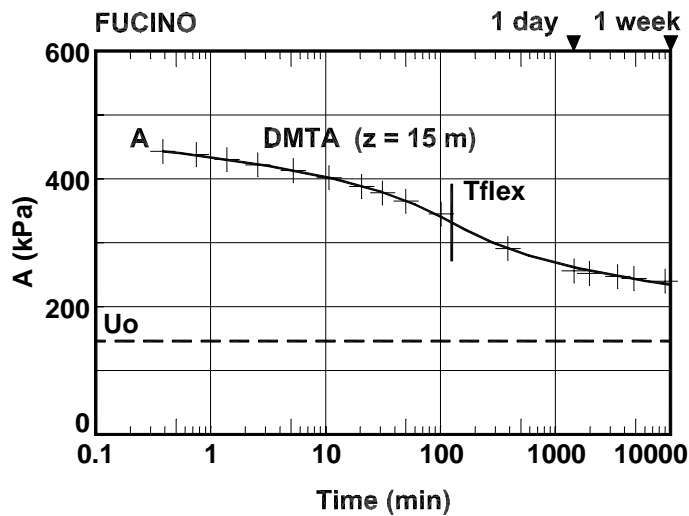


Figura 35.- Ejemplo de curva de disipación de presión de poro DMT-A

V.3.12. Coeficiente de permeabilidad, k_h

Schmertmann (1988) propone el procedimiento siguiente para determinar k_h de c_h :

- 1) Estimar M_h usando $M_h = K_0 M_{DMT}$, es decir asumir M proporcional al esfuerzo efectivo en la dirección deseada.

2) **Obtener $k_h = c_h \gamma_w / M_h$ (15)**

V.3.13. Presión de poro u_0

u_0 en arenas es estimado como P_2 , donde:

$u_0 = P_2 = C - Z_M + \Delta A$(16)



VI. SIMILITUD CON OTROS SONDEOS

En los capítulos anteriores se han descrito las características principales del dilatómetro de Marchetti, además se han detallado los procedimientos de calibración, ejecución y mantenimiento para la realización de un sondeo, también se describió la manera de mostrar los resultados para un mayor entendimiento de la estratigrafía y sobre todo, se detalló cada uno de los parámetros directos, indirectos y las correlaciones que actualmente se utilizan para estimar las características geotécnicas de los suelos.

A continuación se mostrarán los resultados de una campaña de exploración realizada por la CFE y posteriormente se compararán los resultados con pruebas de SPT y con los valores de velocidad de onda cortante (V_s), realizados con el dilatómetro sísmico.

VI.1. PROYECTO “REFINERÍA MADERO, CIUDAD MADERO TAMAULIPAS”

El proyecto contempla la remodelación, ampliación y modernización de varias secciones de la Refinería Madero, para esto se realizó una campaña de exploración que incluía: Sondeos Mixtos, Sondeos SPT, Sondeos CPTu y Sondeos con DMT y SDMT, todo ello para determinar los parámetros geotécnicos de diseño y proponer una cimentación adecuada para cada estructura.

El sitio en estudio es conocido como CADI, es un terreno de aproximadamente 12 hectáreas donde se proyectan equipos para destilados (unidades 503 y 504) y recuperadores de azufre, entre otras estructuras. En la figura 36 se muestra la ubicación de los sondeos realizados.

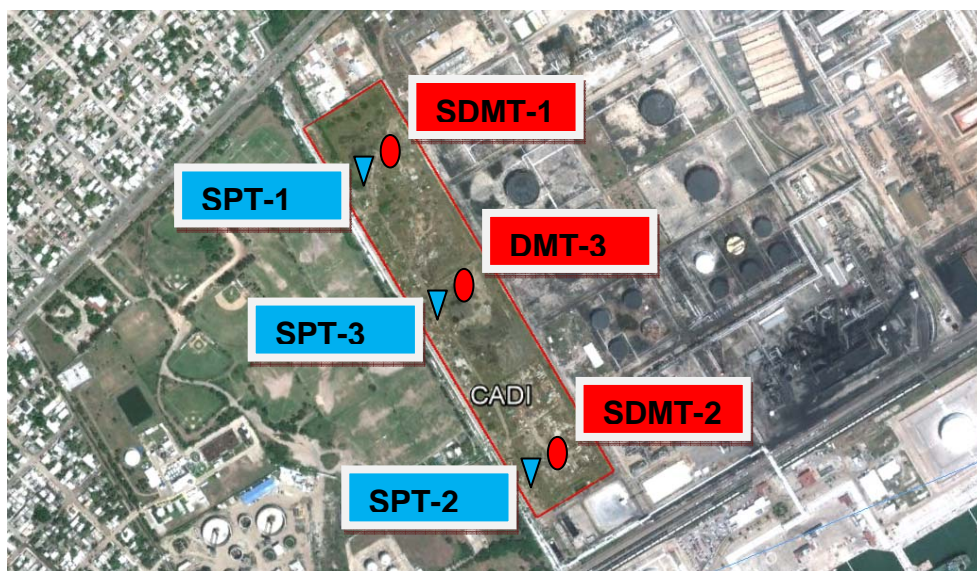


Figura 36.- Ubicación de los sondeos en el CADI

Los 3 sondeos que a continuación se muestran corresponden a los realizados con el equipo del Dilatómetro de Marchetti con el aditamento sísmico (SDMT-1 Y SDMT-2) en los sitios de la Unidad 503 y en la Planta Recuperadora de Azufre respectivamente y el DMT-3 corresponde al realizado en la Unidad 504.

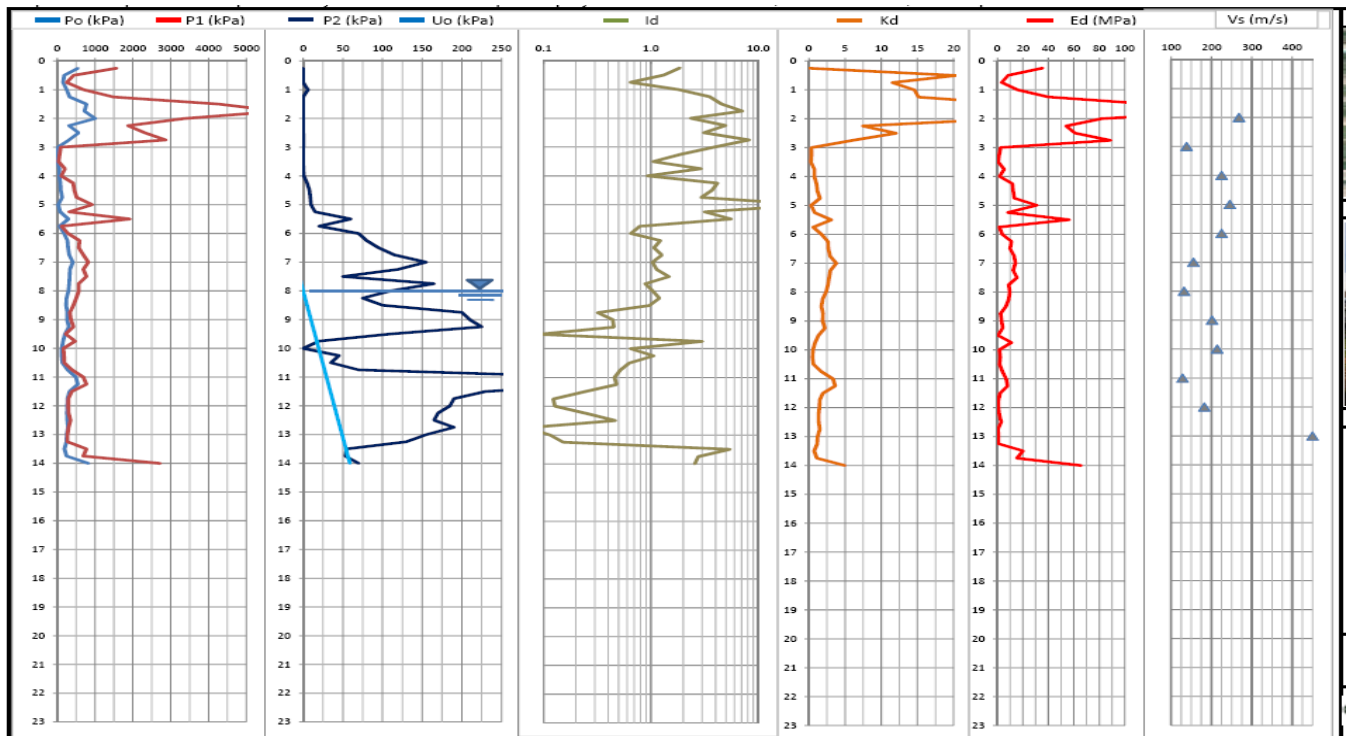


Figura 37.- Sondeo SDMT-1 en la Unidad 503



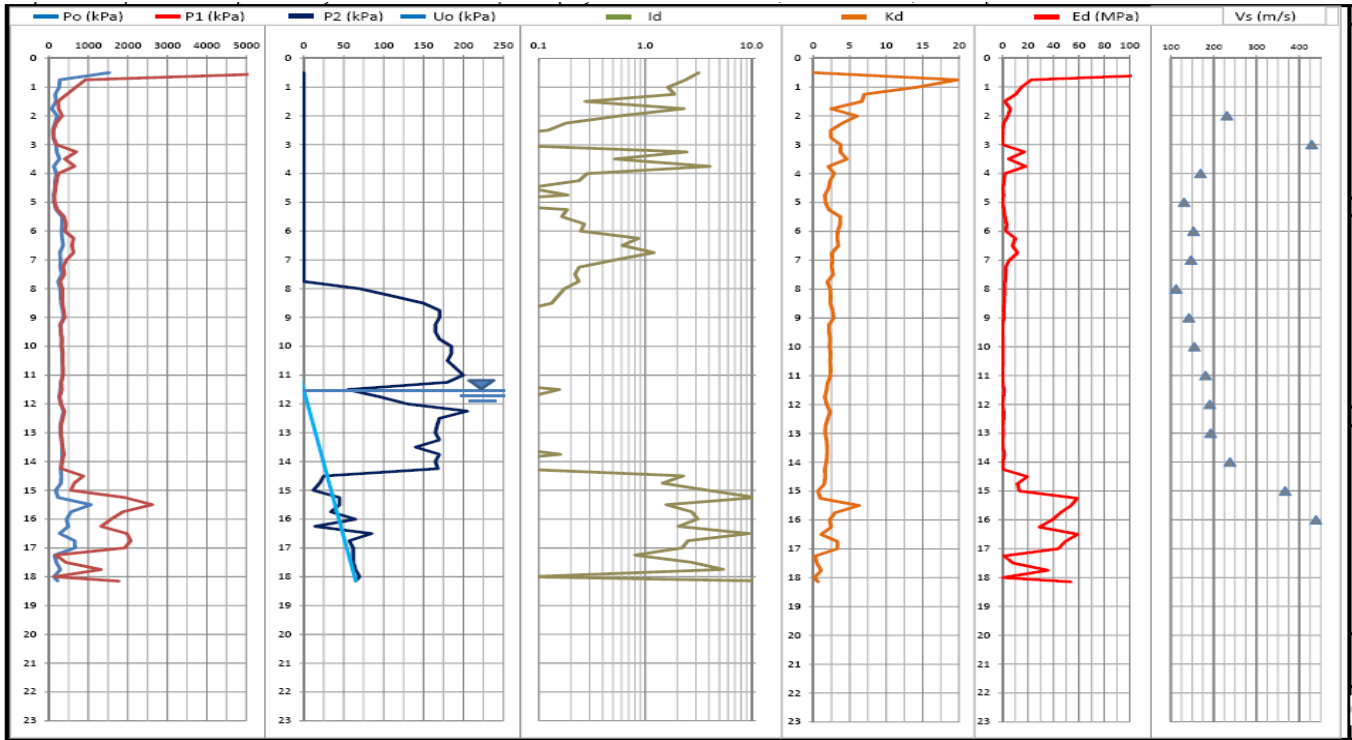


Figura 38.- Sondeo SDMT-2 en la Planta Recuperadora de Azufre

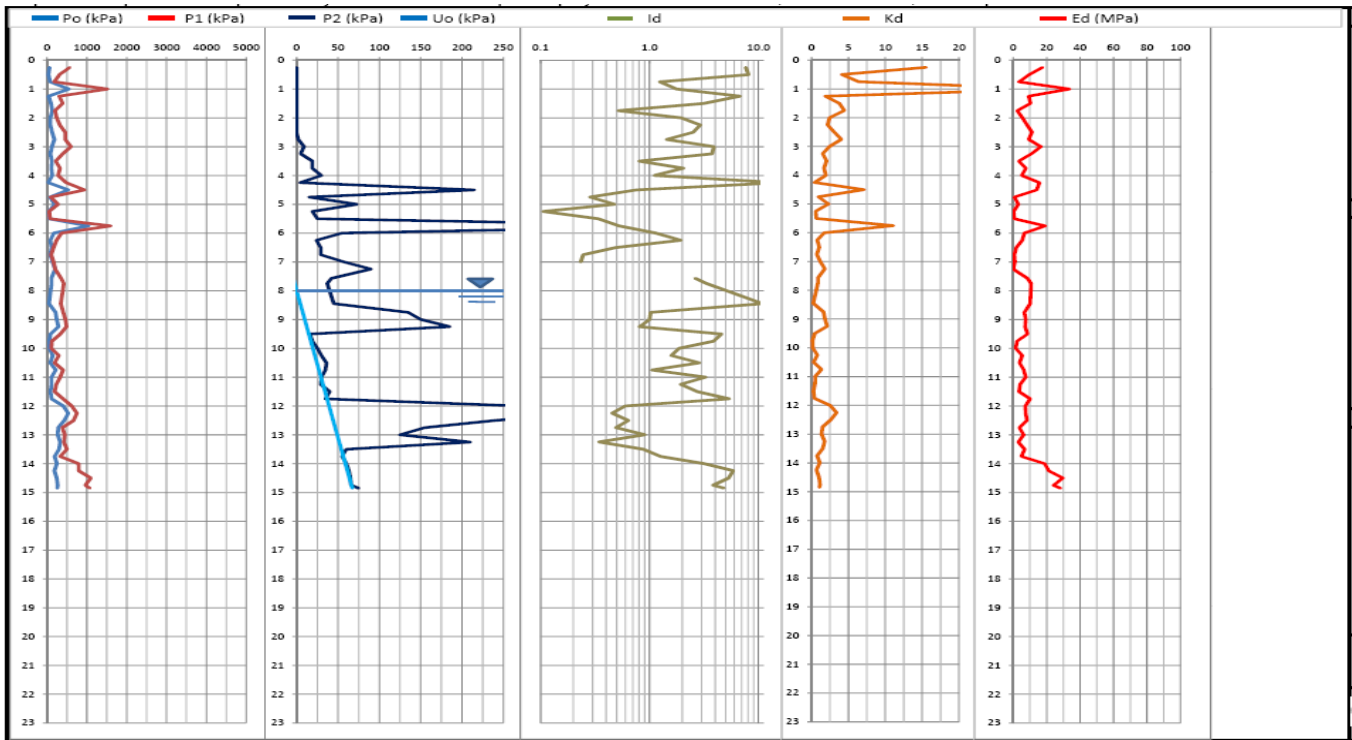


Figura 39.- Sondeo DMT-3 en la Unidad 504



Con los valores leídos directamente de la prueba se obtienen los parámetros directos P_0 y P_1 , que al graficarse muestran una estratigrafía definida, donde podemos interpretar a simple vista las zonas de mayor resistencia del suelo, incluso como se vio en la figura 27, la cercanía de ambas lecturas denotan suelos finos (arcillas) y donde existe una mayor separación se pueden clasificar como suelos gruesos (arenas).

En la segunda columna se presenta el valor de la presión hidrostática existente u_0 , que corresponde precisamente con la lectura "C" tomada en la prueba la cual se deriva en P_2 , en los materiales cohesivos la P_2 es muy errática y mayor a la presión hidrostática, pero en los materiales arenosos se ajustan muy bien ambas curvas. En la figura 39, se observa que existen dos estratos por debajo de la presión hidrostática considerados como drenantes, entre 10 y 12 m es el primero y el otro de los 13,5 m en adelante, en estas 2 secciones los valores de P_2 tienden a ajustarse con la hidrostática.

El índice del material I_D , como ya se comentó anteriormente, se utiliza para la clasificación del suelo y depende directamente de los valores P_0 y P_1 , obsérvese por ejemplo en la figura 38, cómo de los 8 a los 14 m de profundidad los valores P_0 y P_1 están muy cercanos, entonces el I_D es bastante pequeño y corresponde a una clasificación de suelo arcilloso.

En las consecuentes 2 columnas se presentan las gráficas de K_D y E_D , que tienen una relación muy estrecha con la estratigrafía del suelo, por un lado el Índice de Esfuerzo Horizontal K_D está directamente ligado con el grado de preconsolidación (OCR) y el Módulo dilatométrico, E_D , con la rigidez del material. Este parámetro se usa en combinación con I_D y K_D para la estimación de los parámetros indirectos.

Para los casos de las figuras 37 y 38, existe otra gráfica donde se presenta la medición de la Velocidad de Onda Cortante V_s , este valor añade también una característica que es directamente cuantificable con el tipo de suelo.

Durante la misma campaña de exploración se realizaron también sondeos mixtos (SM) relativamente cercanos a los ejecutados con el dilatómetro, con los sondeos mixtos se obtuvo el número de golpes SPT y se extrajeron muestras inalteradas con tubo Shelby, luego las muestras obtenidas se transportaron al laboratorio para su clasificación y programación para pruebas mecánicas.

Las pruebas índice realizadas en el laboratorio básicamente fueron para conocer el contenido de agua, el porcentaje de finos y los límites de consistencia, además de su clasificación visual, luego en las muestras inalteradas se realizaron las pruebas correspondientes para conocer la densidad de los sólidos, la relación de vacíos y finalmente se ejecutaron pruebas triaxiales.



A continuación se muestran en las figuras 40, 41 y 42, las graficas de los sondeos mixtos realizados muy cerca de los sondeos con dilatómetro.

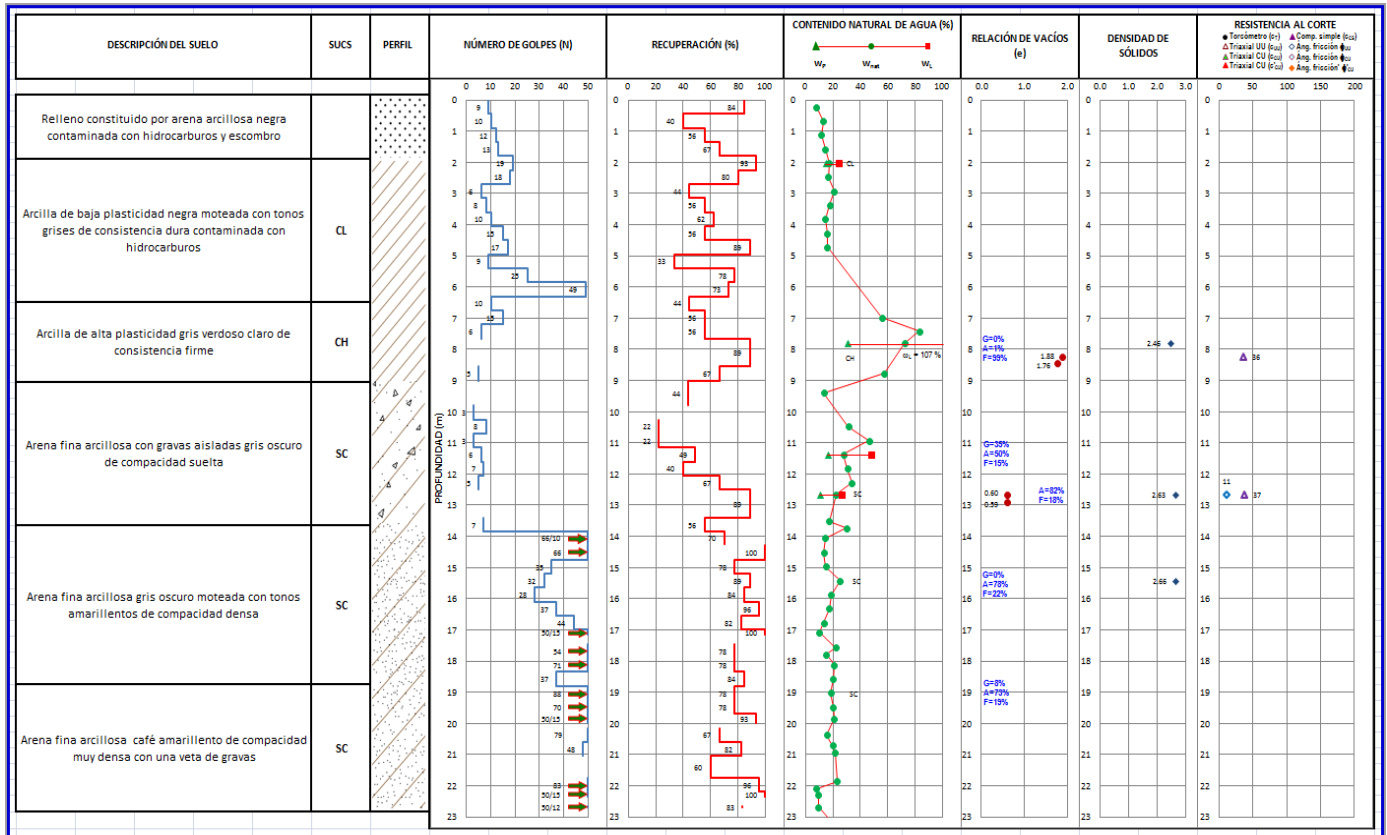


Figura 40.- Sondeo SM-1 en la Unidad 503



EJECUCIÓN E INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS IN SITU CON EL EQUIPO DEL DILATÓMETRO (DMT)

OCTAVIO HERNÁNDEZ ZARAGOZA

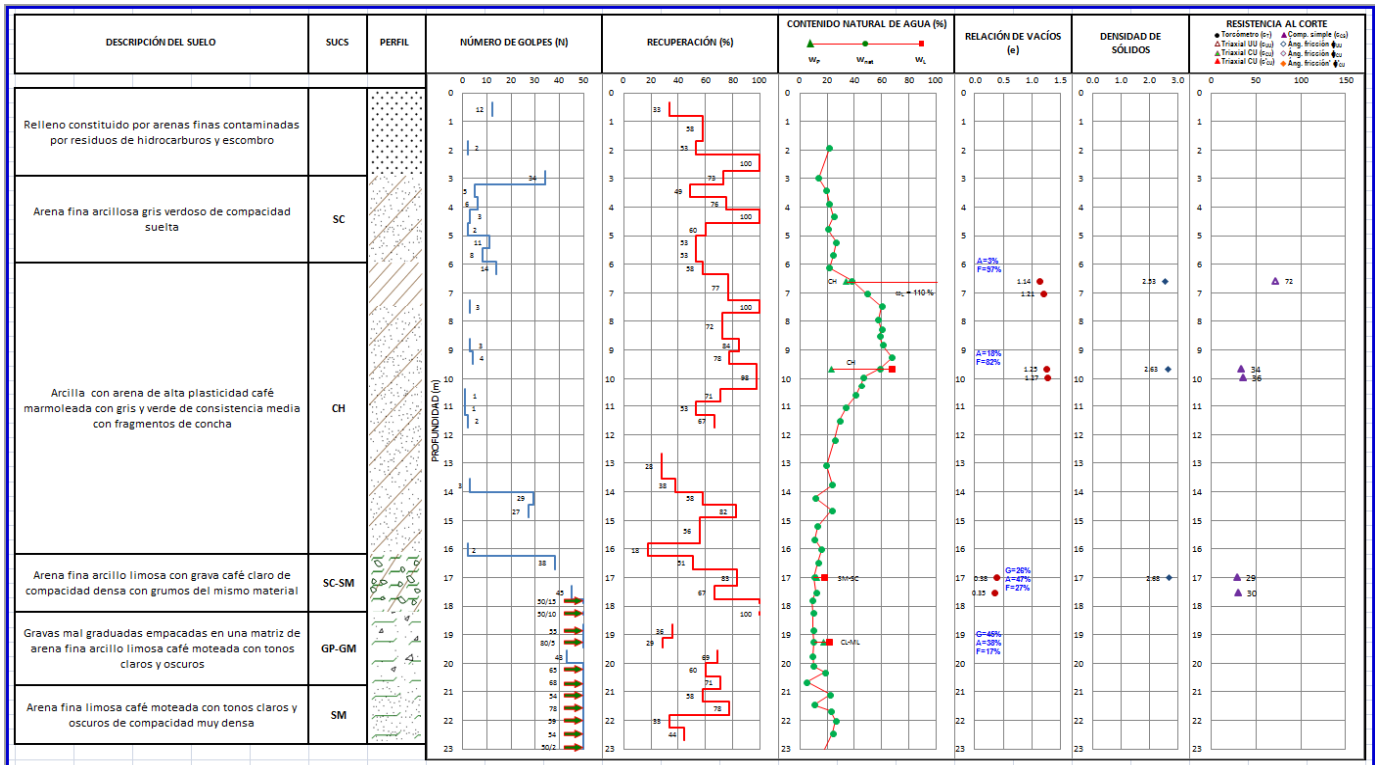


Figura 41.- Sondeo SM-2 en la Planta Recuperadora de Azufre

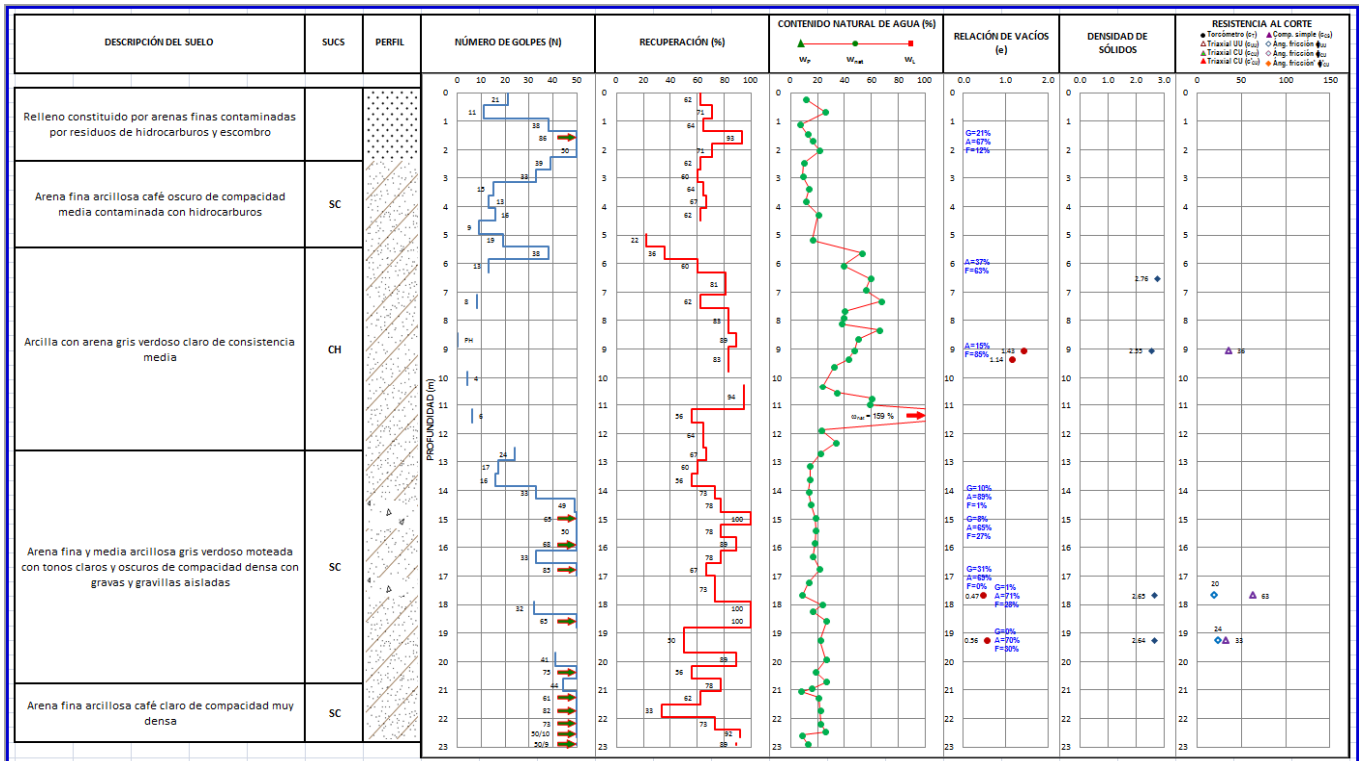


Figura 42.- Sondeo SM-3 en la Unidad 504



En las 3 figuras anteriores se muestran los resultados de los sondeos mixtos con los parámetros ya mencionados, se incluye también la clasificación SUCS y un perfil del porcentaje de recuperación obtenido en cada muestra para cada sondeo realizado.

La cercanía de cada par de sondeos (dilatómetros y sondeos mixtos) permitió comparar algunas de sus características obtenidas directa e indirectamente, por ejemplo, si observamos las figuras 43, 44 y 45, en la segunda grafica se muestra el perfil del número de golpes SPT (N_{SPT}) y se superpone el calculado con el dilatómetro (N_{DMT}), se observa como ambos perfiles mantienen cierto comportamiento similar a lo largo de todo el sondeo, incluso al final del sondeo con el dilatómetro el número de golpes del SPT es mayor a 50.

En las siguientes graficas se muestran algunos parámetros indirectos calculados con los datos del dilatómetro: el módulo dilatométrico, el ángulo de fricción, la resistencia no drenada y el OCR, es importante mencionar que también en la grafica de la resistencia no drenada se colocan los valores obtenidos en las pruebas triaxiales que concuerdan con los calculados indirectamente con el dilatómetro.

La grafica de las velocidades de onda (V_s) muestran una particularidad con la estratigrafía de los sondeos, mientras la velocidad es mayor el material se considera más competente, y se puede traducir en un suelo duro o de mayor consistencia y viceversa, mientras la velocidad de onda es menor, el suelo se interpreta como una arcilla blanda o un material menos competente.

Y finalmente, analizando todos los resultados de ambos sondeos, se construye un modelo estratigráfico, donde generalizamos y cuantificamos las características de cada estrato con valores representativos que definen a la masa de suelo, además de interpretarse el comportamiento mecánico para después evaluar las características de la cimentación y estructura que se construirá.

A continuación en las figuras 43, 44 y 45, se comparan los sondeos mixtos y los ejecutados con el dilatómetro para cada zona explorada, con los parámetros directos e indirectos antes descritos.



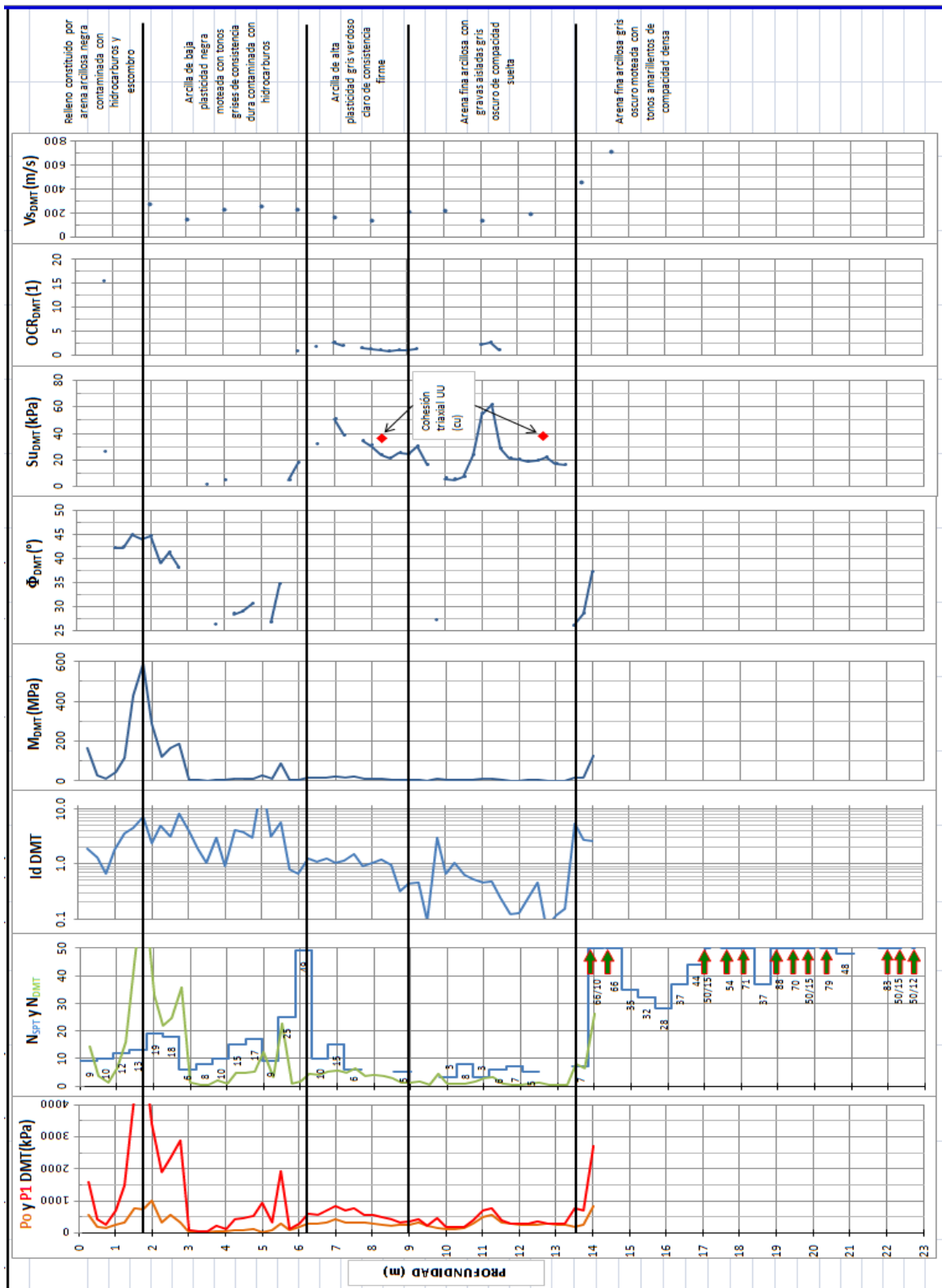


Figura 43.- Sondeos SM-1 y SDMT-1 con parámetros indirectos en la Unidad 503



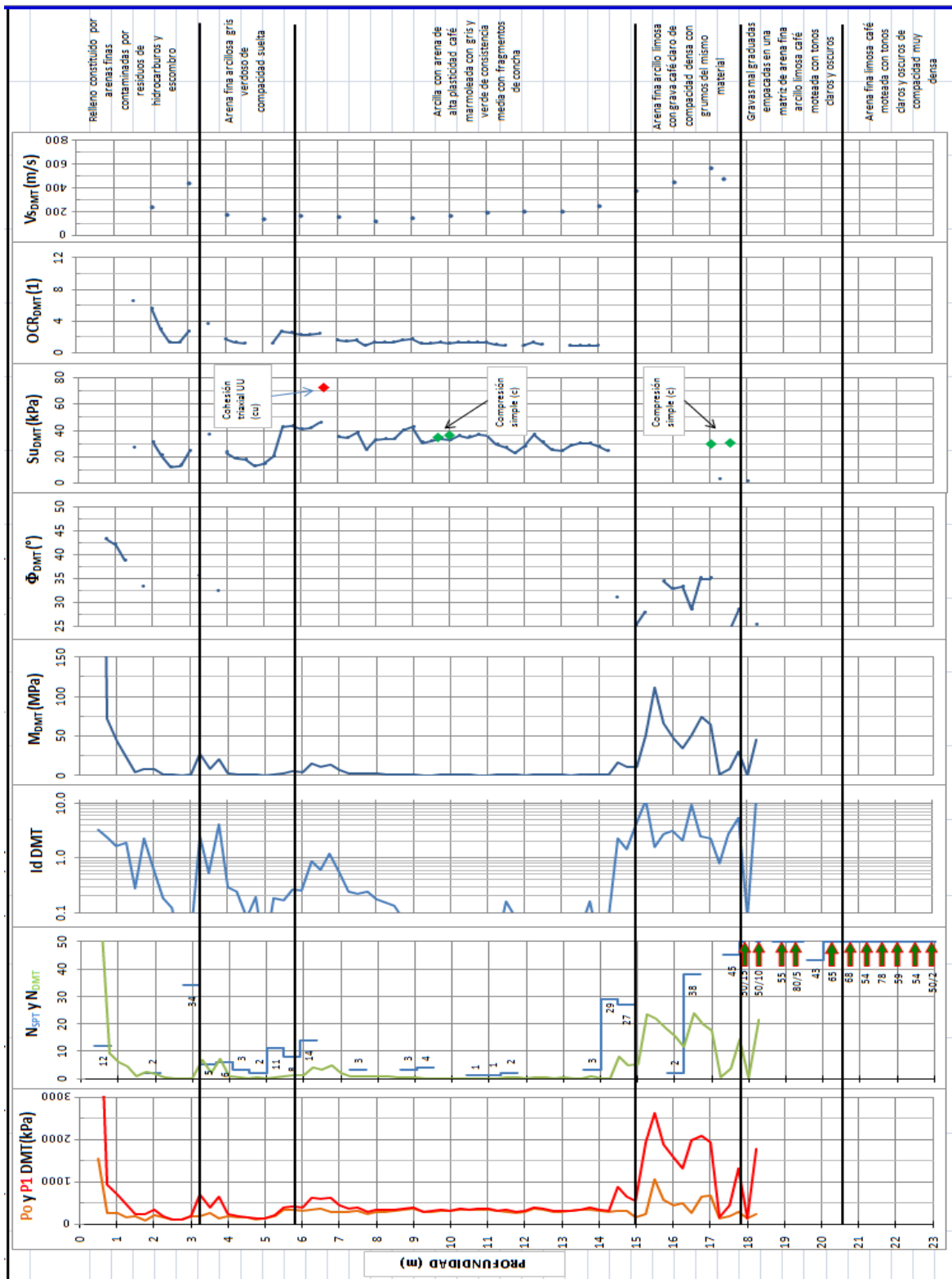


Figura 44.- Sondeos SM-2 y SDMT-2 con parámetros indirectos en la Planta Recuperadora de Azufre



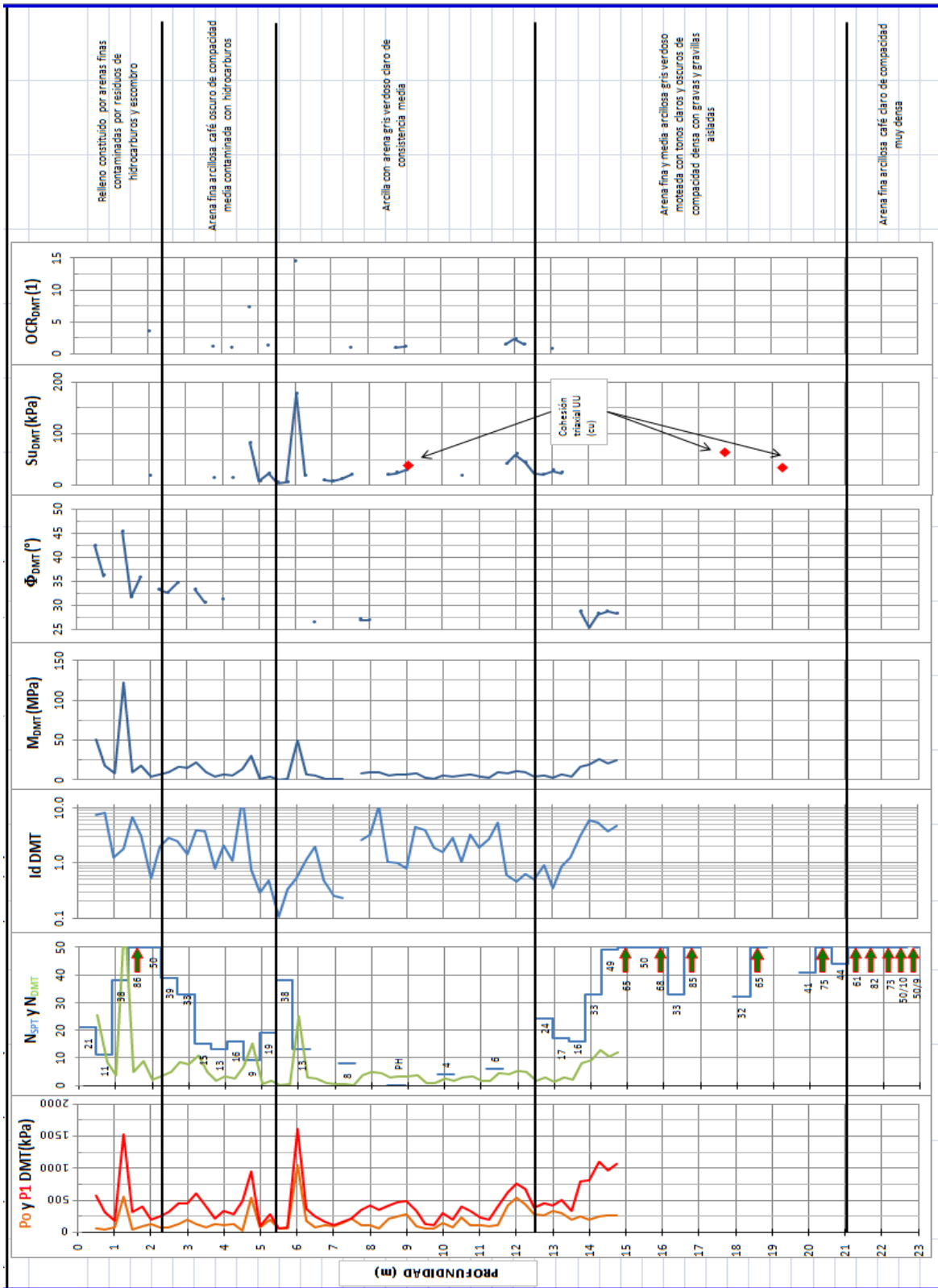


Figura 45.- Sondeos SM-3 y DMT-3 con parámetros indirectos en la Unidad 504



VII. CONCLUSIONES

Los ensayos in situ son de gran utilidad para predecir la respuesta mecánica del suelo en condiciones de carga o descarga. El nivel de predicción que se logra de esta manera es considerablemente alto.

El presente trabajo pretende dar a conocer un ensayo poco extendido en México, que sin embargo permite obtener importantes parámetros "In situ" de los suelos. El Ensayo Dilatométrico de Marchetti (DMT), es 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 , Índice 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 del esfuerzo efectivo horizontal y estar relacionado con la razón de sobreconsolidación del suelo (OCR), es muy útil para conocer la historia de esfuerzos del terreno y 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 de esfuerzos de un suelo (estratigrafía, OCR y K_0 , C_u , en suelos cohesivos; DR% y ϕ en suelos granulares y el módulo edométrico en suelos granulares y cohesivos).

En el caso de terrenos cohesivos los parámetros OCR, K_0 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 otros tipos para tener características más aproximadas del suelo.

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

VII.1. VENTAJAS

- Toma de lecturas de manera manual o electrónica.
- Aumentar la longitud del cable durante la prueba.



- Resultados confiables e inmediatos.
- Procedimiento sencillo.
- Fácil identificación de problemas en campo.
- Varios métodos de inserción de la cuchilla.
- Procedimiento estandarizado.

VII.2. DESVENTAJAS

- No extrae muestras de suelo.
- Estimaciones por correlación.
- Rotura de membrana a medio sondeo.
- No puede operar en gravas, ni cruzar estratos de suelos duros mayores a 0.5 m.
- Verticalidad necesaria.



VIII. REFERENCIAS

- MOP-SGM, Manual de Operación de la Subgerencia de Geotecnia y Materiales.
- ASTM D-6635-01 Standard Test Method for Performing the flat plate Dilatometer.
- ASTM D1586-00 Standard Test Method for Penetration Test and Split Barrel Sampling of Soils.
- ASTM D 3441 Standard Test Method for Cone Penetration Test.
- Report of the Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), Technical Committee 16. In situ 2001, Intl Conf. On In Situ Measurement of soil Properties, Bali, Indonesia.
- TC16 (2001) "The Flat Dilatometer Test (DMT) in soil investigations" ISSMGE Committee.
- Rivera, Ivan. (2009). An Evaluation of Seismic Flat Dilatometer and Lateral Stress Seismic Piezocone. Tesis de Maestría. University of British Columbia.
- Santoyo, Enrique. (2010). Exploración de Suelos, Métodos Directos e Indirectos, Muestreo y Pruebas de Campo.
- DMT en Internet:
Diversos artículos e información adicional puede descargarse libremente desde la página: www.marchetti-dmt.it

