

## XII CONGRESO NACIONAL DE GEOTECNIA CONGEO 2015

### COMPARACIÓN DE PROPIEDADES GEOTÉCNICAS OBTENIDAS POR MEDIO DE DISTINTOS ENSAYOS IN SITU (SDMT, CPT, PMT, SPT Y ENSAYOS DE LABORATORIO)

### COMPARISON OF GEOTECHNICAL PROPERTIES OBTAINED FROM DIFFERENT IN SITU TEST (SDMT, CPT, PMT, SPT AND LABORATORY TESTS)

**David Ulloa Sáenz**

Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad. Ingeniero geotecnista,  
Tel: (506) 2000-5205. [dulloas@gmail.com](mailto:dulloas@gmail.com)

### RESUMEN

La calidad de un diseño geotécnico está íntimamente ligada a la correcta caracterización y determinación de las propiedades geotécnicas de los materiales presentes en el sitio, sin embargo, en muchas ocasiones se utilizan métodos de exploración geotécnica que presentan grandes incertidumbres, lo que deriva en un encarecimiento de los diseños ya que el diseñador debe optar por ser conservador en la determinación de las propiedades de los materiales.

En el país el ensayo de campo más utilizado es el Ensayo de Penetración Estándar (SPT), esto debido a su bajo costo y facilidad en comparación con otros ensayos, sin embargo, en el mundo existen desde hace muchos años otros ensayos que permiten determinar de mejor forma los parámetros geotécnicos y que han sido extensivamente utilizados, por lo que cuentan en la actualidad con una robusta base que los hace muy confiables, como por ejemplo el Dilatómetro Sísmico Marchetti (SDMT), el Piezocono (CPTu) y el Presiómetro (PMT). En la actualidad la difusión de estos ensayos en el país ha sido limitada, esto debido a que existen pocos equipos de este tipo en el mercado local.

En este trabajo se presenta un análisis comparativo de los resultados obtenidos por el Área de Ingeniería Geotécnica del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en la aplicación de ensayos de investigación geotécnica “avanzada” (SDMT, CPT y PMT) con respecto a otros ensayos de campo como el SPT, refracción sísmica y ensayos de laboratorio como pruebas Triaxiales, Consolidación Unidimensional, clasificación y compresión inconfiada.

Se presenta un análisis tomando como base tres sitios de prueba con distintas litologías, en los cuales fue posible obtener datos de dos o más ensayos in situ y que son utilizados para la validación de los resultados obtenidos de los distintos ensayos de campo.

Se concluye que los resultados obtenidos por ensayos SDMT y CPT arrojan muy buenos resultados en cuanto propiedades de resistencia, deformación e identificación del tipo de material comparados con otros ensayos de in situ y laboratorio, lo que se traduce en un conocimiento muy amplio de las propiedades del suelo y una significativa reducción en el tiempo de ejecución de los estudios geotécnicos.

Se espera que el presente artículo contribuya con la difusión de los ensayos de investigación geotécnica avanzada en el país y que se sume a otros como el presentado por Vargas (2012), el cual también se encuentra enfocado en la misma línea investigativa.

## ABSTRACT

The quality of a geotechnical design is closely linked to the correct characterization and determination of geotechnical properties of the materials found on the site. However, in some cases, the use of some geotechnical exploration methods shows uncertainties, which leads to the increase of the price of the designs, since the designer must choose to be conservative in determining the properties.

In the country, the in situ test which is mostly used is the Standard Penetration Test (SPT), this is because it is easier to use and it has a lower cost compared to other in situ tests. Nevertheless, in the world, there are other in situ tests that allow a more reliable result of the determination of the geotechnical properties. In addition, these in situ tests have been extensively used, so now they have a solid database, such as the Seismic Flat Dilatometer (SDMT), the Piezocone (CPTu) and the pressuremeter (PMT). Nowadays, the dissemination of these in situ tests in the country has been limited, because there is a very limited offer in the local market.

This research shows a comparative analysis of the results obtained by the Department of Geotechnical Engineering of the *Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)* in the application of advanced geotechnical in situ test (SDMT, CPT and PMT) in relation to other in situ tests such as SPT and laboratory tests, like Triaxial Compresión, Unidimensional Consolidation, Classification (SUCS) and Unconfined Compression.

The analysis is based on three test sites with different lithologies located in different areas of the country, where it was possible to obtain data from different in situ and laboratory tests, which are used to validating the results obtained by the different tests performed.

It can be conclude that the results obtained from SDMT and CPT tests show very good results in the determination of geotechnical properties, such as resistance, deformation and identification of the type of material which have been compared to other in situ and laboratory tests, leading to a very wide knowledge of the soil properties and a significant reduction in the execution time of geotechnical studies.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen en el mundo una gran variedad de ensayos para determinar las propiedades geotécnicas de los distintos materiales, pasando desde los ensayos tradicionales, como el SPT y la veleta, a ensayos avanzados como los de “Empuje Directo” (*Direct pushing*) como el SDMT y el CPTu, los cuales ha sido catalogados por distintos autores como el futuro de la investigación geotécnica.

La elección del ensayo in situ idóneo depende de varios factores, como por ejemplo el tipo de problema a resolver, magnitud de la obra, tipo de material y disponibilidad en el mercado. En algunos casos la mejor alternativa podría ser realizar más de un tipo de ensayo in situ o combinarlo con ensayos de laboratorio, que permitan caracterizar de la mejor forma las propiedades del terreno.

Los resultados obtenidos de distintos ensayos de campo y laboratorio siempre presentarán variaciones inherentes a la forma en que se determinan las propiedades de acuerdo a cada uno de los ensayos. Por ejemplo el grado de alteración que produzca el ensayo en la estructura del terreno, la manipulación de las muestras (en caso de ensayos de laboratorio) y la capacidad de un determinado equipo para medir una propiedad específica del terreno. Con el fin de poder definir el mejor ensayo para un determinado caso el ingeniero geotecnista debe conocer y estar familiarizado con los principios básicos de cada uno de los ensayos in situ, con el fin de contar con criterio suficiente para definir una correcta campaña de investigación.

En este trabajo se presenta una comparación de resultados obtenidos de distintos ensayos geotécnicos in situ, así como de ensayos de laboratorio realizados por el Área de Ingeniería Geotécnica de ICE para distintas obras en tres sitios geotécnicamente distintos. El objetivo principal de esta comparación es corroborar, con experiencia local, la fiabilidad y aplicabilidad de distintos ensayos in situ para determinar las propiedades geotécnicas.

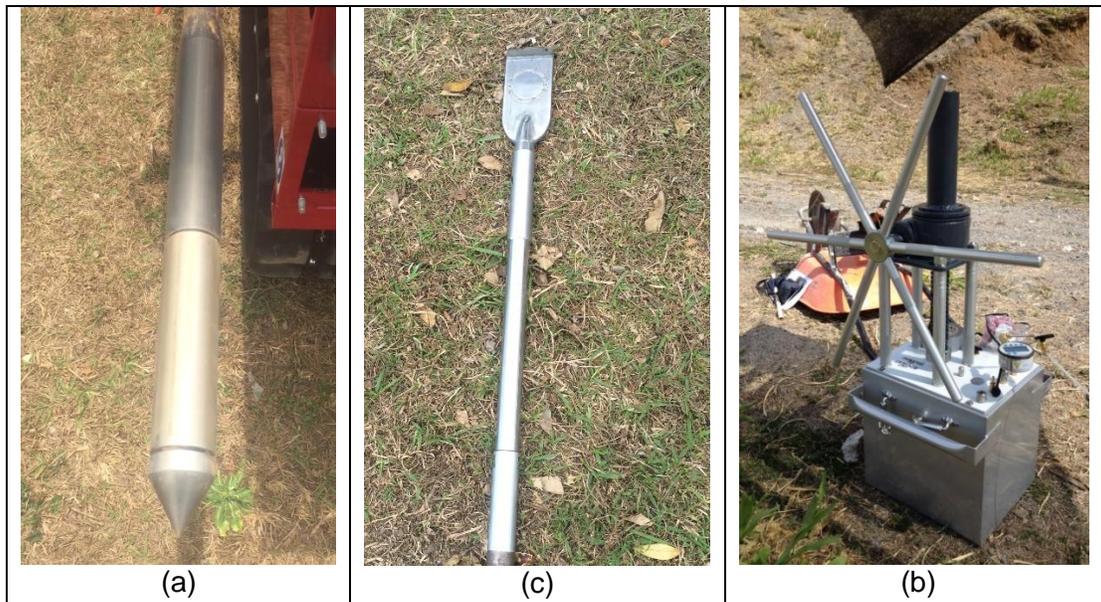
## ENSAYOS GEOTECNICOS IN SITU

Para esta investigación se utilizaron resultados de ensayos in situ y pruebas de laboratorio realizadas como parte de programas de investigación geotécnica asociadas a distintas obras de ingeniería, por lo que la distribución y cantidad de ensayos realizados fue planteada para la investigación geotécnica de una obra y en ningunos de los casos para fines meramente investigativos, lo cual se convierte en una limitante por cuanto la cantidad y distribución de ensayos no se ajusta a las necesidades meramente investigativas, sin embargo, se cuenta con suficientes ensayos como para dar sustento a este análisis.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de esta investigación es comparar y validar los resultados obtenidos por medio de ensayos “avanzados” de exploración geotécnica, como el SDMT, CPT y PMT con respecto a métodos

tradicionalmente utilizados como el ensayo SPT, ensayos de laboratorio y ensayos de refracción sísmica.

Los equipos utilizados se muestran en la Figura 1. En el caso de los ensayos SDMT y CPT se requiere utilizar un equipo de hincado o “geotractor” para poder hacer penetrar a presión los equipos en el terreno, en la Figura 2 se muestra el utilizado por el ICE en este caso.



**Figura 1.** A) Equipo CPT, B) Equipo SDMT, C) Presiómetro Texam



**Figura 2.** Geotractor Pagani para exploración geotécnica.

Cada uno de los distintos ensayos presenta un rango de materiales para los cuales son aplicables, además de que cada uno es más o menos aplicable para la determinación de una u otra propiedad geotécnica. En la Tabla 1, se presenta un resumen de la aplicabilidad y rango de acción de los ensayos in situ utilizados en esta investigación de acuerdo a Lunne, *et al* (2012).

**Tabla 1.** Aplicabilidad y usos de distintos ensayos in situ (Adaptado de Lunne, *et al*, 2012)

Grupo	Ensayo In Situ	Parámetros Geotécnicos												Tipo de material					
		Tipo de suelo	Perfil	$u_0$	OCR	$D_r$	$\phi^\circ$	$S_u$	$G_0-E$	$\sigma-\epsilon$	M-C <sub>c</sub>	k	$c_v$	Roca dura	Roca blanda	Grava	Arena	Limo/arcilla	Orgánico
Penetración /Empuje directo	SPT	B	B	-	C	B	C	C	C	-	-	-	-	-	C	B	A	B	B
	CPT	B	A	-	B	B	B	B	B	C	C	C	-	-	B	B	A	A	A
	CPTu	A	A	A	B	A	B	A	B	C	B	A	A	-	B	B	A	A	A
	SCPTu	A	A	A	A	A	B	A	A	B	B	A	A	-	B	B	A	A	A
	DMT	B	B	B	B	C	B	B	B	C	B	C	B	-	C	C	A	A	A
	SDMT	B	B	B	A	B	B	B	A	B	B	C	B	-	C	C	A	A	A
Presiómetro	Pre-perforado	B	B	-	C	C	C	B	B	C	C	-	C	A	A	B	B	B	B
Otros	Sísmica de superficie	-	C	-	B	C	-	-	A	C	-	-	-	A	A	A	A	A	A

Aplicabilidad: A=Alta, B=Moderada, C=Baja,-=Ninguna

El procedimiento de realización de cada uno de los ensayos queda fuera del alcance de este trabajo, pero se recomienda revisar la bibliografía existente de cada uno para comprender mejor la aplicabilidad y limitaciones de cada uno. Ya que la validez de los resultados obtenidos dependen en gran medida de la correcta aplicación de los procedimientos de ejecución, mantenimiento del equipo y calibración de los mismos.

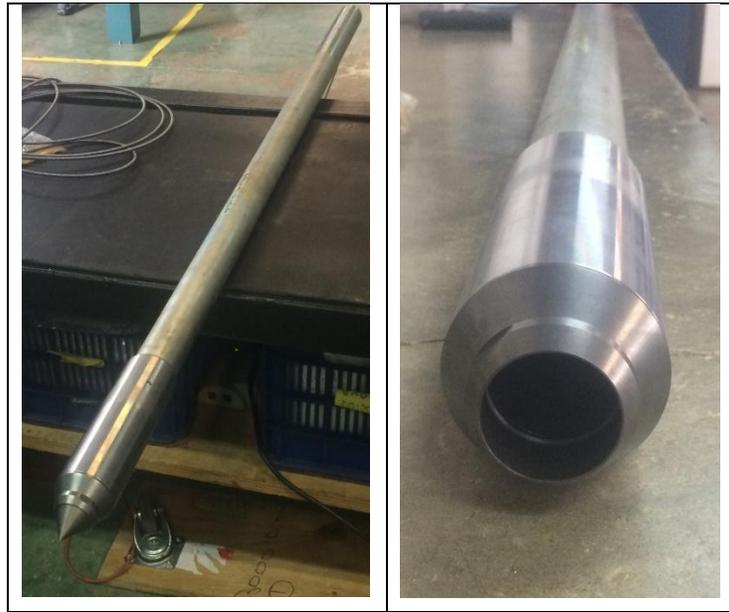
En general, en cada ensayo se miden uno o varios parámetros de forma directa, con los cuales se obtienen lo que se conoce como parámetros “intermedios”, que permiten derivar las propiedades de los materiales, estos resultados finales son conocidos como parámetros interpretados. En la Tabla 2 se muestran, a manera de resumen, las mediciones directas, parámetros intermedios y parámetros interpretados para cada uno de los ensayos que se utilizaron en el presente estudio.

**Tabla 2.** Parámetros de medición de los distintos ensayos in situ

Ensayo in Situ	Mediciones	Parámetros intermedios	Parámetros interpretados	Norma
SPT	$N_{spt}$	$N_{60}$	$S_u$ , $\phi$ , $D_r$ (Correlaciones)	ASTM D-1586
SDMT	$P_0$ , $P_1$ , $P_2$ y $V_s$	$I_D$ , $K_D$ y $E_D$	$K_0$ , OCR, $C_u$ , $\phi$ , $c_h$ , $k_h$ , $\gamma$ , M, $u_0$ , $G_0$	ASTM D-6635
CPTu	$q_c$ , $f_s$ y $u$	$R_f$ , $Q_t$ y $F_r$	SBT, $S_u$ , $\phi$ , OCR, $K_0$ , $\gamma$ , St, M, E, $c_h$	ASTM D-3441
PMT	$\Delta V$ y $\Delta P$	$E_{Presiómetro}$ y $P_L$	E, $S_u$ , $q_{ult}$	ASTM D-4719
Refracción sísmica	$V_p$ y $V_s$	N/A	$G_0$ , E	N/A

Los ensayos más avanzados de exploración geotécnica, como el CPTu y SDMT, no extraen muestras, sino que determinan el tipo de material de acuerdo a su comportamiento mecánico y no de acuerdo a su granulometría como es lo usual.

Debido a esto, se han desarrollado muestreadores que son hincados a presión en el terreno y que permiten extraer muestras “inalteradas” a la profundidad deseada en caso de ser requerido. Estos muestreadores son muy versátiles y permiten extraer muestras de forma rápida, por lo que son un buen complemento para los ensayos in situ avanzados (Figura 3).



**Figura 3.** Muestreador tipo MOSTAP-35.

## **DESCRIPCIÓN DE SITIOS DE ENSAYOS E INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA REALIZADA**

Con el fin de poder contar con información que permita realizar comparaciones entre las distintas propiedades, se utilizaron resultados de ensayos in situ y laboratorio de 3 sitios. A continuación se presenta una pequeña descripción de la litología de los sitios, así como una descripción de la investigación geotécnica realizada en cada uno de ellos.

### **Sitio de Prueba #1**

Corresponde a un sitio ubicado en el área metropolitana que presenta materiales de origen volcánico, en sí, son avalanchas de lodo y cenizas que bajaron por los ríos producto de erupciones y/o colapsos de los edificios volcánicos y a su vez se formaban represamientos que luego se rompieron formando nuevamente avalanchas. En este caso se definen dos unidades geotécnicas, hasta la profundidad estudiada, la primera corresponde a suelos limosos de alta plasticidad producto de cenizas volcánicas (tobas). La segunda que subyace la anterior, corresponde a un lahar que presenta una matriz limosa que contiene clastos volcánicos de tamaños desde centimétrico hasta métricos en algunos sectores.

Investigación geotécnica realizada:

- 2 Ensayos SDMT (17.4 m y 9.5 m)
- 2 Ensayos CPT (12.0 m y 16.0 m)
- 4 Perforaciones a rotación (40 m en promedio) en las cuales se realizaron ensayos PMT a distintas profundidades utilizando para esto el Presiómetro tipo TEXAM, en total 17 ensayos puntuales.
- 1 Ensayo SPT (9.45 m)
- 2 Perfiles de refracción sísmica (123.0 m y 69.0 m de longitud)
- 3 Ensayos Triaxiales CU (Muestras obtenidas de las perforaciones a rotación)
- 3 Ensayos de Consolidación Unidimensional
- 10 Ensayos de resistencia a la compresión inconfiada
- 19 Ensayos de clasificación de suelos (SUCS)

### **Sitio de Prueba #2**

Este sitio se encuentra ubicado en la zona del Caribe costarricense, específicamente en la zona de transición entre la cordillera y la llanura. Litológicamente corresponde a un ambiente de origen sedimentario, compuesto por un primer estrato de suelos transportados, de origen coluvial y aluvial, los cuales presentan una intercalación de materiales limosos de alta compresibilidad con materiales areno-limosos con presencia de algunos lentes de grava, subyacidos por un basamento de areniscas que se extiende hasta varias centenas de metros a profundidad.

En este caso los ensayos se distribuyeron en 3 zonas donde fue posible realizar ensayos SPT y DMT muy cercanos, por lo que los resultados se dividen en 3 sub-sitios donde el perfil del terreno varía de una a la otra.

Investigación geotécnica realizada:

- 5 Ensayos DMT (3.8 m a 9.25 m)
- 4 Ensayos SPT (5.4 m y 8.35 m)
- 2 Ensayos de resistencia a la compresión inconfiada
- 9 Ensayos de clasificación de suelos (SUCS)

### **Sitio de Prueba #3**

Se ubica en la zona costera y corresponde a una zona baja y de topografía regular, la cual presenta suelos transportados que fueron depositados por los distintos cuerpos de agua que fluyen a través de la zona, así como por depósitos de material muy fino de origen lacustre. Este sitio cuenta con suelos arcillosos muy blandos y comprensibles (depósitos lacustres) subyacidos por depósitos de arenas finas con algunas zonas poco densas con niveles freáticos someros.

En este caso los ensayos se distribuyeron en 6 zonas donde fue posible realizar ensayos SPT y DMT, por lo que los resultados se dividen en 6 Sub-sitios donde el perfil del terreno varía de una a la otra.

Investigación geotécnica realizada:

- 6 Ensayos DMT (6.2 m a 10.0 m)
- 6 Ensayos SPT (6.3 m a 9.0 m)
- 3 Ensayos de resistencia a la compresión inconfiada
- 17 Ensayos de clasificación de suelos (SUCS)

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los ensayos geotécnicos in situ “avanzados” que se presentan en este trabajo cuentan con una robusta base de datos de resultados en gran variedad de suelos en distintos países del mundo, sin embargo, en nuestro país la experiencia con ellos es limitada en comparación con otros ensayos de campo como el SPT.

Con el fin de realizar una validación de los resultados obtenidos a través de ensayos de exploración geotécnica avanzada, como el SDMT, CPT y PMT, se procedió a comparar los resultados obtenidos con otros ensayos de campo y laboratorio de mayor tradición en el mercado costarricense.

El análisis realizado comprende resultados de propiedades de los suelos como:

- Resistencia al corte no drenada,  $S_u$
- Razón de sobreconsolidación, OCR
- Módulo confinado,  $M=1/m_v$
- Módulo de Young,  $E$
- Velocidad de onda cortante,  $V_s$
- Módulo cortante a baja deformación,  $G_o$
- Tipo de material
- Correlación con el  $N_{spt}$
- Sensibilidad de arcillas,  $S_t$
- Coeficiente de presión de tierras en reposo,  $K_0$
- Permeabilidad,  $k$

Para el cálculo de los parámetros geotécnicos se utilizan las metodologías recomendadas en la bibliografía existente, por lo que no se presenta a detalle en este trabajo el procesamiento de la información, sino más bien se centra en la comparación de los resultados obtenidos.

## SITIO DE PRUEBA #1

Este es el sitio más representativo de los 3 analizados en esta investigación, ya que en él se cuenta con una gran variedad de información obtenida de distintos ensayos de campo y de laboratorio. A continuación se presentan los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos in situ realizados.

### Tipo de material

La determinación del tipo de material en los ensayos modernos como el SDMT y el CPT, como se mencionó anteriormente, se realiza por medio del comportamiento mecánico del suelo y no por un análisis granulométrico como es usual en el país. Esto representa un cambio significativo en la investigación geotécnica, ya que estos ensayos no extraen muestras, ni permiten observar el material directamente.

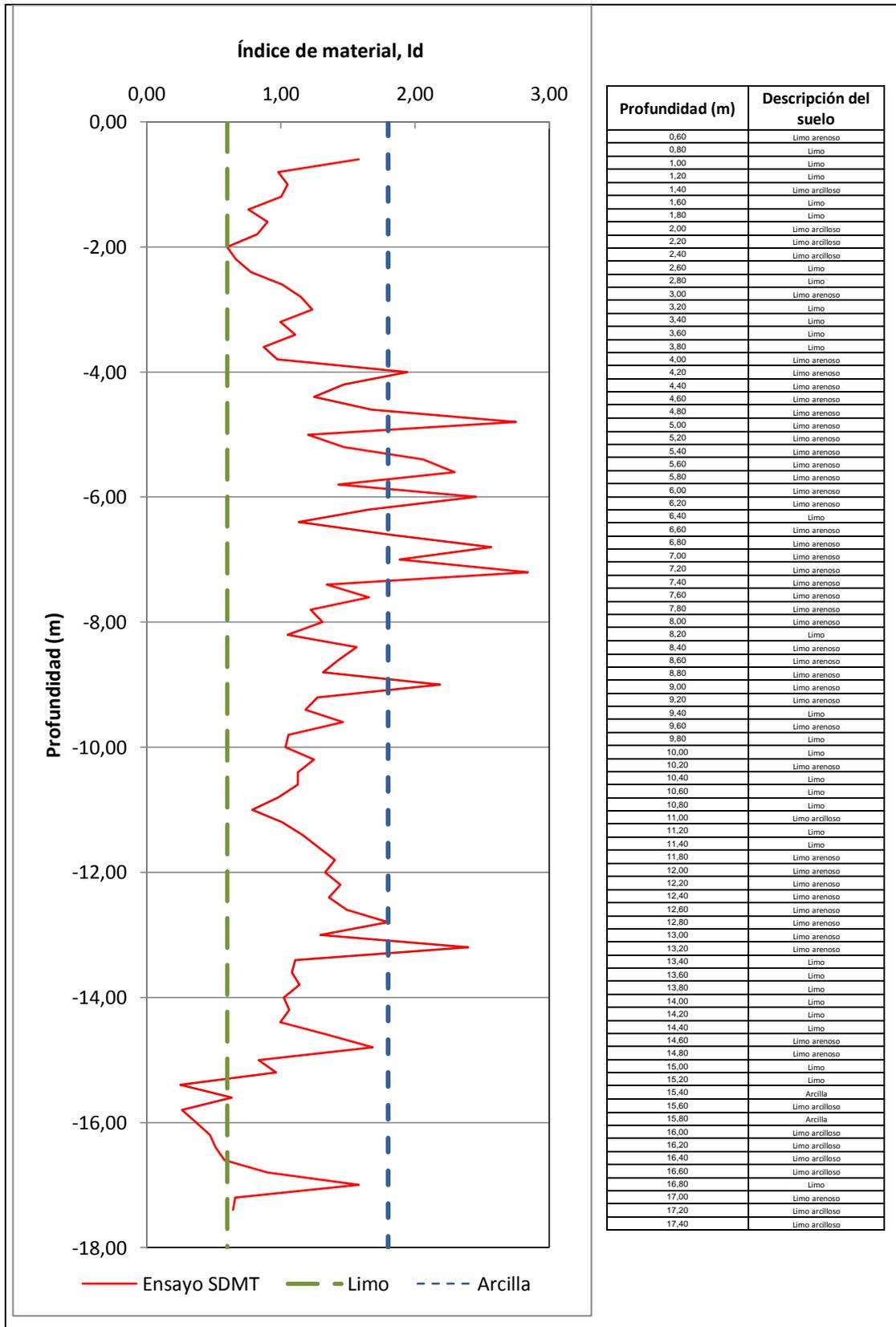
El hecho de no obtener muestras directamente, no supone una limitación muy grande, si se tiene en cuenta que el principal objetivo de un estudio geotécnico es obtener las propiedades de resistencia y deformabilidad del material, por lo que de existir pequeñas variaciones entre la clasificación del material obtenida a través de ensayos in situ y resultados de clasificaciones realizadas en laboratorio a través de muestras del suelo, estas no van a derivar en problemas para las estructuras o determinación imprecisa de las propiedades del suelo. No obstante es imperativo generar una experiencia en el uso del equipo con el fin de poder identificar resultados no apropiados.

Para este análisis se procedió a realizar una comparación de los resultados obtenidos por medio de los ensayos SDMT y CPT con respecto a resultados obtenidos de muestras de material extraídas del terreno.

En primera instancia se muestran los resultados obtenidos del ensayo SDMT, el cual identifica el tipo de material por medio de un *Índice de Material* ( $I_D$ ). Para la clasificación del material se definen los siguientes “límites”:

- $I_D < 0.6$ : Arcilla
- $0.6 < I_D < 1.8$ : Limos
- $I_D > 1.8$ : Arenas

Los resultados obtenidos por medio de ensayo SDMT, se muestran en la Figura 4.



**Figura 4.** Tipo de material de acuerdo al ensayo SDMT

Por otro lado se cuenta con los resultados obtenidos de los ensayos CPT realizados, a través de los cuales es posible identificar el material por medio de un parámetro llamado *Tipo de Comportamiento del Suelo* (SBT), para el cual existen gráficos No-normalizados y Normalizados por el esfuerzo efectivo vertical ( $\sigma'_v$ ). El uso de uno u otro depende de la profundidad del sondeo, siendo más confiables los resultados obtenidos por medio del gráfico normalizado en sondeos superficiales o muy profundos, mientras que para sondeos de entre 20 m y 60 m, en general el gráfico no-normalizado arroja mejores resultados (Robertson & Cabal, 2014).

En este caso se muestran los resultados de los gráficos no-normalizados y normalizados (Figuras 5 y 6) con el fin de poder realizar las comparaciones respectivas entre ambos resultados, así como comparaciones con los otros ensayos realizados. Por otro lado en la Figura 7 se muestra la determinación de los estratos de material detectados por medio del ensayo. Además se muestra un gráfico del parámetro llamado Índice de Tipo de Comportamiento de Material ( $I_c$ ), que se utiliza para simplificar la aplicación del SBTn del ensayo CPT (Figura 8).

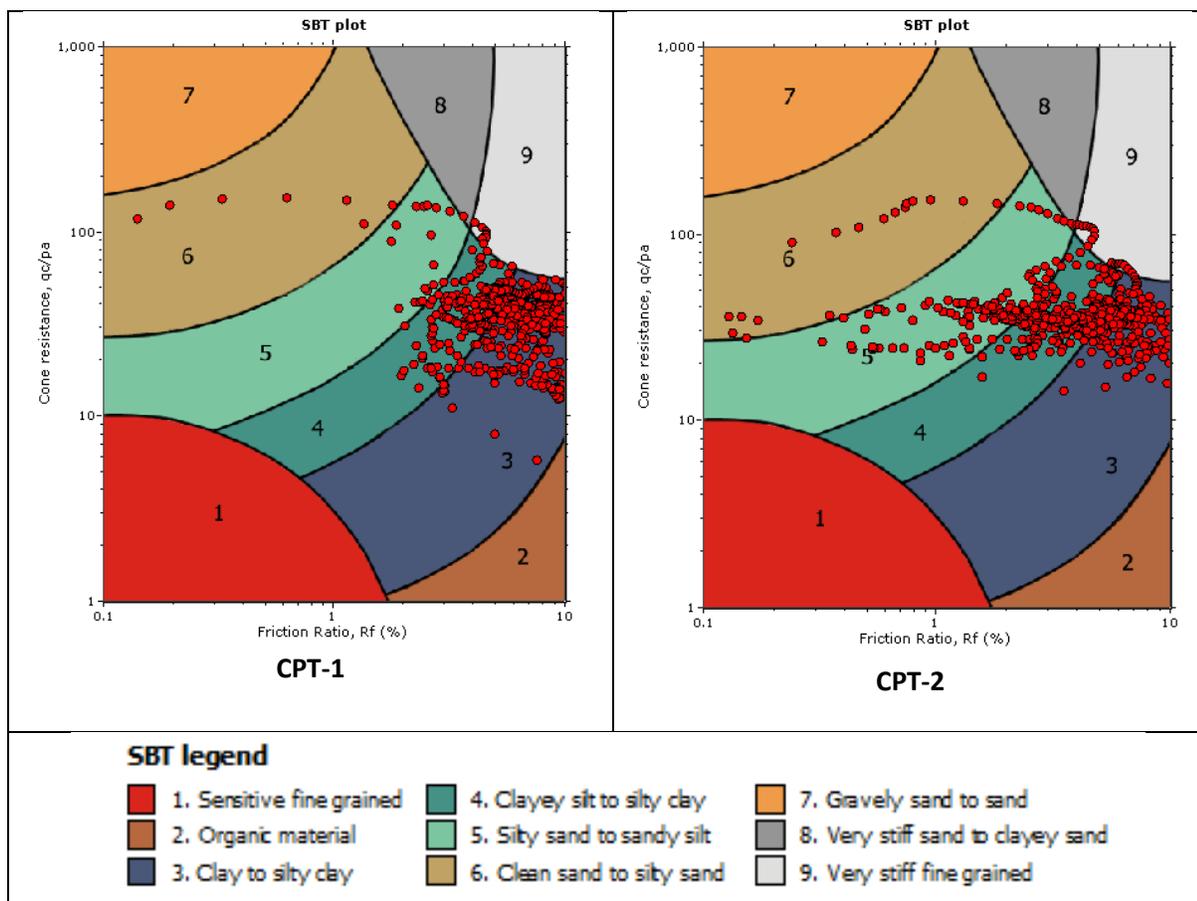
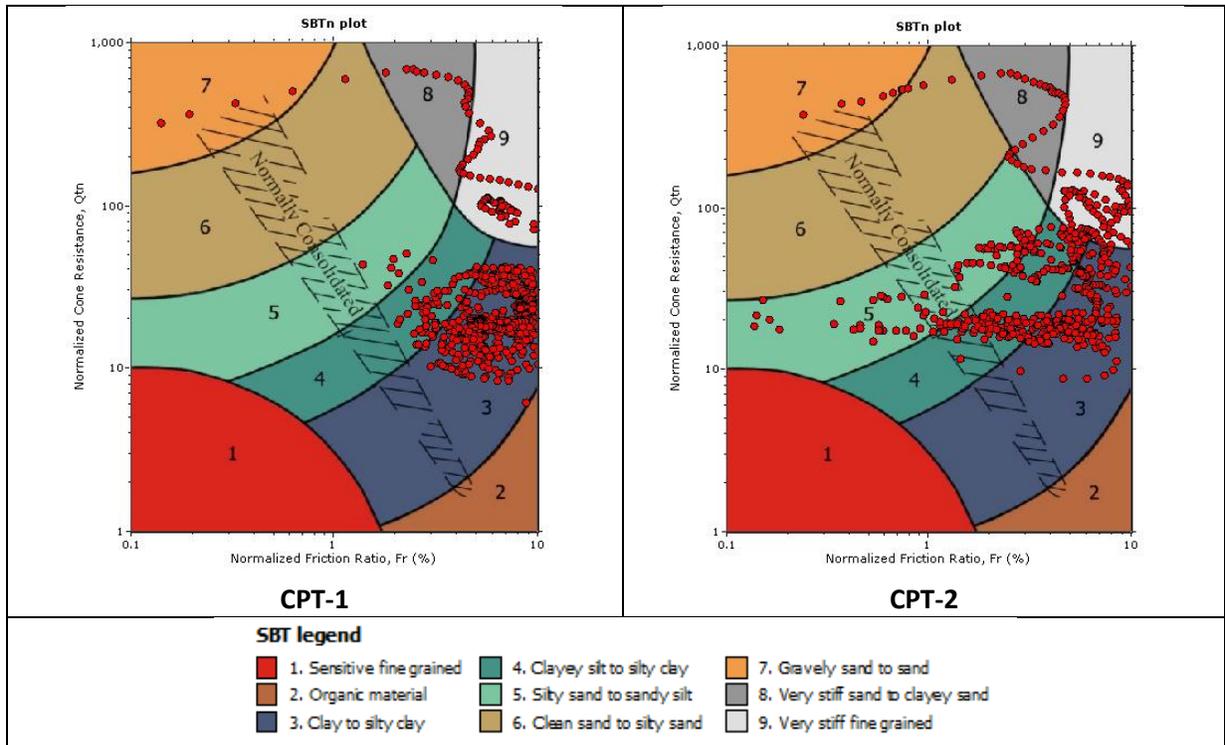
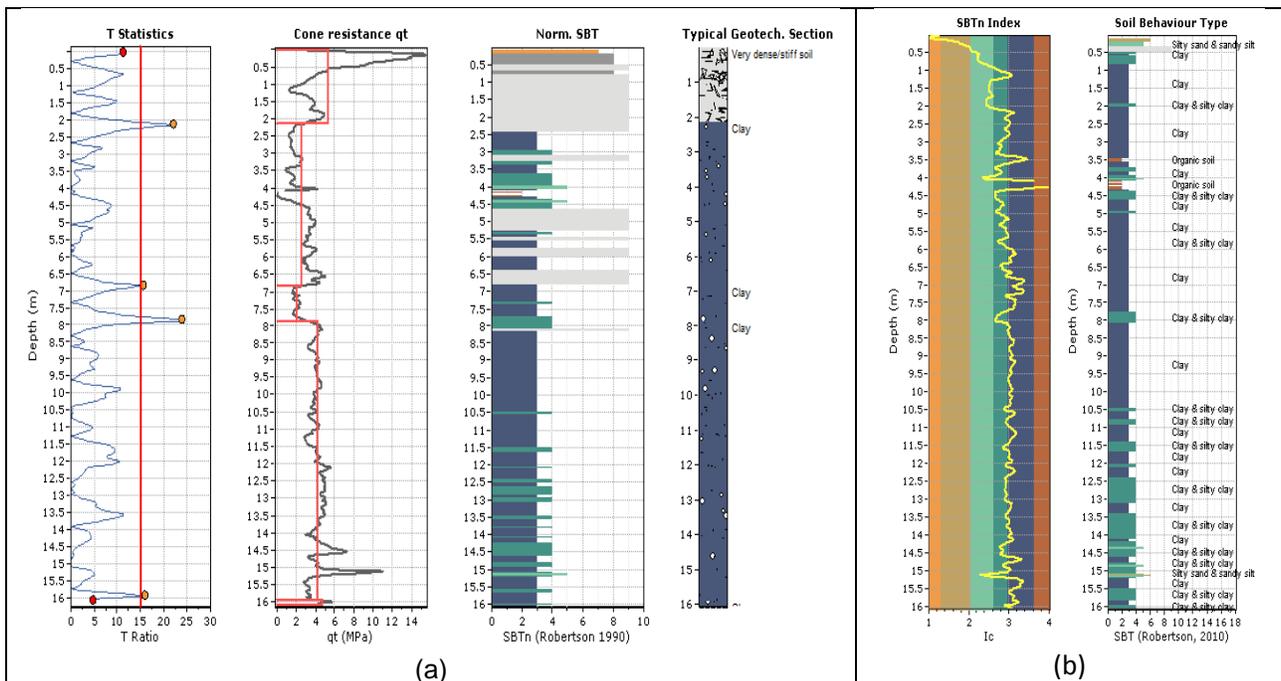


Figura 5. Tipo de Comportamiento del Suelo (SBT) de acuerdo al ensayo CPT, gráfico no-normalizado



**Figura 6.** Tipo de Comportamiento del Suelo (SBTn) de acuerdo al ensayo CPT, grafico normalizado



**Figura 7.** a) Determinación de los estratos de material en el perfil analizado de acuerdo con el Tipo de Comportamiento del Suelo (SBT) de acuerdo al ensayo CPT-1. b) Identificación del tipo de material de acuerdo al Índice de Tipo de Comportamiento del Material,  $I_c$ . Ensayo CPT-1.

Se puede observar que al comparar los resultados obtenidos de SBT y SBTn con los obtenidos por el ensayo DMT, en general se podría concluir que los resultados del gráfico normalizado presentan una mayor concordancia, lo cual se ajusta a lo que se indica en la bibliografía existente para ensayos de menos de 20 m de profundidad.

El software de análisis de datos del CPT permite agrupar estratos de material de acuerdo a zonas de comportamiento similar, eliminando valores que podrían ser inexactos o estar alterados por alguna singularidad en el terreno, lo cual facilita la presentación de resultados.

Por otro lado se cuenta con resultados de muestras extraídas de perforaciones a rotación realizadas en el sitio, por lo que es posible comparar los resultados obtenidos de los ensayos SDMT y CPT con respecto a los ensayos de clasificación realizados en el laboratorio. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Comparación de resultados de identificación del tipo de material

Prof. (m)	Ensayo de Laboratorio		Ensayo <i>in situ</i>		
	Clasificación SUCS		SDMT	CPTu-1	CPTu-2
6.0	ML	Limo con arena	Limo arenoso	Limo arcilloso	Limo arcilloso
8.0	ML	Limo	Limo arenoso	Limo arcilloso	Limo arcilloso
14.0	ML	Limo con arena	Limo	-	Limo arcilloso

Como se puede observar, los resultados obtenidos por medio de los ensayos SDMT y CPT, difieren ligeramente entre sí en la identificación del tipo de material, sin embargo, a través de ambos ensayos se logra tener una aproximación muy buena del tipo de material.

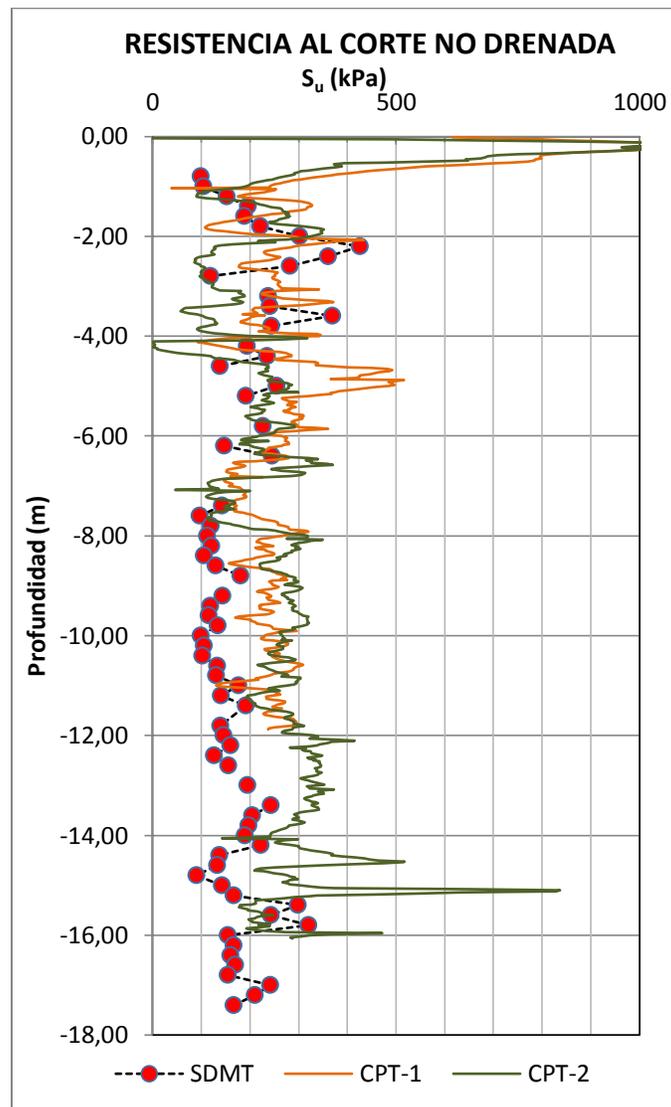
En este caso si se comparan los resultados obtenidos de ensayos *in situ* con respecto a los obtenidos a través de muestras extraídas de perforaciones, se nota que los resultados obtenidos coinciden, a pesar de no ser exactamente iguales, cuestión que en mecánica de suelos es prácticamente imposible.

### Resistencia al corte no drenada, $S_u$

Para la determinación de este parámetro se cuenta con resultados de ensayos *in situ* como: SDMT, CPT, PMT y SPT, así como resultados de ensayos de laboratorio realizados en muestras inalteradas que permiten determinar el  $S_u$ , como lo son ensayos triaxiales CU y ensayos de compresión inconfiada.

En la Figura 8 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos SDMT y CPT, los cuales en el primer caso permiten tener datos cada 20 cm a lo largo del perfil del terreno, mientras que para el segundo ensayo se tienen mediciones cada 2 cm. El contar con esta cantidad de datos, permite conocer las propiedades del terreno de forma muy certera, logrando identificar lentes de material de baja resistencia que sería muy difícil de identificar por medio de otros ensayos *in situ* como el SPT.

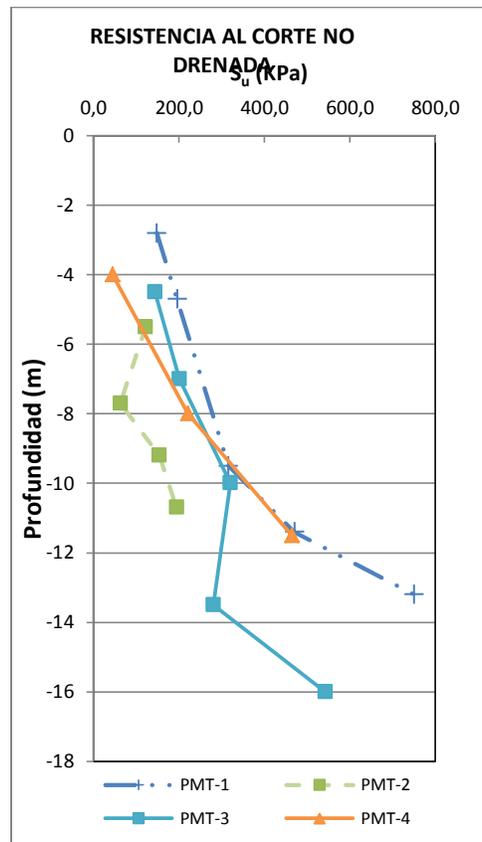
Se puede observar que en general los resultados para determinar el  $S_u$ , obtenidos por los ensayos SDMT y CPT presentan una muy buena correlación, ya que se observa una misma tendencia y se encuentran en un mismo rango de magnitud.



**Figura 8.** Resistencia al Corte No Drenada,  $S_u$  obtenidas por ensayos SDMT y CPTu

Por otro lado se cuenta con resultados de ensayos PMT, realizados con un presiómetro tipo TEXAM en perforaciones a rotación realizadas en el sitio. Las pruebas realizadas con este equipo son puntuales, por lo que la cantidad de datos obtenida de una misma perforación es limitada o tomaría un largo tiempo contar con muchas pruebas.

En este caso las pruebas fueron realizadas en 4 perforaciones, en las cuales se realizaron ensayos PMT en 17 puntos. Para el cálculo de  $S_u$  se utilizó la expresión propuesta por Baguelin y Briaud (Briaud, 1992), y los resultados se muestran en la Figura 9.



**Figura 9.** Resistencia al Corte No Drenada,  $S_u$  obtenidas por ensayos PMT

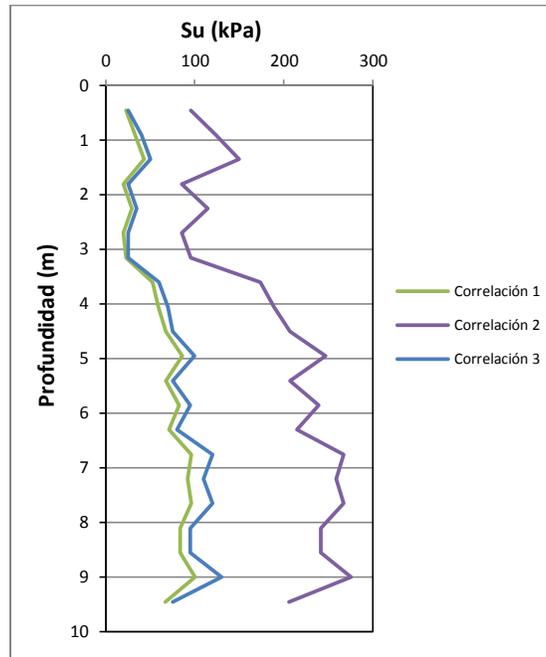
Los valores de  $S_u$  obtenidos por medio del ensayo PMT, presentan gran dispersión y su magnitud es mayor a la obtenida por los ensayos SDMT, CPT y ensayos de laboratorio como pruebas triaxiales. Este es un comportamiento normal en el ensayo, tal y como lo indica Bowles (1997), quien dice que generalmente los resultados obtenidos por el PMT son de 1.3 a 1.7 veces mayores a los obtenidos por otros ensayos de campo y laboratorio.

Se hace hincapié en que el ensayo PMT, no fue diseñado para obtener el valor de  $S_u$ , sino que este se obtiene a través de correlaciones, en este caso la de Baguelin y Briaud (Briaud, 1992) es la que arroja valores más realistas.

Por otro lado se cuenta con el resultado de un ensayo SPT, del cual se obtuvo el valor de  $S_u$  por medio de tres correlaciones con el  $N_{SPT}$ . Las correlaciones utilizadas en este caso fueron las siguientes:

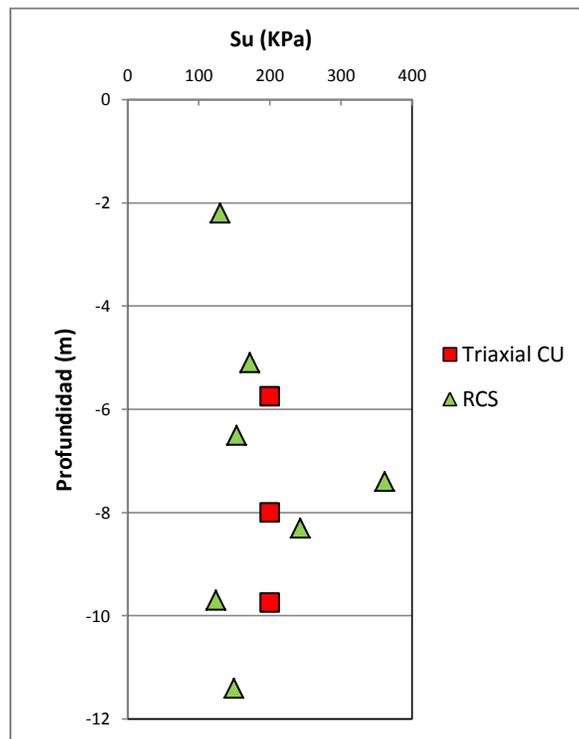
- Correlación #1:  $S_u = 4.4 \cdot N_{60}$  (Stroud, 1974)
- Correlación #2:  $S_u = 29 \cdot N_{60}^{0.72}$  (Hara et al, 1971)
- Correlación #3: Tabla 2.3, Libro Ingeniería de Cimentaciones (Das, 2008)

Los resultados obtenidos de  $S_u$  por medio de correlaciones con el  $N_{SPT}$  se muestran en la Figura 10.



**Figura 10.** Resistencia al Corte No Drenada,  $S_u$  obtenidas por el ensayo SPT

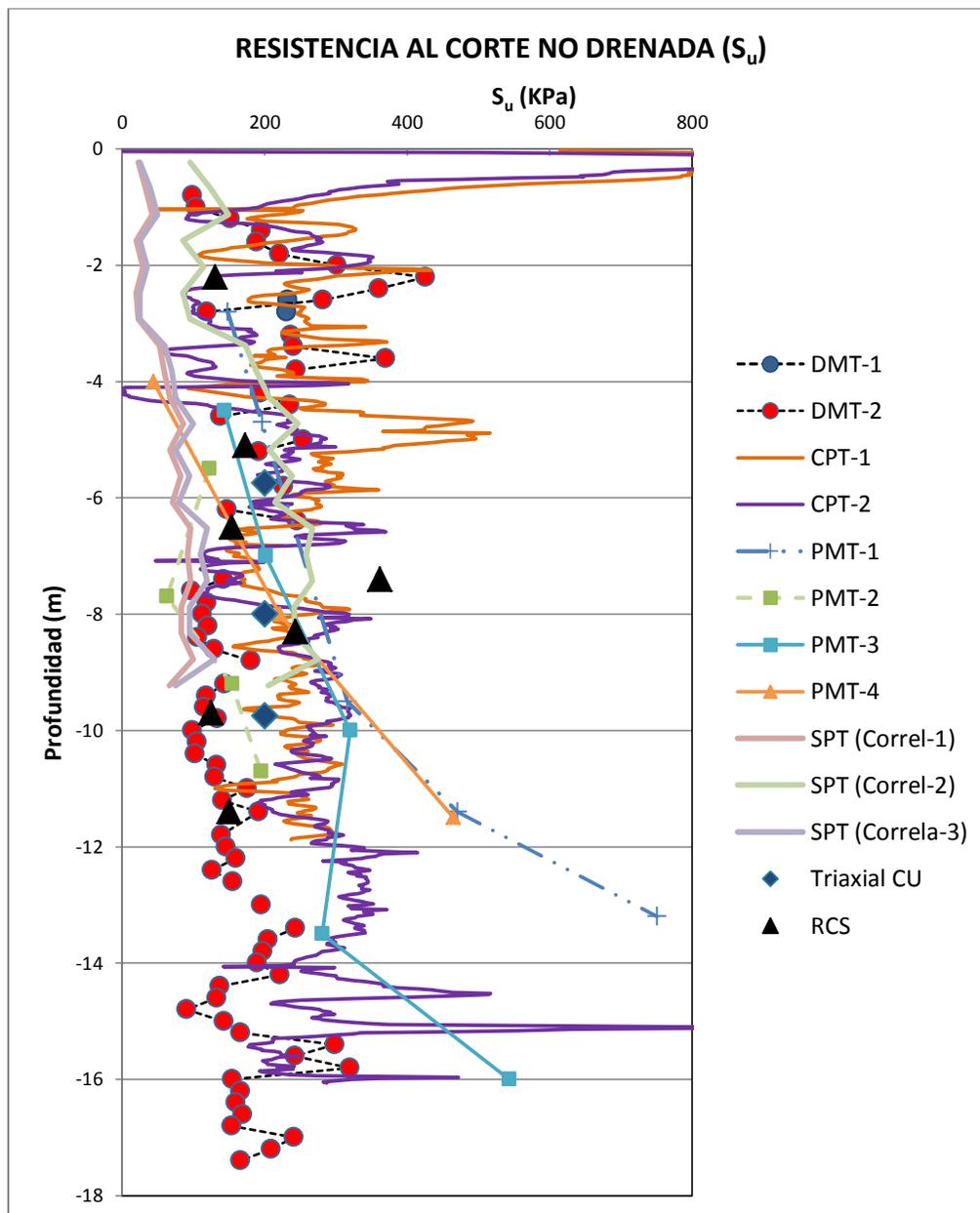
Además se cuenta con resultados de  $S_u$  obtenidos por medio de ensayos de laboratorio realizados a muestras extraídas por medio del ensayo SPT y las perforaciones a rotación. En este caso se cuenta con 10 ensayos de resistencia a la compresión simple y 3 ensayos de compresión triaxial CU, los resultados se muestran en la siguiente figura.



**Figura 11.** Resistencia al Corte No Drenada,  $S_u$  obtenidas por el ensayos de laboratorio

Se puede observar que los resultados obtenidos para  $S_u$  de ensayos de laboratorio tiene gran concordancia con los resultados obtenidos por ensayos SDMT y CPT, mientras que difiere grandemente a los resultados obtenidos a través del ensayo PMT. En el caso del ensayo SPT, los resultados obtenidos por medio de correlaciones presentan gran variabilidad, excepto para la correlación #3, no obstante se hace la salvedad que este ensayo no fue realizado en el punto exacto donde se realizaron los ensayos SDMT y CPT, sino que estaba alejado algunos metros.

En la Figura 12 se muestra un gráfico resumen con los resultados de todos los ensayos realizados.



**Figura 12.** Resumen de resultados obtenidos de Resistencia al Corte No Drenada,  $S_u$

## Razón de Preconsolidación, OCR

La razón de preconsolidación (OCR), es un parámetro que indica la relación entre el esfuerzo vertical efectivo actual de un suelo con respecto al esfuerzo máximo efectivo (esfuerzo de preconsolidación) que ha experimentado el suelo, por lo que se puede decir que es un índice de la historia de esfuerzos de un suelo.

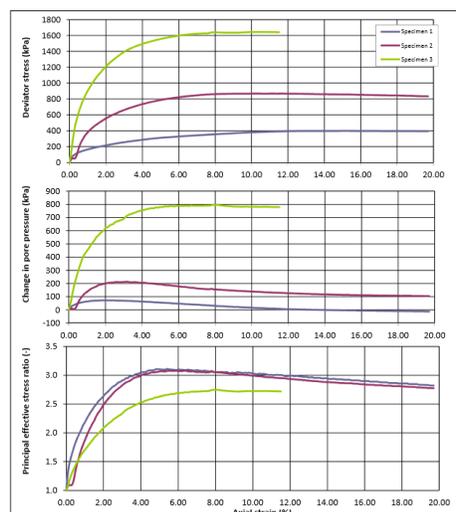
Este parámetro es de gran importancia para determinar los posibles asentamientos que se presentarán por la acción de la imposición de una carga en suelos cohesivos o de comportamiento no drenado.

Usualmente la determinación de este parámetro se realiza por medio de ensayos de consolidación unidimensional en el laboratorio, para los cuales es necesario extraer una muestra “inalterada” de material. En muchas ocasiones la extracción de estas muestras es complicada, en especial conforme aumenta la profundidad, además de que el ensayo requiere de un largo tiempo para ser ejecutado, puede llegar a tardar varios días (esto se ha reducido con la introducción de equipos automatizados), por lo que la cantidad de muestras extraídas para un estudio suele ser pequeña y limitada solamente a estudios para obras de gran importancia.

En la actualidad este parámetro puede ser obtenido a través de ensayos in situ como el SDMT y CPT con registros continuos o casi continuos a lo largo del perfil del terreno.

En este caso fue posible extraer 3 muestras de material a diferentes profundidades con el fin de realizar ensayos de consolidación unidimensional en el laboratorio. El resultado de estas pruebas indica que a la profundidad a la cual se extrajeron las muestras se tienen materiales normalmente consolidados, ya que el OCR obtenido fue cercano a 1.

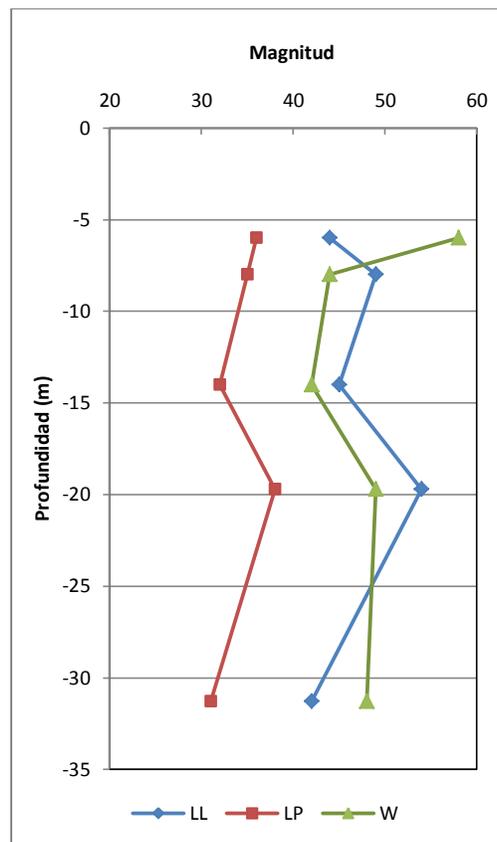
También se cuenta con resultado de 3 ensayos triaxiales CU, en los cuales es posible graficar el esfuerzo desviador, la presión de poro y el esfuerzo efectivo principal en función de la deformación axial. Los resultados se muestran en la Figura 13.



**Figura 13.** Resultados de ensayos triaxiales CU

Se observa que la tendencia de estas gráficas, en especial la de la presión de poro parece reflejar el comportamiento de un suelo con un ligero grado de preconsolidación, ya que las curvas presentan una pendiente fuerte al inicio, hasta llegar a un pico máximo para luego empezar a decrecer. Lo que podría interpretarse como que el suelo presenta un pequeño grado de preconsolidación, o sea que el OCR es ligeramente superior a 1.

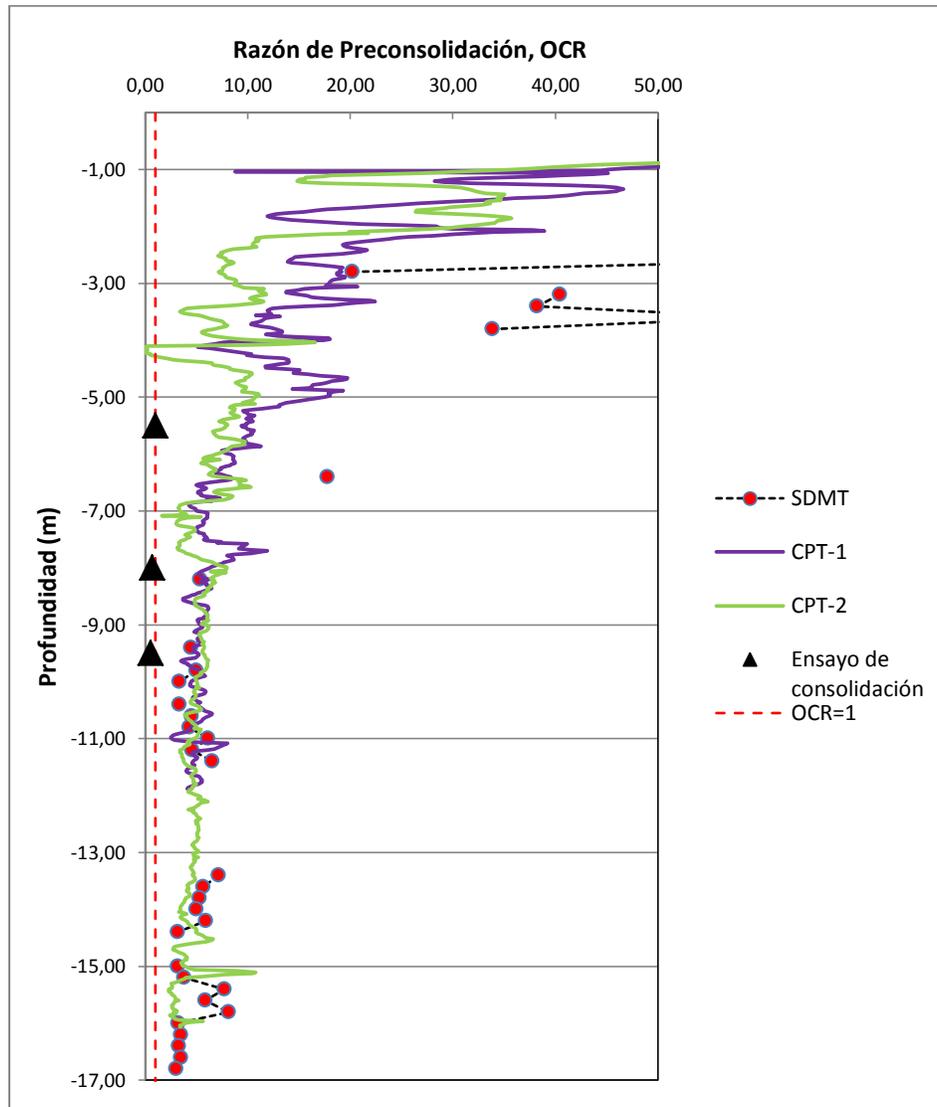
También es posible determinar si un suelo es normalmente consolidado o preconsolidado graficando el Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) y el Contenido de Humedad Natural (%w) en función de la profundidad. Cuando la el contenido de humedad es tiende a acercarse o ser igual al LL se trata de un suelo normalmente consolidado, mientras que si el contenido de humedad tiende al LP se trata de un suelo preconsolidado. Se hace la salvedad que a través de este análisis no es posible determinar el OCR, sino solo determinar si el suelo es normalmente consolidado o preconsolidado. En la Figura 14 se muestran los valores obtenidos para este caso.



**Figura 14.** Límites de Atterberg y contenido de humedad natural a lo largo del perfil de suelo.

La tendencia entre la relación de los límites de Atterberg y el contenido de humedad, parece indicar en este caso que se trata de un perfil de suelo preconsolidado, ya que el contenido de humedad tiende hacia el valor del límite plástico.

Por otro lado se obtuvo el valor de OCR a lo largo del perfil de terreno estudiado por medio de un ensayo SDMT y dos ensayos CPT, los resultados se muestran en la Figura 15.



**Figura 15.** Resumen de resultados obtenidos de Razón de Preconsolidación, OCR a través de ensayos in situ y laboratorio

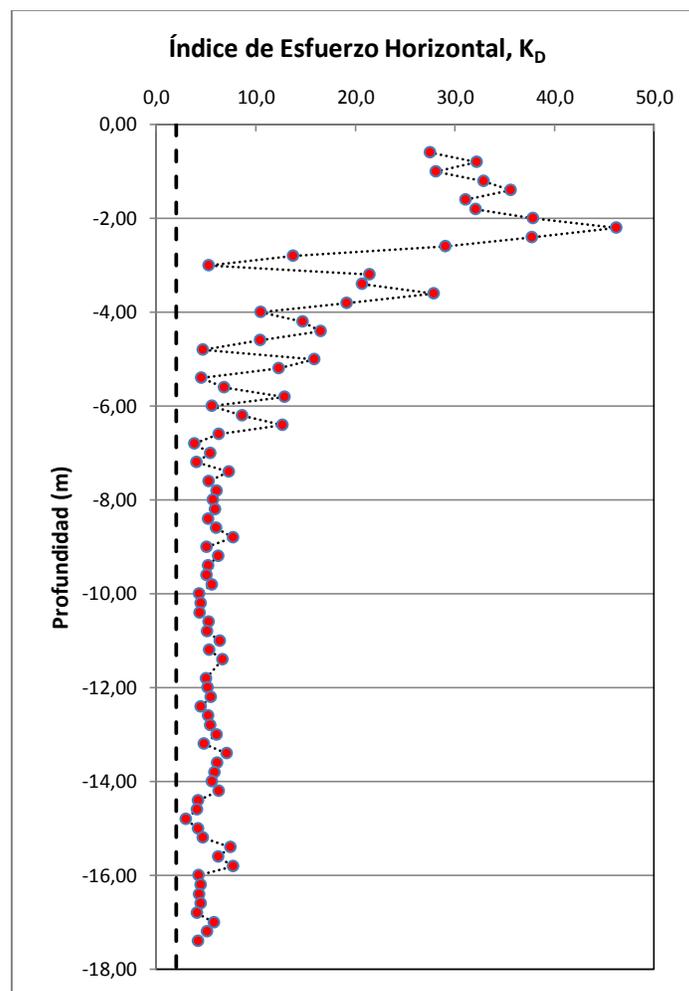
En este caso se cuenta con un perfil de terreno donde existe un relleno de material medianamente compactado en los primeros 4 m, el resto del perfil corresponde a un suelo normalmente consolidado, cual se ve claramente reflejado en los resultados obtenidos por los ensayos SDMT y CPT.

Se puede observar que la tendencia del OCR obtenida de ensayos in situ presenta valores de OCR muy altos desde la superficie hasta los 4 m de profundidad, donde existe una zona de relleno compactado. Mientras que a partir de los 4 m presenta una tendencia muy homogénea, donde en general se tienen valores de OCR de entre 5 a

10. Lo anterior indica que esta zona presenta un pequeño grado de preconsolidación del suelo a partir de 4 m.

Existe una gran concordancia entre el OCR y el Índice de Esfuerzo Horizontal,  $k_D$  obtenido en el ensayo SDMT. Distintos autores como Marchetti (1980), Jamiolkowski (1988) y Powell (1988), han demostrado que suelos cohesivos con valores de  $k_D$  que tienden a 2 corresponden a suelos normalmente consolidados, mientras que valores superiores a 2 corresponde a suelos preconsolidados. Además existen tendencias claramente definidas de este parámetro, siendo en general una tendencia homogénea con la profundidad típica de suelos normalmente consolidados, mientras que para suelos preconsolidados la tendencia es que el valor de  $k_D$  decrezca ligeramente con la profundidad.

En la Figura 16, se muestran los resultados obtenidos de  $k_D$  del ensayo SDMT, en los cuales es claro que a partir de 4 m la tendencia es típica de un suelo ligeramente preconsolidado.



**Figura 16.** Índice de Esfuerzo Horizontal  $k_D$  obtenido del ensayo SDMT

En este caso, de acuerdo a los ensayos in situ, los ensayos triaxiales y los límites de Atterberg, se podría concluir que el perfil de terreno natural, sin tomar en cuenta los primeros 4 m de relleno, corresponden a suelos ligeramente preconsolidados, con OCR de entre 5 a 10.

Los ensayos de consolidación unidimensional, indican que el suelo es normalmente consolidado ( $OCR=1$ ), sin embargo, esto podría deberse al proceso de extracción y manipulación de las muestras, las cuales fueron extraídas de las perforaciones a rotación. Por otro lado, el grado de preconsolidación que indican los otros ensayos es bastante bajo, por lo que el error es pequeño al indicar que el suelo es “prácticamente” normalmente consolidado en este caso.

### Módulo Compuesto (M) y Módulo de Young (E)

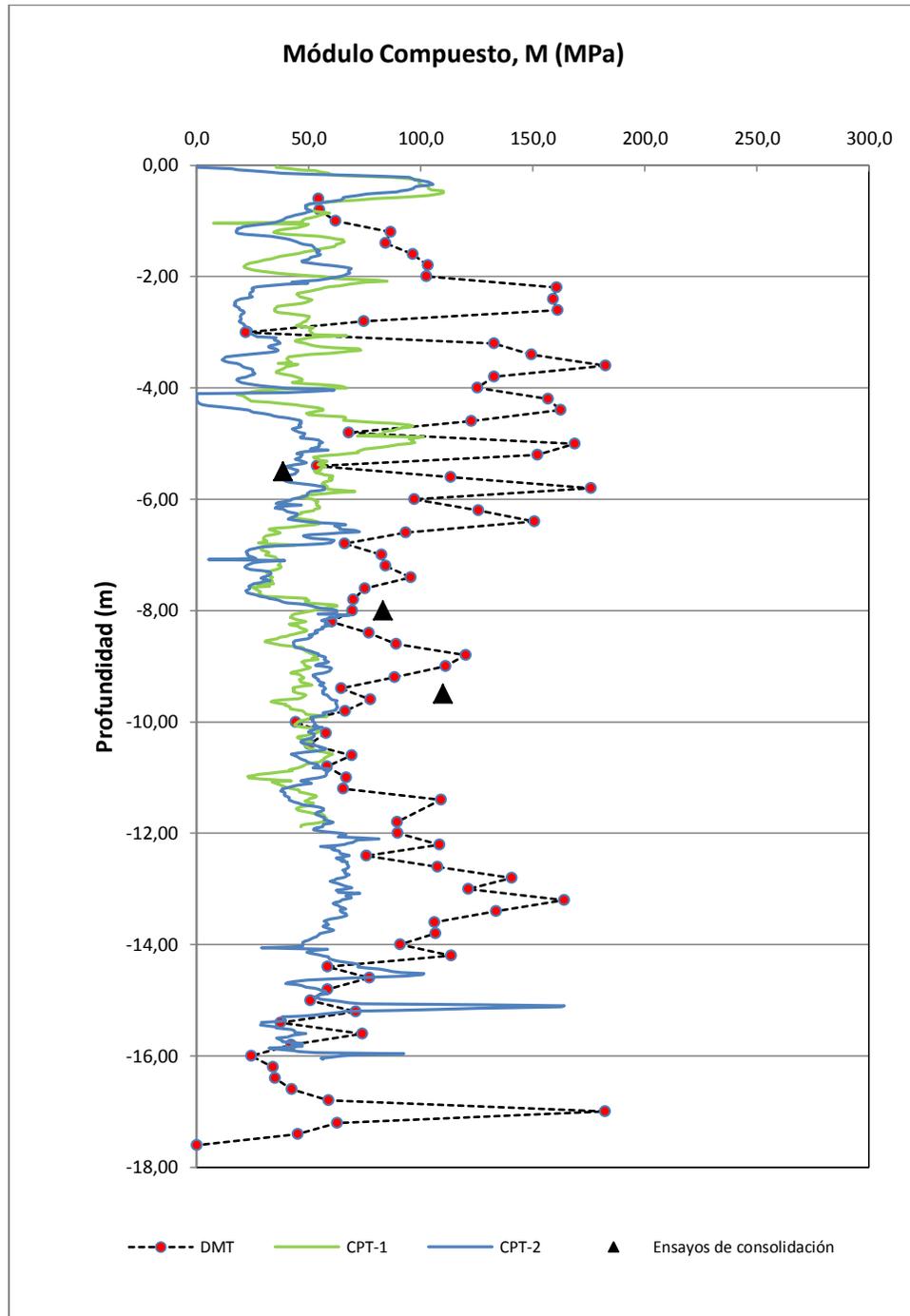
Conocer las propiedades de deformabilidad de los materiales es de suma importancia para estimar los asentamientos que se podrían presentar por la acción de una carga. La obtención de parámetros de deformabilidad del suelo, generalmente se ha limitado a obras de gran importancia y contando con pocos datos que deben ser “extrapolados” a todo un estrato.

Los ensayos SDMT, CPT y PMT permiten determinar el módulo de deformación del suelo, obteniéndose de los 2 primeros un gran número de datos que permiten por ejemplo alimentar modelos de elemento finito.

El módulo compuesto (M) es el inverso del Coeficiente de Cambio Volumétrico ( $m_v$ ) que puede ser obtenido de ensayos de consolidación unidimensional, o sea la relación entre estos es la siguiente:  $M=1/m_v$ . Por lo tanto conocer el modulo compuesto permite realizar un cálculo de asentamientos en el terreno, ya que es posible obtener el índice de compresión ( $C_c$ ) a través de expresiones que utilizan el parámetro  $m_v$ . Este parámetro puede ser obtenido de ensayos SDMT y CPT.

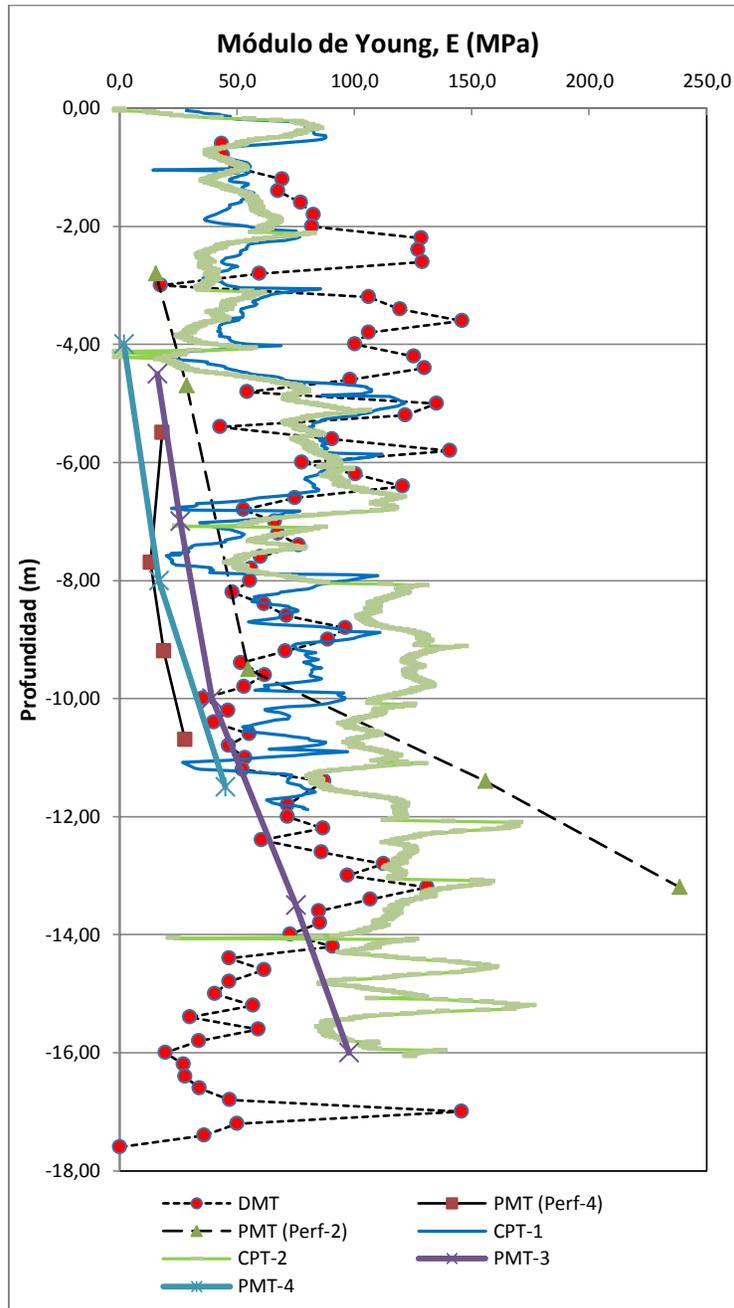
En este caso se obtuvo el valor de M a través de los ensayos in situ anteriormente mencionados y de los ensayos de consolidación realizados en muestras de suelo inalteradas extraídas de las perforaciones. Los resultados se muestran en la Figura 16.

Se observa que los valores obtenidos a través de los ensayos de consolidación se ajustan muy bien a los obtenidos a través del ensayo SDMT, mientras que son un poco mayores que los obtenidos por los ensayos CPT, esto debido a que el ensayo SDMT está más enfocado a medir la deformabilidad del terreno, sin embargo, se requiere contar con más cantidad de datos de ensayos de consolidación como para poder afirmar cuál de los dos ensayos es más fiable en cuanto a la medición de este parámetro.



**Figura 17.** Módulo compuesto, M obtenido por distintos ensayos de campo y laboratorio

Por otro lado es posible obtener el valor del Módulo de Young, E que es más comúnmente utilizado para análisis de deformabilidad del terreno. Este parámetro fue obtenido de los ensayos SDMT, CPT y PMT. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 18.



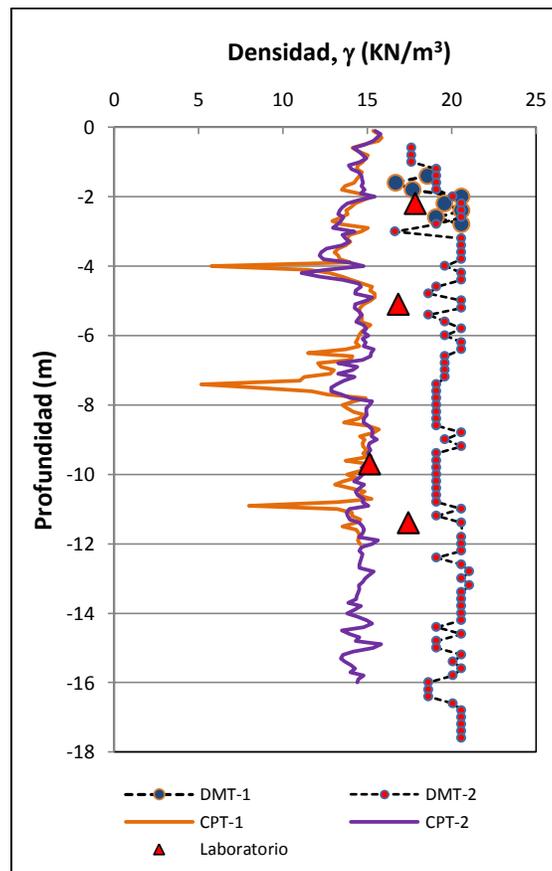
**Figura 18.** Módulo de Young, E determinado de ensayos SDMT, CPTu y PMT

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos se observa que existe una muy buena correspondencia entre los resultados obtenidos de los ensayos SDMT y CPT. Mientras que los módulos obtenidos por el ensayo PMT son en general inferiores, esto podría deberse a que el ensayo PMT es más propenso a sufrir alteraciones producto del proceso de perforación requerido para hacer el ensayo, donde se pueden presentar alteraciones en los resultados por el diámetro de la perforación, presencia de lodos compresibles en las paredes de la perforación, así como el tiempo transcurrido desde la perforación hasta la realización del ensayo (efecto de descompresión del material).

### Densidad del suelo ( $\gamma$ )

La densidad del terreno es un parámetro importante de conocer al analizar un perfil de terreno, ya que de este dependen los esfuerzos verticales a lo largo del perfil estudiado. La mejor forma de obtener este parámetro es a través de la extracción de muestras inalteradas de tamaño conocido, por ejemplo las obtenidas con un tubo de pared delgada.

No obstante, los ensayos como el SDMT y CPT permiten realizar una estimación de la densidad del terreno, en suelos “normales”, con base en el tipo de material y el módulo de deformabilidad. Esto se realiza con el objetivo de estimar el perfil de esfuerzo efectivo vertical, es necesario para la estimación de los demás parámetros geotécnicos. En la Figura 19 se muestran los valores obtenidos de ensayos in situ y laboratorio para determinar la densidad del terreno.



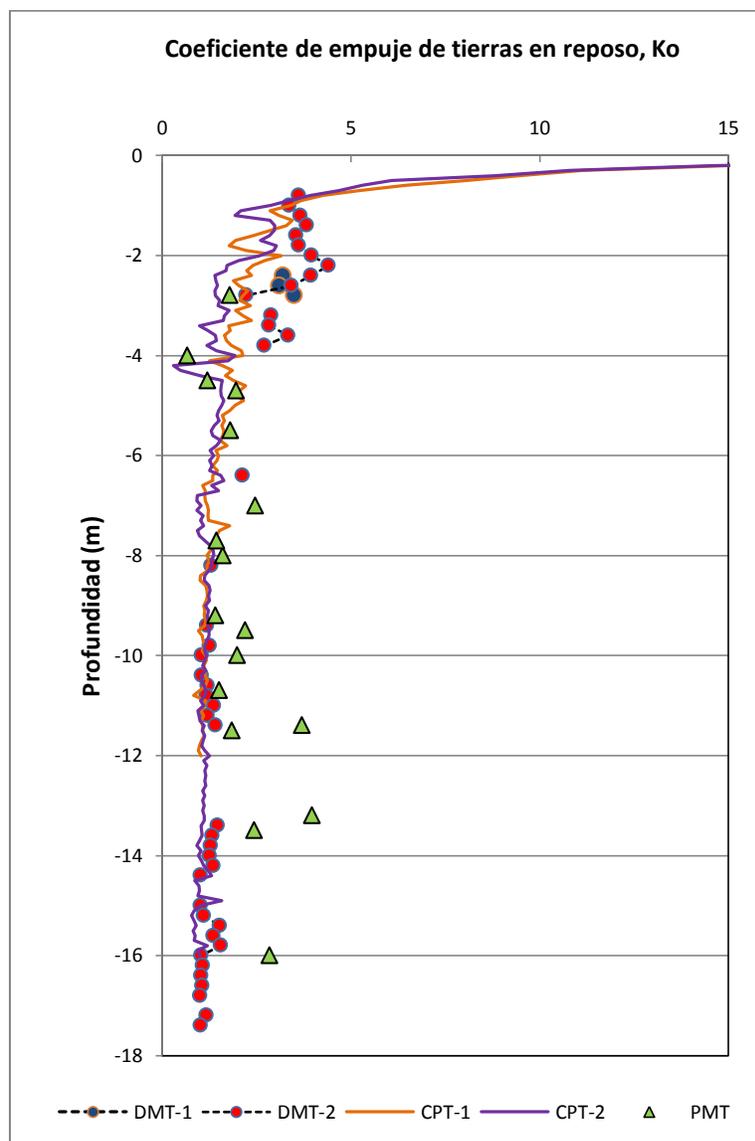
**Figura 19.** Densidad in situ, determinada de ensayos SDMT, CPT y laboratorio

Se debe hacer la aclaración de que en el caso del ensayo SDMT, se requiere estimar el valor de la densidad de la capa superficial de terreno, mientras que para el ensayo CPT, este valor inicial no es requerido. La estimación de la densidad en los ensayos in situ debe ser tomada solo como referencia y podría requerir un ajuste a las condiciones

locales para obtener mejores resultados, esto se podría lograr contando con una base de datos de resultados obtenidos en suelos de similar tipo.

Coeficiente de empuje de tierras en reposo ( $K_0$ )

Por medio de los ensayos SDMT, CPT y PMT, es posible estimar el coeficiente de empuje de tierras en reposo  $K_0$ , los resultados se muestran en la Figura 20. En este caso, se puede observar que existe una muy buena correlación entre los datos obtenidos de los ensayos SDMT y CPT, mientras que para el ensayo PMT, se cuenta con una dispersión un poco más alta, sin embargo, la tendencia en general es similar. Esta dispersión podría considerarse usual en el ensayo, debido a la gran cantidad de factores que lo pueden afectar.

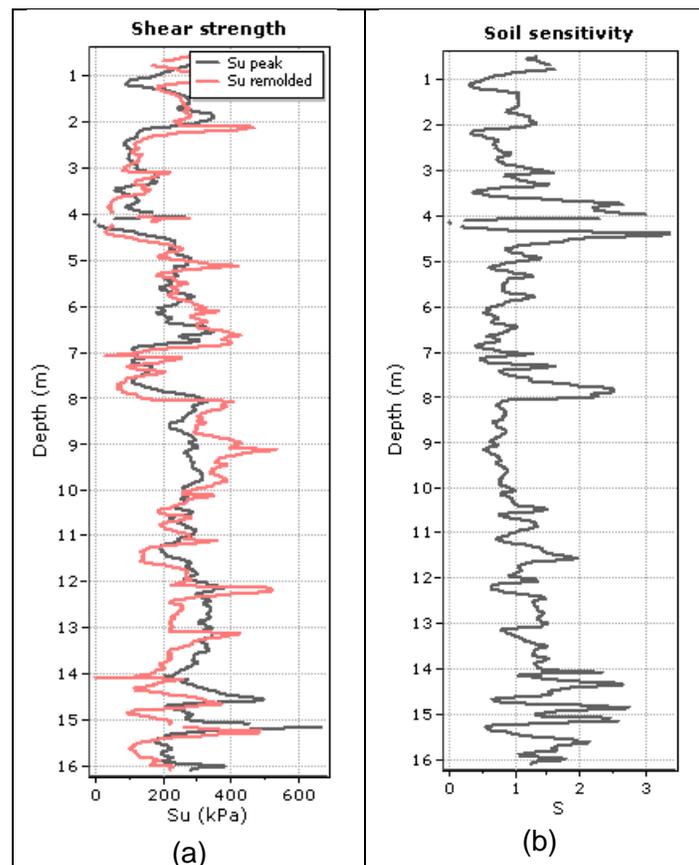


**Figura 20.** Coeficiente de tierras en reposo,  $K_0$ , determinada de ensayos SDMT, CPT y PMT.

### Sensibilidad del suelos arcillosos ( $S_t$ )

Algunos depósitos arcillosos presentan una pérdida de resistencia al ser remoldeados sin cambios en el contenido de agua, a esta propiedad se le conoce como Sensibilidad,  $S_t$ . Arcillas con  $S_t$  superiores a 10 se clasifican como muy sensitivas y podrían representar un problema para algunas obras de ingeniería.

En el ensayo CPT, es posible determinar la resistencia al corte no drenada del suelo sin remoldear (a través de  $q_c$ ) y remoldeadas (a través de  $F_s$ ). En la Figura 21 se muestran los resultados obtenidos.



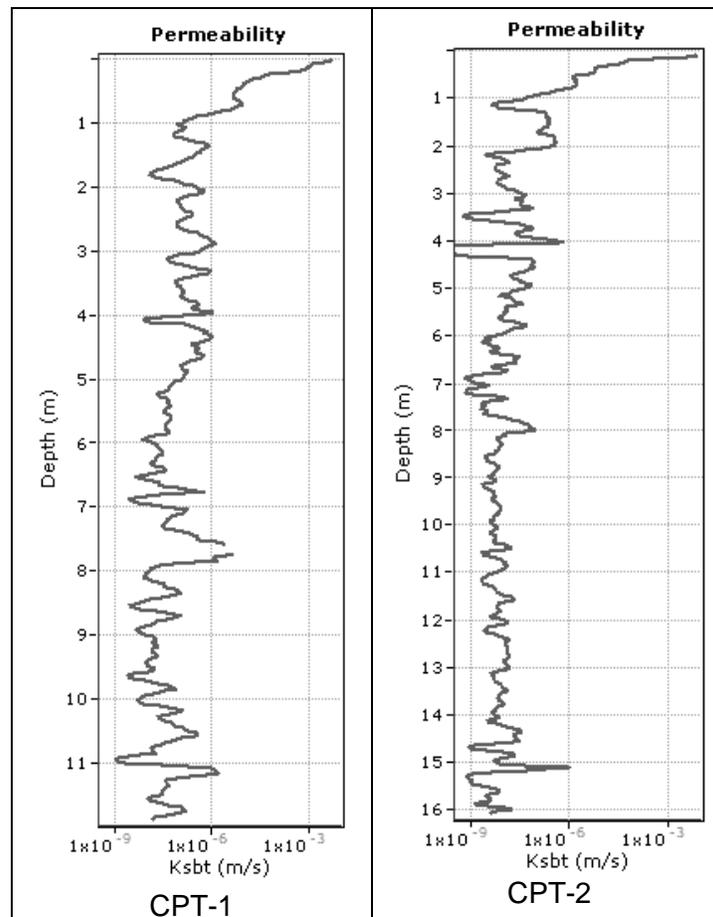
**Figura 21.** Resultados obtenidos del ensayo CPTu: a) Resistencia al corte no drenada remoldeada y no remoldeada. b) Sensibilidad del suelo.

Como se puede observar, los valores obtenidos de  $S_t$  son inferiores a 3, lo que refleja que estos materiales no son sensitivos o presentan una baja susceptibilidad a ser remoldeados.

No fue posible realizar ensayos de compresión simple a muestras remoldeadas con el fin de comparar los resultados obtenidos, sin embargo se muestra esta propiedad con el fin de presentar propiedades del suelo que pueden ser medidas por medio del ensayo CPT y que pueden representar una ventaja o aplicación de este ensayo sobre otros ensayos in situ.

### Permeabilidad (k)

El ensayo CPT permite estimar la permeabilidad del material, esto a través tablas en correlación con el Tipo de Comportamiento de Suelos Normalizado (SBTn). Los resultados obtenidos de este parámetro, al igual que en el caso anterior, se muestran a manera de ejemplo en la Figura 22, ya que no se realizó ningún ensayo de permeabilidad in situ para poder comparar los resultados.

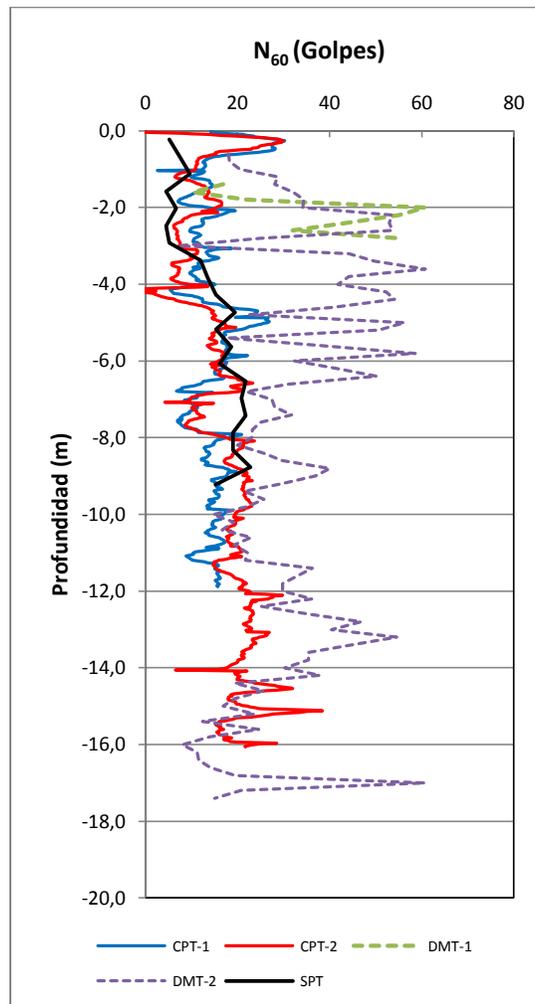


**Figura 22.** Permeabilidad de material obtenida a través de ensayos CPT.

### Correlación con el número de golpes del ensayo SPT ( $N_{60}$ )

El ensayo in situ más difundido en el mundo es el SPT, por lo que la gran mayoría de profesionales en geotecnia tienen gran experiencia en el uso de este ensayo, por esta razón se han desarrollado correlaciones entre los parámetros determinados por ensayos SDMT y CPT con respecto al  $N_{60}$ , con el fin de que sea posible ir adquiriendo la “sensibilidad” ante los resultados obtenidos de ensayos in situ modernos.

En este caso se obtuvo el  $N_{60}$  correlacionado con el fin de comparar los resultados obtenidos, los mismos se muestran a continuación.



**Figura 23.** Comparación del  $N_{60}$  obtenido del SPT y valores obtenidos por medio de correlación con los ensayos SDMT y CPT.

En este caso se observa la correlación con el ensayo CPT es bastante buena, obteniéndose resultados muy similares a los reales obtenidos directamente a través del ensayo SPT. Mientras que en el caso de la correlación con el ensayo SDMT, presenta valores que sobreestiman el valor de  $N_{60}$ , por lo que para este sitio, la correlación con el DMT no es muy aplicable, lo cual es de esperar ya que el CPT y el SPT son penetrómetros, mientras que el SDMT es un dilatómetro.

### Velocidad de onda cortante ( $V_s$ ), módulo cortante ( $G_0$ ) y Módulo de Young ( $E_0$ )

Existen equipos complementarios que se le pueden adicionar a los ensayos DMT y CPT, ejemplo de esto es el módulo sísmico, que permite medir propiedades dinámicas del terreno como por ejemplo la velocidad de onda cortante ( $V_s$ ).

El módulo sísmico básicamente consisten en colocar uno o dos geófonos en el sector anterior a la paleta o el cono dependiendo del ensayo, esto permite ir midiendo a distintas profundidades el tiempo que le toma a las ondas causadas por una fuente,

generalmente un golpe con un mazo, en llegar desde la superficie hasta los geófonos (Figura 24). La configuración del equipo se podría considerar como un ensayo “Down-Hole”.

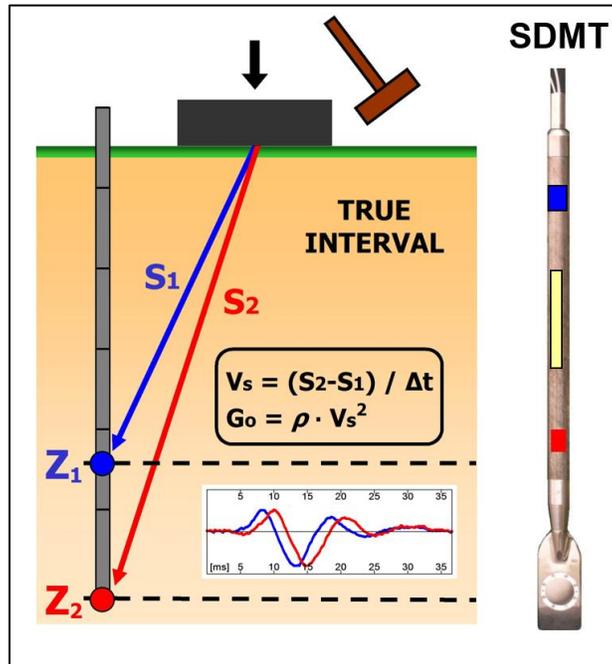


Figura 24. Diagrama del módulo sísmico para el ensayo SDMT.

En este caso fue posible realizar 2 ensayos SDMT, a través de los cuales se obtuvieron valores de  $V_s$  cada 0.5 m hasta una profundidad máxima de 16 m. Además se realizaron 2 perfiles de refracción sísmica, en los cuales se utilizó un arreglo de geófonos colocados horizontal y verticalmente con el fin de poder registrar tanto  $V_P$  como  $V_s$ , con lo cual fue posible investigar una profundidad promedio de 25 m.

Al contar con el perfil de valores de  $V_s$ , es posible calcular el Módulo Cortante a Bajas Deformaciones ( $G_0$ ), el cual se utiliza para realizar análisis dinámicos del terreno, además es posible estimar un Módulo de Deformabilidad a Bajas Deformaciones ( $E_0$ ). Las expresiones utilizadas para el cálculo de estos parámetros son las siguientes.

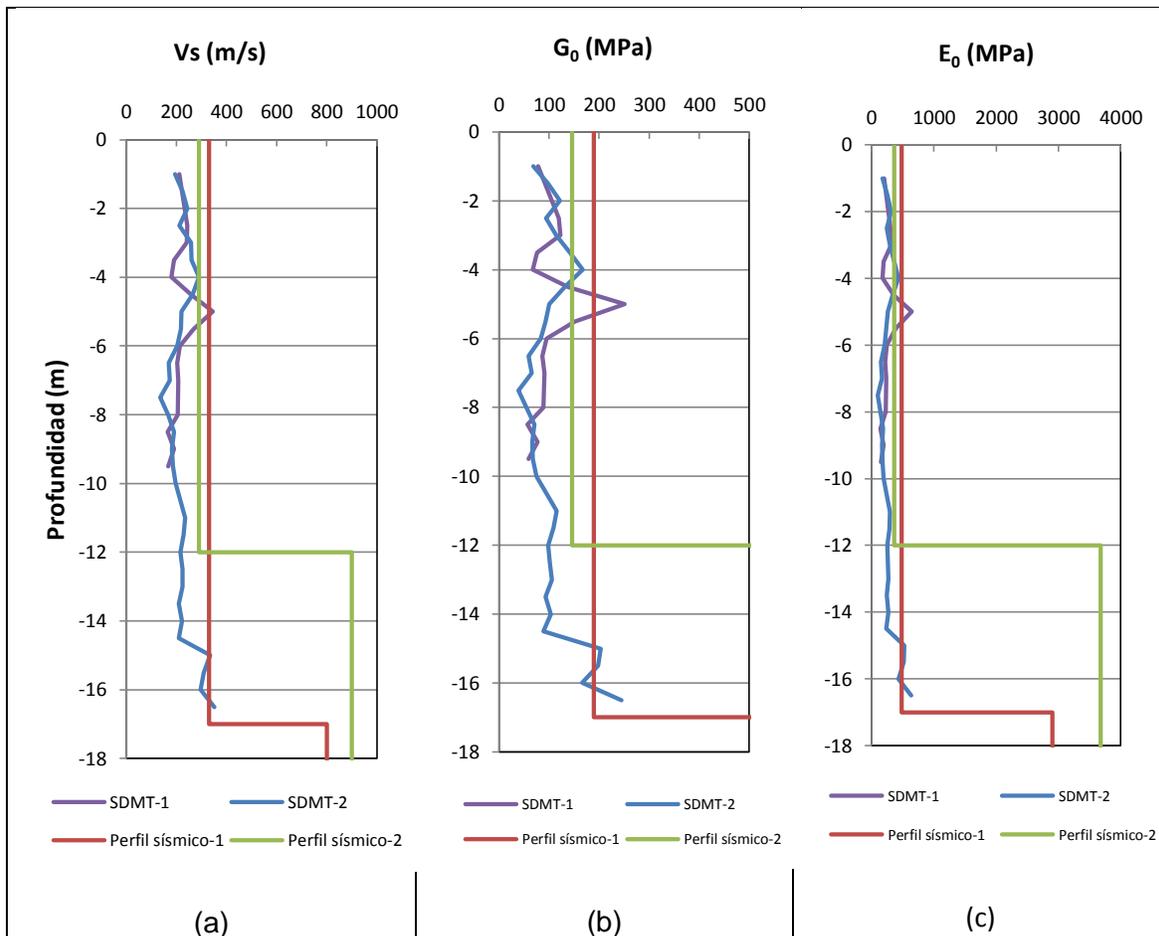
$$G_0 = \rho \cdot V_s^2$$

$$E_0 = 2(1 + \nu)G_0$$

Donde:

- $\rho$ : Densidad del material
- $\nu$ : Razón de Poisson

Los resultados obtenidos de  $V_s$ ,  $G_0$  y  $E_0$  a través de los ensayos SDMT y refracción sísmica se presentan a continuación.



**Figura 25.** Resultados obtenidos de ensayos SDMT y Refracción Sísmica. a) Velocidad de onda cortante  $V_s$  b) Módulo cortante a pequeñas deformaciones  $G_0$  c) Módulo de deformabilidad a pequeñas deformaciones  $E_0$ .

En este caso se puede observar que el ensayo de refracción sísmica establece valores de  $V_s$  para estratos de gran espesor, presentando una baja sensibilidad a condiciones variables en el estrato de suelo. En este caso se definen 2 capas sísmicas de en promedio 15 m de espesor, a las cuales se les asigna un único valor de  $V_s$  para todo el estrato.

Mientras tanto, el ensayo SDMT permite obtener una mayor cantidad de datos y de forma más precisa, lo que permite reflejar mejor las variaciones dentro del estrato de suelo lo que se traduce en un perfil de velocidades sísmicas que refleja de mejor forma el perfil del terreno y que es más sensible ante pequeñas variaciones.

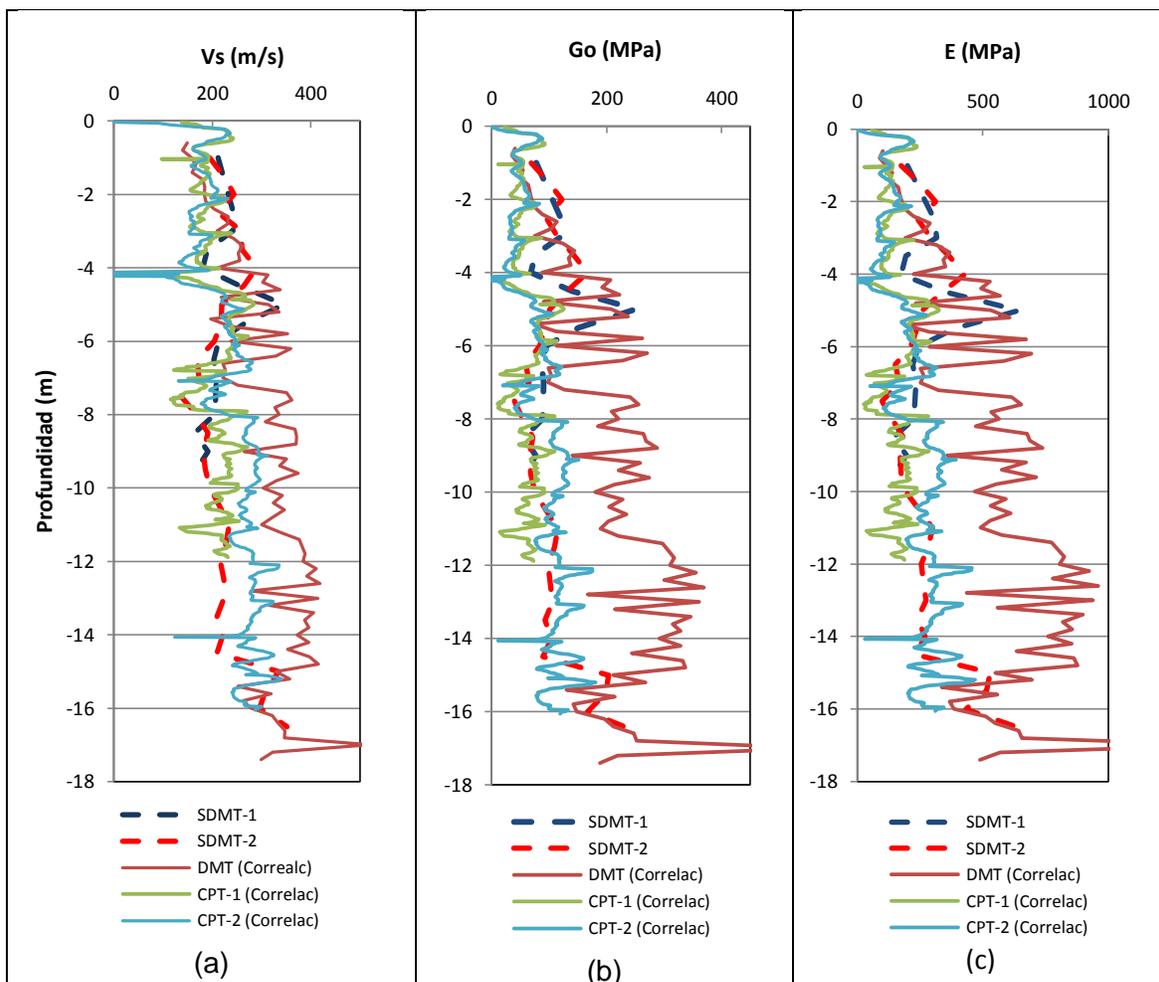
Por esta misma razón los resultados obtenidos del ensayo SDMT para  $G_0$  y  $E_0$  son de mayor utilidad y arrojan valores que se ajustan mejor a las condiciones del terreno encontradas.

Para estudios de áreas relativamente pequeñas, el ensayo SDMT resulta más rápido y más confiable que realizar un perfil de refracción sísmica. Mientras que el ensayo de refracción sísmica convencional presenta ventajas para definir zonas de mayor

contraste, por ejemplo distintas litologías, pero es difícil establecer zonas de contrastes menores como variaciones en un mismo estrato de suelo.

Existen correlaciones entre los resultados del ensayo DMT y CPT (convencionales) para estimar el valor de  $V_s$  en caso de no realizar mediciones directas utilizando el módulo sísmico de estos equipos, por ejemplo en caso de no contar con el mismo.

Con el fin de realizar comparaciones entre resultados y validar estas correlaciones para este caso, se realizó el cálculo de los valores de  $V_s$ ,  $G_0$  y  $E_0$  correlacionados con el fin de comparar estos resultados con los obtenidos directamente, los resultados se muestran a continuación.



**Figura 26.** Comparación de resultados obtenidos del SDMT y valores correlacionados del DMT y CPT. a) Velocidad de onda cortante  $V_s$  b) Módulo cortante a pequeñas deformaciones  $G_0$  c) Módulo de deformabilidad a pequeñas deformaciones  $E_0$ .

Se puede observar que, en este caso, la correlación a partir del ensayo CPT arroja mejores resultados que la obtenida del DMT. Por lo que en este caso al utilizar los

valores obtenidos de ensayos de correlaciones con el CPT sin realizar el ensayo con el módulo sísmico se obtendrían resultados similares con un error aceptable.

Existen correlaciones a partir de  $V_s$  para estimar otras propiedades como la densidad, resistencia al corte no drenada y ángulo de fricción, sin embargo, estas presentan gran dispersión en los resultados y deber ser utilizadas solamente a manera de referencia.

### Identificación de suelos con comportamiento “inusual” por medio del ensayo SCPT<sup>1</sup>

A través de los resultados obtenidos del ensayo SCPT, en el cual se adiciona el módulo sísmico al ensayo convencional CPT, es posible identificar suelos con comportamientos inusuales, como por ejemplo suelos con algún grado de cementación, o depósitos antiguos o recientes.

Esto se logra utilizando un parámetro llamado número de módulo ( $K_G$ ) propuesto por Schneider y Moss (2011), este parámetro es función de  $G_o$  y  $q_t$  y se obtiene de la siguiente expresión:

$$K_G = \left( \frac{G_o}{q_t} \right) \cdot Q_{tn}^{0.75}$$

Donde:

$K_G$ : Número de módulo

$G_o$ : Módulo cortante a bajas deformaciones

$q_t$ : Resistencia corregida del cono

$Q_{tn}$ : Resistencia corregida del cono normalizada

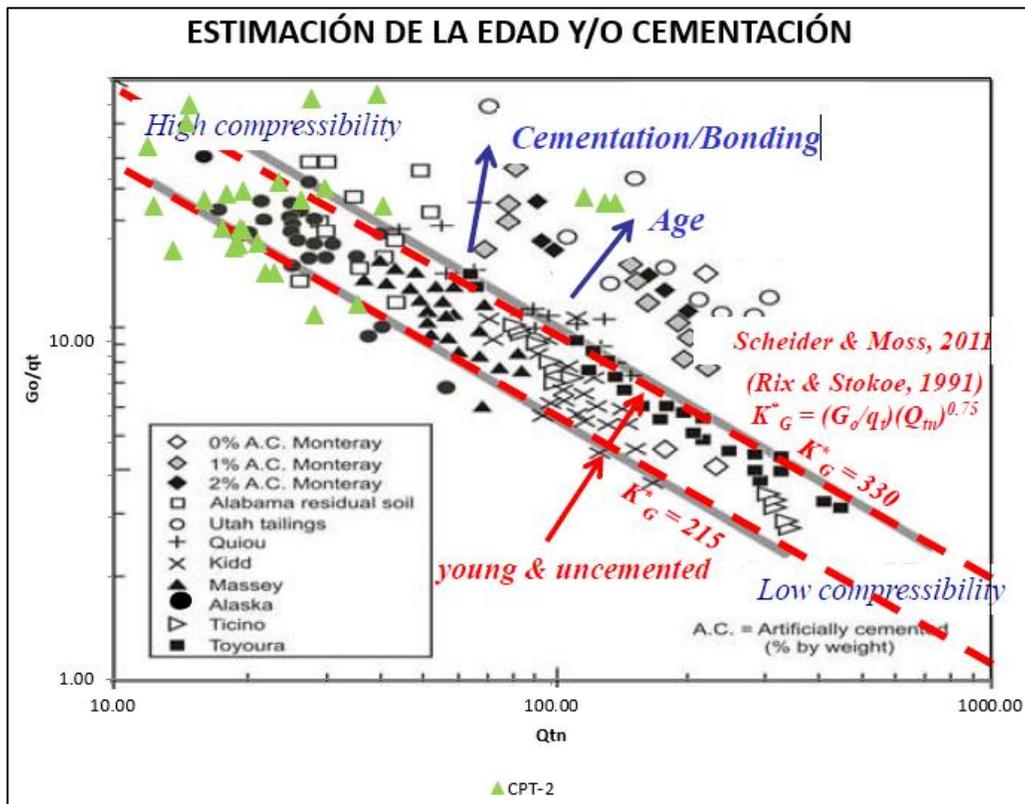
Los depósitos recientes y no cementados generalmente arrojan valores de  $K_G$  entre 215 y 330, mientras que suelos que presentan algún grado de cementación o son muy antiguos presentan un  $K_G$  mayor a 330.

En este caso no se realizó un ensayo SCPT, sin embargo si se realizó un ensayo CPT convencional y se cuenta con el registro de  $V_s$  a partir del ensayo SDMT para el mismo sitio, por lo que se utilizaron dichos valores para realizar el análisis.

Al graficar los resultados obtenidos del ensayo CPTu-2 en la gráfica de Schneider y Moss (Robertson & Cabal, 2014), se obtiene que en general el material corresponde con depósitos recientes no cementados de alta compresibilidad, lo cual corresponde muy bien con lo determinado a través de los demás parámetros analizados anteriormente. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

---

<sup>1</sup> En este caso no se realizó un ensayo SCPT, sino que se combinaron los datos de los ensayos SDMT y CPT para obtener el mismo resultado.



**Figura 27.** Estimación del comportamiento del suelo a partir del ensayo SCPT de acuerdo a la gráfica de Schneider y Moss (2011)

## SITIO DE PRUEBA #2

En este sitio solamente se cuenta con información de ensayos DMT y SPT, así como resultados de algunos ensayos de laboratorio. Por esta razón, las comparaciones que es posible realizar son limitadas y se utilizará como referencia para corroborar algunas de las propiedades que usualmente se obtienen en un estudio convencional.

En este sitio se cuenta con 3 zonas investigadas, las cuales presentan condiciones geotécnicas distintas, a pesar de encontrarse muy cerca unas de otras, por lo que los resultados se muestran para cada una de estas zonas por separado.

### Tipo de material

Se presenta la comparación entre la identificación del material obtenida del ensayo DMT y los resultados de ensayos de clasificación SUCS realizados en el laboratorio en muestras extraídas por medio de un ensayo SPT. Solamente se cuenta con ensayos de clasificación en 2 de las zonas estudiadas, los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 4 y 5.

**Tabla 4.** Tipo de material de acuerdo al ensayo DMT ensayos de laboratorio para la zona 1

Prof. (m)	DMT-1	DMT-2	Laboratorio	
1.0	-	Arcilla limosa	SM	
1.2	Limo	Limo arcilloso		
1.6	-	Limo arenoso		
1.8	Arena	Limo arenoso		
3.8	Limo arenoso	Arena	ML	
4.0	Arcilla limosa	Limo arcilloso		
4.2	Arcilla	Limo arcilloso		
5.2	Arcilla limosa	Arcilla	MH	
5.4	Arcilla	Arcilla		
5.6	Arcilla	Limo arcilloso		
5.8	Arcilla	Limo arcilloso		
6.0	Arcilla	Limo arcilloso		
6.2	Turba	Arcilla		
6.4	Arcilla	Arcilla		
6.6		Arcilla		
7.8		Arcilla		MH
8.2		Arcilla		
8.4		Limo arcilloso	MH	
8.6		Arcilla		
8.8		Arcilla		

**Tabla 5.** Tipo de material de acuerdo al ensayo DMT ensayos de laboratorio para la zona 2

Prof. (m)	DMT-3	Laboratorio
1.6	Arena	GW-GM
2.8	Arcilla limosa	
5.4	Arcilla limosa	MH
5.6	Arcilla	
6	Arena	
6.2	Limo	
7.2	Limo arenoso	SM
7.4	Arcilla limosa	
7.6	Limo arenoso	
7.8	Limo arenoso	
8	Limo	
8.2	Arena limosa	

Se puede observar que a pesar de tratarse de un perfil de terreno compuesto de intercalaciones centimétricas de depósitos de materiales aluviales y coluviales que hace que exista una gran variabilidad de tipos de material a lo largo de la profundidad investigada, la identificación del tipo de material obtenida del ensayo DMT es bastante precisa con respecto a los resultados obtenidos de ensayos de laboratorio.

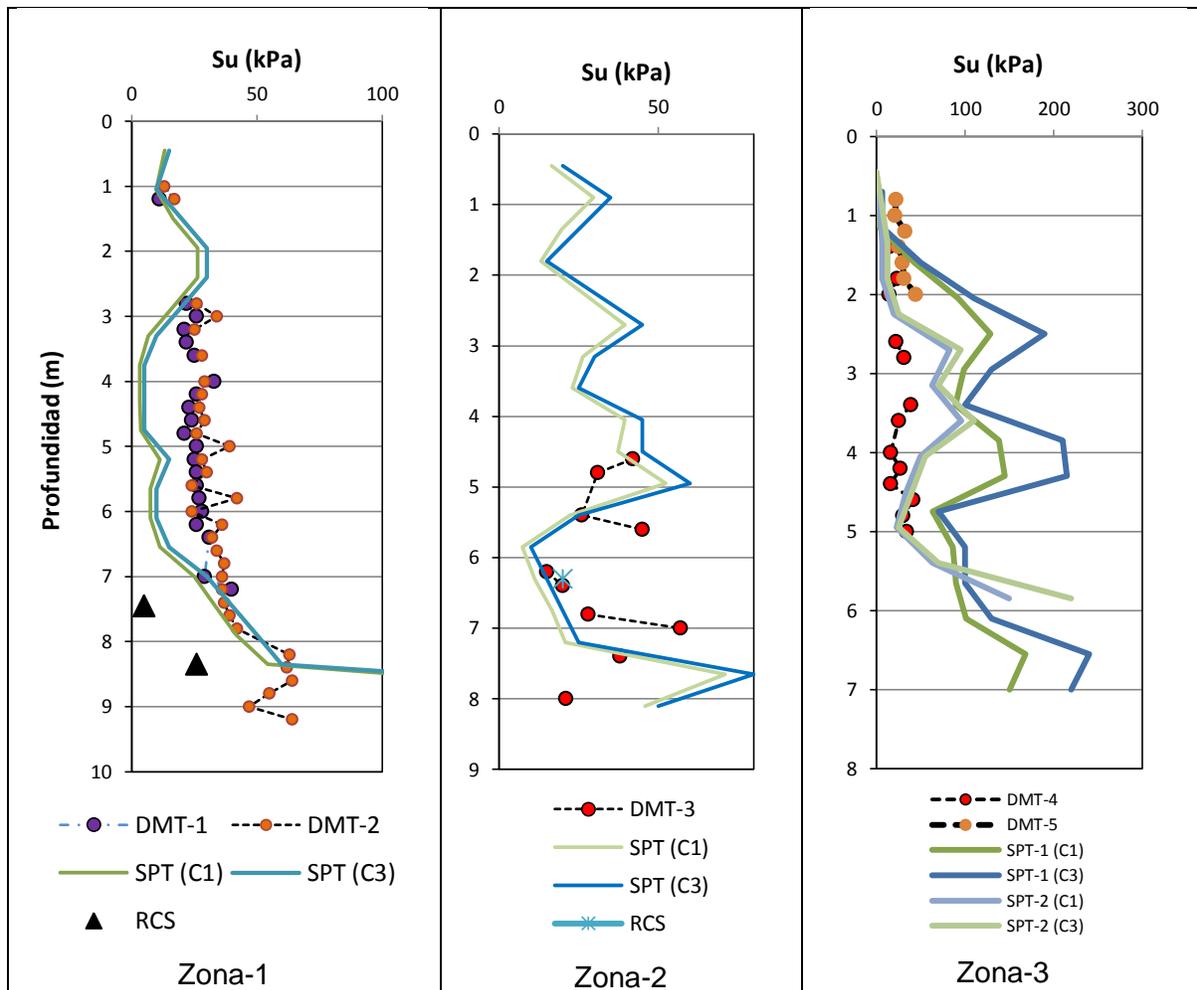
En este caso se podría decir que es más detallada la clasificación obtenida del ensayo DMT que la obtenida por medio de la clasificación obtenida por el conjunto SPT-Ensayos de Laboratorio, ya que el DMT presenta datos del tipo de material cada 20 cm, mientras que en de la manera convencional se obtendrían usualmente pocos datos y se “zonificaría” de una forma menos precisa (con base en estratos más grandes).

Se podría concluir que para suelos con variaciones centimétricas a lo largo del perfil, ensayos con mayor cantidad de datos como el DMT y CPT permiten clasificar mejor y

con mayor rapidez el perfil del terreno que tomar pocas muestras como en el caso del ensayo SPT.

Resistencia al corte no drenada,  $S_u$

En este caso se cuenta con resultados de las 3 zonas, donde existen ensayos DMT y ensayos SPT. El valor de  $S_u$  se estimó a través de la Correlación #1 y #3 (anteriormente mencionadas), los resultados obtenidos se muestran a continuación.



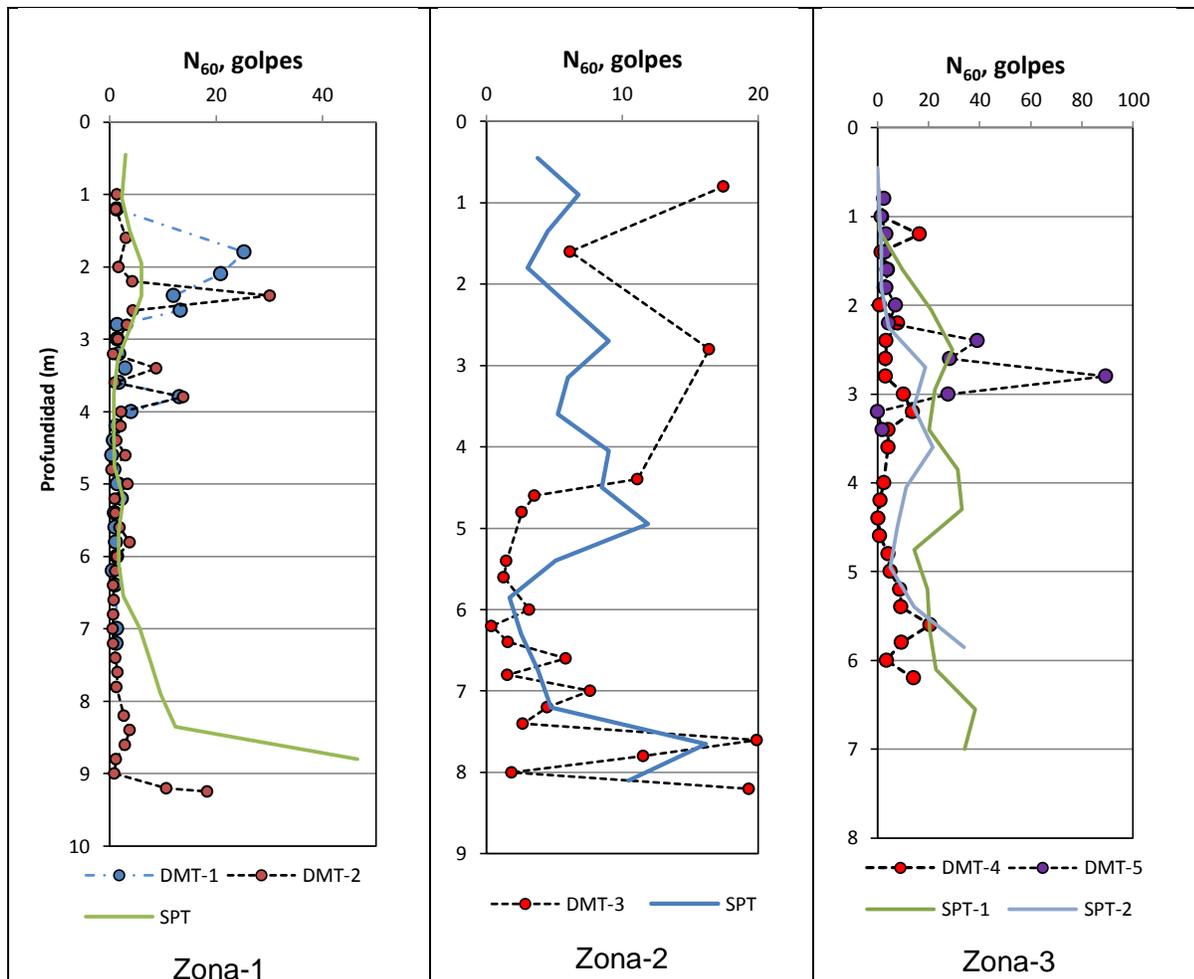
**Figura 28.** Resistencia al corte no drenada  $S_u$ , obtenida de ensayos DMT y correlaciones con el ensayo SPT para 3 zonas en el sitio.

Se puede observar que los resultados obtenidos a través del ensayo DMT presentan variaciones distintas en todos los casos con respecto al ensayo SPT, esto es de esperarse debido al perfil de terreno estudiado, ya que al tratarse de capas centimétricas, el contar con datos distanciados en menor medida hace que se logren obtener mejores resultados. Además se puede ver la gran variabilidad que existe en los resultados obtenidos de ensayos SPT, mientras que los sondeos DMT son más

concordantes en comparación con otro sondeo del mismo tipo, como queda reflejado en los resultados de la zona 1.

### Correlación con el número de golpes del ensayo SPT ( $N_{60}$ )

Se realizó un cálculo del valor  $N_{60}$  correlacionado a partir del ensayo DMT, esto con el fin de comparar los resultados con los obtenidos de ensayos SPT, estos se muestran a continuación.



**Figura 29.** Valor de  $N_{60}$ , obtenido por medio de correlaciones a partir de ensayos DMT y con el ensayo SPT para 3 zonas en el sitio.

Los valores obtenidos de  $N_{60}$  a través de correlaciones presentan gran dispersión en sus resultados, por ejemplo en la Zona 1 la correlación arroja valores que tienden a los obtenidos directamente del SPT, mientras que para las Zonas 2 y 3 la correlación en general presenta una mismas tendencia pero con mayor dispersión en los resultados obtenidos.

Al igual que en el caso anterior, esta dispersión en los resultados podría deberse a las características del perfil de suelo estudiado, que presenta una secuencia de capas de material depositado, lo que provoca que existan variaciones en los materiales en distancias muy cortas, así como en muchos casos la presencia de bloques que pueden producir alteraciones en los resultados en sitios aún separados por unos cuantos centímetros.

### SITIO DE PRUEBA #3

En este proyecto se estudiaron 6 zonas, donde se cuenta con ensayos SDMT y SPT. Las propiedades utilizadas en esta comparación fueron el tipo de material, la resistencia al corte no drenada y la correlación con el  $N_{60}$  del ensayo SPT.

#### Tipo de material

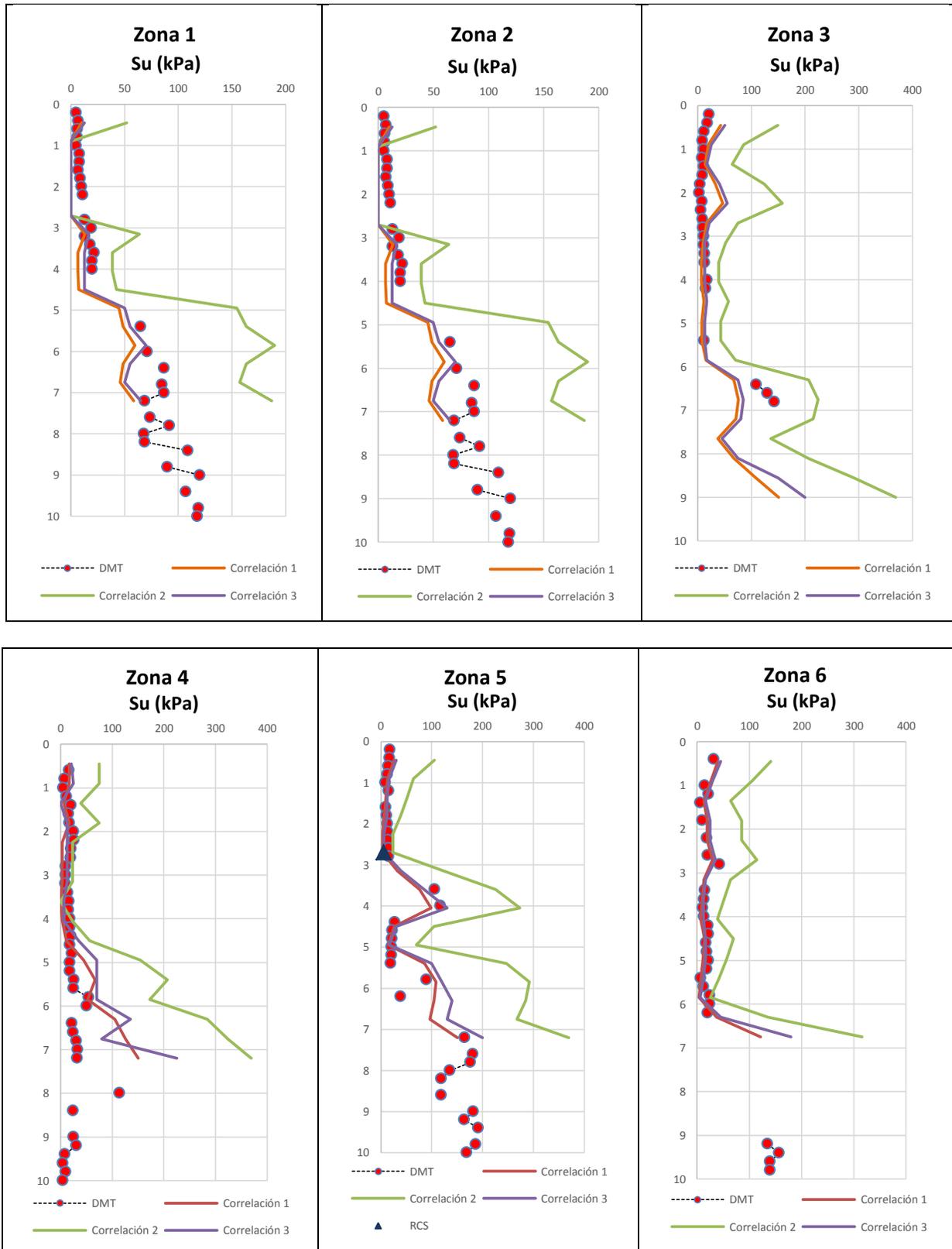
Los resultados obtenidos de los ensayos in situ y de laboratorio para la identificación de los materiales en las 6 áreas estudiadas se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 6.** Tipo de material de acuerdo al ensayo DMT ensayos de laboratorio

Comparación de los resultados del índice de material (Id)				
Sondeo	Profundidad (m)	Clasificación SUCS	SDMT	
			Id	Descripción
Zona 1	0,90-1,35	MH	0,1-0,2	Turba (arcilla)
	4,05-4,50	SM	1,8-2,8	Arena limosa
	6,30-6,75	SM	1,8-1,9	Arena limosa
Zona 2	2,70-3,15	SM	1,0-1,9	Limo arenoso
	4,50-4,95	SW-SM	1,0-2,5	Arena
	5,40-5,85	SM	1,8-2,0	Arena limosa
Zona 3	1,35-1,80	MH	0,1-0,4	Arcilla
	3,60-4,05	MH	0,6-1,8	Arcilla limosa
	5,85-6,30	GC	1,8-3,0	Arena
	7,65-8,10	SM	2,2-2,5	Arena limosa
Zona 4	1,35-1,80	MH	0,6-0,7	Limo arcilloso
	3,15-3,6	CH	0,2-0,4	Arcilla
	4,05-4,5	MH	0,3-1,5	Limo
	6,75-7,20	SM	0,6-1,0	Limo arenoso
Zona 5	1,35-1,80	CH	0,5-1,0	Arcilla limosa
	3,15-3,60	SM	1,9-3,0	Arena limosa
	5,40-5,85	SM	1,0-2,0	Arena limosa
Zona 6	2,70-3,15	MH	1,0-2,0	Limo arenoso
	4,05-4,50	CH	0,25-0,6	Arcilla limosa
	6,30-6,75	SM	1,5-2,8	Arena limosa

#### Resistencia al corte no drenada, $S_u$

Al igual que en los casos anteriores se calculó el valor de  $S_u$  a través de correlaciones con el  $N_{60}$  del ensayo SPT y se compararon con los resultados de ensayos DMT. Los resultados se muestran en la Figura 30

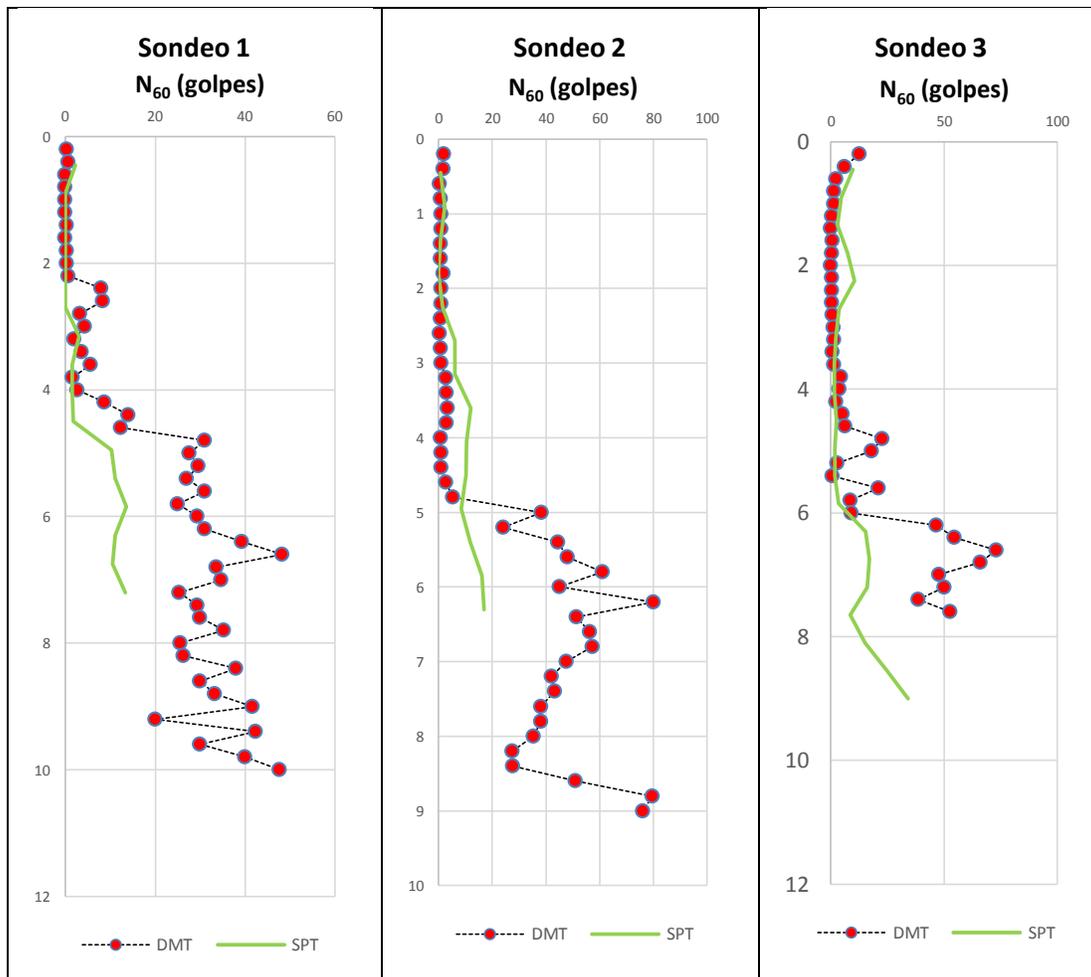


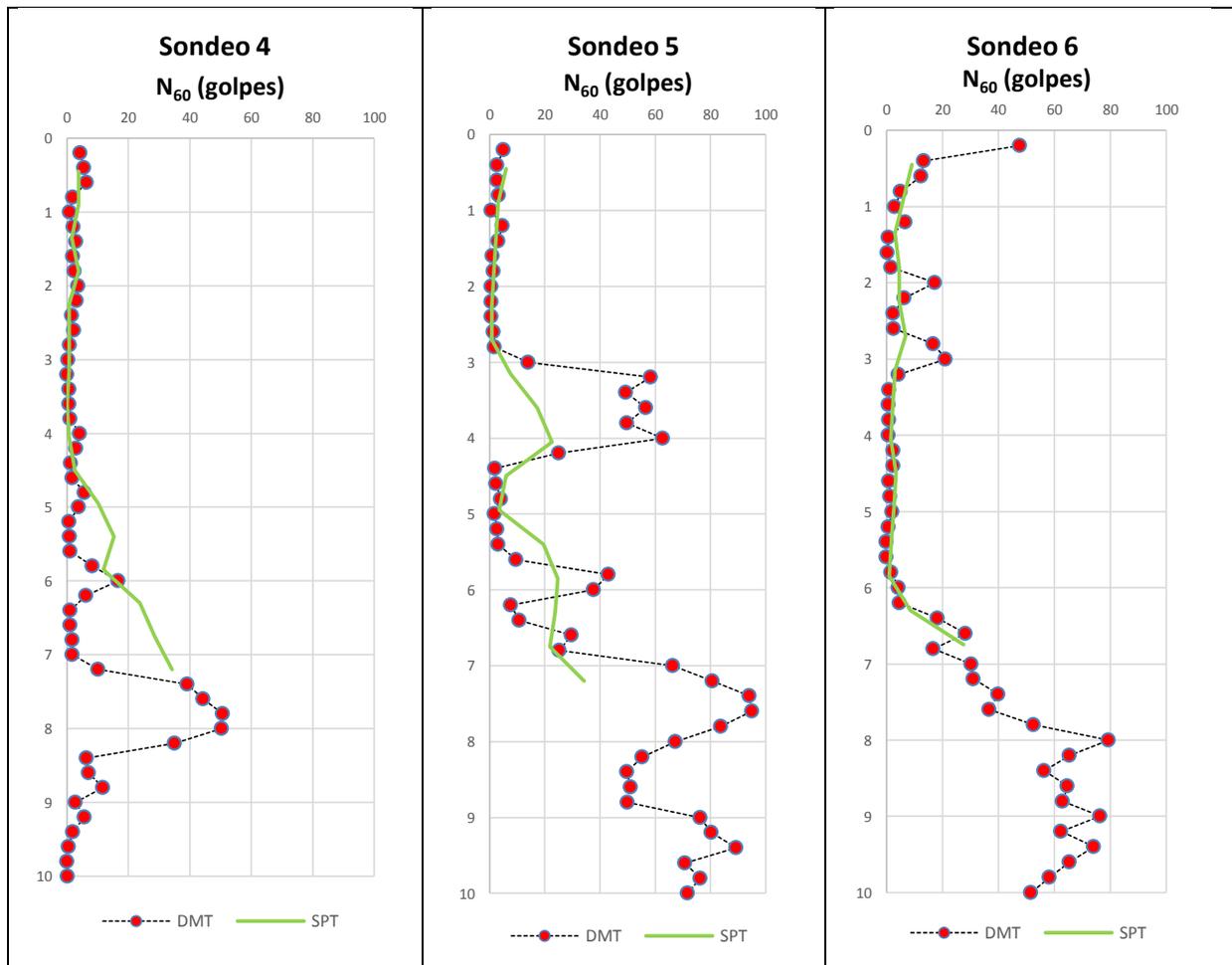
**Figura 30.** Comparación de resultados de Resistencia al Corte No Drenada  $S_u$ , determinada a través de ensayos DMT y SPT.

Se puede observar que en este caso los resultados obtenidos a través de las correlaciones 1 y 3 del ensayo SPT concuerdan muy bien con los resultados obtenidos del ensayo DMT, mientras que la correlación 2 en general sobrestima el valor de  $S_u$ .

Correlación con el número de golpes del ensayo SPT ( $N_{60}$ )

En este caso, al igual que en los anteriores, se realizó una estimación del  $N_{60}$  obtenido a través de correlación con ensayo DMT con el fin de comparar los resultados, los mismos se muestran a continuación.





**Figura 31.** Comparación de resultados del  $N_{60}$  obtenido del ensayo SPT y correlacionado con el DMT.

Se puede concluir que en este caso también se tiene una muy buena correlación entre los resultados, ya que los valores obtenidos a través de la correlación con el ensayo DMT arrojan valores muy similares a los obtenidos del ensayo SPT.

Cabe mencionar que de los 3 sitios de prueba analizados, en este fue en el que mejor correlación se obtuvo entre el ensayo SPT y el DMT, sin embargo, no es posible concluir que la correlación siempre arroje buenos resultados, ya que como se pudo observar en los otros sitios, en algunos casos los resultados pueden alejarse de la realidad.

Por lo tanto en este caso queda demostrado que realizar ensayos DMT presenta mayores ventajas, ya que permite obtener una mayor cantidad de propiedades del suelo y se obtiene una mayor cantidad de datos, lo que permite tener un mejor perfil de las propiedades del terreno.

## CONCLUSIONES

Los ensayos de investigación geotécnica avanzada como el Dilatómetro Sísmico Marchetti (SDMT) y el Piezocono (CPTu) permiten determinar gran cantidad de propiedades del suelo como: resistencia, deformabilidad, estado de esfuerzos, entre otros, de forma muy precisa, rápida y se obtienen resultados en “tiempo real”, sin necesidad de realizar ensayos de laboratorio.

A través del análisis de 3 sitios geotécnicamente distintos fue posible comprobar que los resultados de ensayos SDMT y CPT concuerdan con los obtenidos a través de otros ensayos de campo y laboratorio para propiedades geotécnicas como la resistencia al cortante no drenada ( $S_u$ ), razón de preconsolidación (OCR), módulo de Young (E) y velocidad de onda cortante ( $V_s$ ) entre otros.

Por medio del presente trabajo fue posible comprobar que cada uno de los ensayos in situ estudiados, arroja mejores resultados para algunas aplicaciones y para la determinación de algunas propiedades, por lo que la selección del ensayo in situ idóneo para un determinado caso dependerá de la aplicación específica y el tipo de material presente en el sitio.

Debido a los avances tecnológicos y a la creciente experiencia que existe a nivel mundial, los ensayos SDMT y CPT cada vez se vuelven más competitivos en comparación a otros ensayos in situ como el SPT. Esto debido a la rapidez con que se realizan los sondeos, la calidad y cantidad de los datos obtenidos y a que son menos propensos la influencia de operadores distintos, por lo que se dice que presentan un grado muy alto de “replicabilidad”, en especial el ensayo CPT.

Los ensayos SDMT y CPT en general presentan una muy buena correlación entre los resultados obtenidos para las distintas propiedades del suelo, tal y como se indica en la literatura existente, lo cual pudo ser comprobado con los resultados obtenidos del Sitio de Prueba #1.

El ensayo CPT permite obtener propiedades como la permeabilidad y la sensibilidad de suelos arcillosos propiedades para las cuales en el pasado se requería ensayos de campo y laboratorio específicos.

El ensayo SDMT presenta una ventaja en cuanto a la determinación del estado de esfuerzo del terreno, lo que permite obtener muy buenos resultados en cuanto a la historia de esfuerzos del material, a través del parámetro  $K_D$ . Además a través de este mismo parámetro es posible detectar superficies de falla en deslizamientos y zonas de descompresión en laderas, lo que lo hace muy útil en la resolución de este tipo de problemas geotécnicos.

A través del presente estudio fue posible comprobar que la determinación del tipo de material realizada por el ensayo DMT y CPT, por medio de un comportamiento mecánico sin extracción de muestras, arroja resultados muy similares a los obtenidos a

través de ensayos de laboratorio realizados a muestras extraídas por medio de otros ensayos in situ.

En los casos estudiados, se podría concluir que los resultados obtenidos para propiedades como deformación y resistencia de ensayos DMT y CPT arrojan datos suficientemente confiables como para prescindir de los ensayos de laboratorio. Esto es aplicable en los sitios estudiados, pero de ninguna forma puede ser generalizado y se requiere contar con mayor experticia local para reducir la cantidad de ensayos de laboratorio a realizar.

Como complemento a los ensayos DMT y CPT es recomendable contar con un muestreador que permita extraer muestras de forma rápida y selectiva, con el fin de poder realizar ensayos de laboratorio a zonas de interés.

Con los equipos SDMT y CPT es posible realizar ensayos de disipación que permiten obtener el coeficiente de consolidación ( $c_h$  y  $c_v$ ) y el coeficiente de permeabilidad ( $k_h$  y  $k_v$ ) en suelos cohesivos. En este estudio no se incluyen resultados de este tipo de ensayos, ya que las condiciones encontradas no eran las requeridas.

El ensayo con el Presiómetro (PMT), a pesar de que permite obtener las propiedades de deformabilidad del suelo, presenta la limitante de requerir realizar una perforación para poder ser ejecutado. Además el ensayo es propenso a sufrir alteraciones producto del proceso de perforación, el uso de lodos o imperfecciones en la perforación. Por otro lado el ensayo PMT se realiza de forma puntual por lo que para contar con un número considerable de datos se requiere un largo tiempo para realizar los ensayos.

En suelos muy duros o rocas blandas el ensayo PMT resulta muy útil, ya que permite ensayar materiales en que otros equipos no pueden ser utilizados, como por ejemplo el DMT, CPT y SPT. Además este equipo permite ensayar suelos heterogéneos como lahares donde existen bloques de distintos tamaños y en cantidades variables dentro de una matriz de suelo, en que otros equipos tienen una aplicabilidad limitada.

La resistencia al cortante no drenada  $S_u$ , obtenida del ensayo PMT tiende a ser considerablemente mayor a la obtenida por medio de otros ensayos de campo y laboratorio, pudiendo llegar a valores que oscilan entre 1.3 y 1.7 veces mayor al valor "real".

El ensayo SPT solamente permite obtener directamente el valor del  $N_{SPT}$ , por lo que se debe recurrir a correlaciones para determinar otras propiedades geotécnicas como la resistencia al corte no drenada y el ángulo de fricción. Este ensayo no permite obtener propiedades de deformabilidad, por lo que es limitado su uso para el cálculo de asentamientos.

Una limitante del ensayo SPT es su poca replicabilidad en cuanto a los resultados, por lo que en general 2 ensayos ubicados en el mismo sitio arrojaran resultados distintos,

esto debido a problemas inherentes a la ejecución del ensayo, así como al efecto humano causado por el operador del equipo.

El ensayo in situ del cual se obtienen menos datos y con mayor dispersión en los resultados es en general el SPT, sin embargo, es el ensayo más utilizado en el país y en general a nivel mundial.

El módulo sísmico de los ensayos SDMT y SCPT, permite obtener un perfil de velocidad de onda cortante  $V_s$ , usualmente con valores cada 0.5 m, con resultados de mejor calidad que los obtenidos de ensayos de refracción sísmica convencionales.

Al determinar el perfil de  $V_s$  con la profundidad, es posible determinar el módulo cortante a bajas deformaciones  $G_0$  y el módulo de deformabilidad a bajas deformaciones  $E_0$ . Además es posible obtener las curvas de decaimiento del módulo ( $G-\gamma$ ) requeridas para análisis dinámico del suelo (Marchetti et al, 2008).

Existen aplicaciones que utilizan los resultados obtenidos de las mediciones de onda, tanto  $V_s$  para determinar potencial de licuefacción y otras propiedades del suelo. Además existen equipos que permiten determinar también la  $V_p$  con lo que es posible determinar el grado de saturación de los suelos, que puede ser de utilidad en algunos casos.

Los avances en software especializado, específicamente en programas de modelado de elemento finito en tres dimensiones, permiten utilizar la gran cantidad de datos obtenidos de ensayos como el DMT y CPT para realizar diseños por deformaciones con lo que se logran diseños optimizados que se traducen en menores costos de los proyectos. Estos modelos pueden ser generados de forma muy rápida y amigable para el usuario.

Realizar campañas de exploración geotécnica utilizando los ensayos DMT y CPT permite reducir considerablemente los tiempos de ejecución de un estudio geotécnico, esto por cuanto son más rápidos ejecutar que otros ensayos in situ como el SPT o PMT, además de que permiten en muchos casos rescindir de la realización de ensayos de laboratorio, por lo que se podría decir que los resultados se obtiene en “tiempo real”.

En conclusión los ensayos de presión directa (*Direct push*) como el DMT y CPT con todas sus variables, son el futuro de la investigación geotécnica, tal y como lo han apuntado gran cantidad de autores alrededor del mundo. Por esta razón se requiere que se planteen líneas de investigación enfocadas en general una base de datos de resultados obtenidos con el uso de estos equipos con el fin de promover y sustentar su uso a nivel local. Es recomendable que se promueva el uso y estudio de estos equipos, esto podría ser a través de las universidades y en especial por entidades como la Asociación Costarricense de Geotecnia, que podría incentivar su uso al normar su uso en un futuro Código Geotécnico.

## REFERENCIAS

- Briaud, J. (1992). *The Pressuremeter*. Estados Unidos: CRC Press.
- Das, B. (2008). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. Distrito Federal, México: Thomson Learning.
- Failmezger, R. &. (2008). *Which In-situ Test Should I Use? - A Designer's Guide*. Ohio, Estados Unidos: Ohio River Valley Soils Seminar 39.
- Failmezger, R. &. (2011). *Site Investigation to Quantify the Risk*. Estados Unidos: ASCE.
- Gonzalez de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Education.
- ISSMGE, Technical Committee 16. (1998). *Pressuremeter Testing in Onshore Ground Investigations*. Francia.
- ISSMGE, Technical Committee 16. (2001). *The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations*. Bali, Indonesia.
- Kamei, T. &. (1995). *Evaluation of Undrained Shear Strength of Cohesive Soils Using the Flat Dilatometer*. Tokio, Japón: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Kulhawy, F. &. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Nueva York, Estados Unidos: Hollister Hall.
- Marchetti, S. (2009). *Discussion of "CPT-DMT Correlations by P.K. Robertson"*. Roma, Italia.
- Ramdane, B. e. (2013). *Interpretation of Pressuremeter Test in Cohesive Soils*. Túnez: Conferencia Internacional de Ingeniería Geotécnica.
- Robertson, P. &. (2014). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. California, Estados Unidos: Gregg Drilling.
- Robertson, P. (2009). *CPT-DMT Correlations*. Estados Unidos: Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE.
- Robertson, P. (2009). *Interpretation of Cone Penetration Test - A Unified Approach*. Canadá: NRC Research Press.

Robertson, P. K. (1986). *Seismic CPT to Measure In-situ Shear Velocity*. Estados Unidos: ASCE Journal.

Schnaid, F. (2009). *In-Situ Testing in Geomechanics - The Main Test*. Londres, Inglaterra: Taylor & Francis.

Wong, J. e. (1993). *Comparison Between Dilatometer and Other in-situ and Laboratory Test in Malaysian Alluvial Clay*. Singapur: Eleventh Southeast Asian Geotechnical Conference.