

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**Métodos de investigación geotécnica para la caracterización
mecánica de un suelo arenoso**

**Trabajo de investigación para la obtención del grado académico de BACHILLER
EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORES:

Ricardo Henry Poma Balbin

Yeshira Paytan López

Álvaro Gustavo Oré Espinoza

Diana Serrano Huaman

Rosario Ccansaya Maldonado

ASESOR:

Guillermo José Zavala Rosell

Lima, julio, 2020

Resumen

Caracterizar y comprender el comportamiento de un suelo resulta muy complejo debido a sus características heterogéneas y anisotrópicas. Por ello, se plantean modelos constitutivos para representar este comportamiento a base de parámetros mecánicos de resistencia y elasticidad. Cuanto más importante sea el proyecto, más datos confiables necesitará; es decir, mayor número de parámetros. En el caso de suelos granulares, resulta más compleja la obtención de parámetros confiables debido a la dificultad de obtener muestras inalteradas o poco alteradas para realizar ensayos triaxiales. Esta investigación busca plantear métodos alternativos para este propósito y evaluar en qué casos deberá ser importante realizar ensayos triaxiales en arenas. Los parámetros que se utilizarán son aquellos empleados en el modelo básico constitutivo Mohr Coulomb: ángulo de fricción, ángulo de dilatación, módulo de Young y relación de poisson. Para determinar estos parámetros, la investigación se enfocó en los ensayos CPTu, DMT, PMT, Down-Hole y el ensayo triaxial CD. Si bien estos ensayos in situ logran determinar los parámetros de resistencia y elásticos para suelos arenosos, siempre deben estar acompañados de pruebas en las que se obtengan muestras como el ensayo SPT o perforaciones. Finalmente, para proyectos de edificación, el empleo de estos ensayos dependerá de los alcances y del tipo de cimentación a emplear. En este caso, la cimentación será superficial y no va a ser necesario obtener parámetros muy detallados; sin embargo, si el proyecto requiriera de cimentaciones profundas por problemas en el suelo arenoso como la licuefacción, sería importante determinar los parámetros mecánicos con los métodos anteriormente planteados debido a su mayor confiabilidad.

Índice

Resumen	i
Índice	ii
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	v
Capítulo 1 GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación	2
1.3. Alcance	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1 Objetivos generales	3
1.4.2 Objetivos específicos	3
1.5. Metodología	4
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO	5
2.1. Principales parámetros en suelos granulares	5
2.2. Modelos numéricos del comportamiento del suelo aplicado en arenas	7
2.3. Métodos de obtención de parámetros en suelos arenosos	9
Capítulo 3 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS MECÁNICOS EN SUELOS ARENOSOS	17
3.1. Cone Penetration Test con medición de presión de poros (CPTu)	17
3.1.1. Parámetros de resistencia obtenidos con el CPTu:	18

3.1.2. Parámetros de deformación obtenidos con el CPTu.....	20
3.2. Dilatometer Test (DMT).....	22
3.2.1. Parámetros de resistencia obtenidos del ensayo DMT	23
3.2.2. Parámetros de deformación obtenidos del Ensayo DMT	24
3.3. Menard Pressuremeter (PMT)	24
3.3.1. Parámetros de resistencia obtenidos del ensayo PMT:.....	25
3.3.2. Parámetros de deformación obtenidos del Ensayo PMT	26
3.4. Down –Hole Seismic Test (DST).....	27
3.4.1. Parámetros de deformación obtenidos del Ensayo DST	27
3.5. Ensayo Triaxial consolidado drenado (CD)	28
3.5.1. Parámetros de resistencia obtenidos del Ensayo Triaxial CD	28
3.5.2. Parámetros de deformación obtenidos del Ensayo Triaxial CD.....	30
Capítulo 4 APLICABILIDAD EN PROYECTOS DE EDIFICACIONES EDUCATIVAS	32
4.1. Variabilidad de los ensayos	32
4.2. Análisis comparativo entre los métodos estudiados	34
4.3. Aplicación en institución educativas	35
Capítulo 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
REFERENCIAS	41

Índice de figuras

Figura 2.1. Dependencia del ángulo de fricción en suelos granulares y la densidad relativa-gradación.....	6
Figura 2.2. Dependencia del ángulo de fricción en suelos granulares y la densidad relativa-peso específico.....	6
Figura 2.3. Representación del ángulo de dilatación.....	7
Figura 2.4. Recomendaciones de modelos según el tipo de suelo y tipo de análisis.....	8
Figura 2.5. Tipos de ensayos in-situ.....	10
Figura 2.6. Aplicaciones generales de los ensayos in-situ.....	11
Figura 3.1. Esquema de dimensiones de un ensayo CPTu.....	18
Figura 3.2. Gráfica para determinar el módulo de elasticidad para arenas.....	20
Figura 3.3. Presión vs Incremento de volumen.....	24
Figura 3.4. Diagrama de Mohr Coulomb para pruebas triaxiales drenadas.....	28
Figura 3.5. Gráfica esfuerzo –deformación.....	29
Figura 3.6. Esquema de la determinación de la relación de poisson.....	30

Índice de tablas

Tabla 2.1. Ventajas y limitaciones del Modelo Mohr	9
Tabla 2.2. Ventajas y limitaciones del ensayo CPTu.....	12
Tabla 2.3. Ventajas y limitaciones del ensayo DMT.....	13
Tabla 2.4. Ventajas y limitaciones del ensayo PMT.....	14
Tabla 2.5. Ventajas y limitaciones del ensayo DHS.....	15
Tabla 2.6. Ventajas y limitaciones del ensayo Triaxial CD.....	16
Tabla 3.1. Relación entre compacidad, resistencia en punta y ángulo de fricción en un CPTu.....	19
Tabla 3.2. Valores de α para suelos arenosos.....	26
Tabla 4.1. Resumen de error promedio de ensayos in situ.....	32
Tabla 4.2. Resumen de error promedio de ensayos in situ.....	32
Tabla 4.3. Análisis comparativo de costo, variabilidad, rapidez de ejecución del ensayo y parámetros.....	33
Tabla 4.4. Aplicabilidad de los ensayos en los diferentes proyectos de ingeniería.....	33

Capítulo 1

GENERALIDADES

1.1. Introducción

Las arenas son suelos que poseen estructuras naturales con características tales que, para fines prácticos, impiden ser muestreados en forma inalterada para su posterior estudio en laboratorio. En la actualidad, existe una gran variedad de ensayos para determinar las propiedades geotécnicas de los depósitos arenosos. En el caso del Perú, el ensayo de campo más utilizado es el Ensayo de Penetración Estándar (SPT), esto es debido a su bajo costo y la facilidad de uso en comparación a otros ensayos in situ; sin embargo, existen algunos ensayos que son más precisos en determinar los parámetros geotécnicos y que han sido extensivamente utilizados, lo cual los hace muy confiables, como por ejemplo el Dilatómetro (DMT), el Piezocono (CPTu) y el Presiómetro de Menard (PMT), entre otros.

Los resultados obtenidos con distintos ensayos in-situ y laboratorio siempre presentarán alguna variabilidad en la obtención de las propiedades que dependerá de diversos factores. Por ejemplo, el grado de alteración que produzca el método sobre el terreno, la manipulación de las muestras; y la capacidad y variabilidad del equipo para medir una propiedad en el terreno. (Ulloa, 2015)

Así mismo, desde principios de la década de 1970, debido al avance de la electrónica, empezaron a utilizarse pruebas geofísicas, principalmente de tipo sísmico, para estudiar los suelos. Uno de los primeros métodos geofísicos utilizados fue el de refracción sísmica. En la década de 1980, se incorporó el uso de análisis de ondas de superficie al campo de la caracterización de los suelos.

La calidad de un diseño geotécnico está ligada a la correcta caracterización y determinación de las propiedades geotécnicas del suelo presente en campo. En muchas ocasiones se emplean métodos de exploración geotécnica con gran variabilidad e incertidumbre, lo que deriva a un sobredimensionamiento, ya que se debe optar por un diseño conservador. (Ulloa, 2015)

La obtención de parámetros mecánicos necesarios para el diseño en un suelo arenoso puede ser muy compleja; por ello, en el presente informe se describirán 5 métodos de obtención de dichos parámetros. Estos se basarán en tres métodos en campo, un método de geofísica sísmica invasiva y un método de laboratorio, de los cuales se discutirá la aplicabilidad en proyectos de edificaciones educativas.

1.2. Justificación

Para proyectos de ingeniería civil, es importante conocer las características físico - mecánicas del suelo donde se cimentará la infraestructura para luego realizar el diseño correspondiente. La metodología más confiable y directa involucra a los ensayos de laboratorio realizados en muestras inalteradas obtenidas de las exploraciones de campo. En el caso de suelos granulares, obtener muestras inalteradas resulta inviable para proyectos de edificación debido a su complejidad y elevado costo. Es por ello que se han propuesto los métodos alternativos basados en los ensayos in situ. El ensayo más común utilizado en el Perú es el ensayo in-situ de penetración estándar (SPT). Sin embargo, en los últimos años, se han propuesto diferentes metodologías y ensayos alternativos para la obtención de los parámetros mecánicos del suelo.

1.3. Alcance

El presente trabajo de investigación busca proponer algunos ensayos in situ, geofísico sísmico y de laboratorio para la obtención de parámetros mecánicos de un suelo arenoso necesarios para el diseño geotécnico. Se mencionarán los procedimientos de realización de estos ensayos, su aplicabilidad y limitaciones de cada uno. Además, se mostrarán las fórmulas y correlaciones para obtener los parámetros del suelo y, finalmente, se discutirán los resultados finales.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivos generales

El objetivo general de este estudio es analizar y obtener parámetros mecánicos necesarios para comprender el comportamiento de un suelo arenoso y realizar el diseño de cimentaciones correspondiente, a través de la investigación de distintos ensayos ya sea in situ, geofísicos o laboratorio.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar los principales parámetros mecánicos de un suelo arenoso para proyectos de edificación
2. Mencionar los diferentes modelos para el análisis del comportamiento de un suelo arenoso
3. Analizar los ensayos in situ, de laboratorio y geofísicos que se pueden usar para la obtención de los parámetros requeridos
4. Evaluar la aplicabilidad de los ensayos planteados a proyectos de edificación educativas

1.5. Metodología

A continuación, se procederá a presentar la metodología utilizada en la investigación mediante un listado de actividades:

ACT 1. Evaluación de los parámetros mecánicos

Para esta actividad, se mencionarán las principales características de un suelo arenoso y se definirán los parámetros mecánicos básicos para comprender su comportamiento. Además, se explicará sobre los modelos constitutivos que se usan en suelos arenosos para comprender su comportamiento y su posterior diseño.

ACT 2. Evaluación de los métodos alternativos para la obtención de parámetros

Escogidos los parámetros, se describen los ensayos CPTu, DMT, PMT, Down Hole y ensayo Triaxial, mostrando las normativas que emplean cada uno en sus procedimientos y materiales. Además, se mencionan las restricciones que presentan cada ensayo. Y, por último, se mostrarán los parámetros que se pueden obtener de cada uno.

ACT 3. Obtención de parámetros mecánicos

De igual forma, para la tercera actividad, se describirán las fórmulas, correcciones y correlaciones necesarias para caracterizar mecánicamente al suelo.

ACT 4. Aplicabilidad para edificaciones educativas

En esta actividad, se compara la aplicación de cada ensayo y los parámetros para el diseño de cimentaciones de una edificación educativa.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se mencionan los parámetros del suelo que definen su comportamiento mecánico, además de los principales modelos constitutivos para modelar este comportamiento. También, se exponen los diferentes tipos de investigación geotécnica que se puede realizar en suelos granulares para caracterizar al suelo y, finalmente, se presenta la definición de cada uno de estos métodos y los principales ensayos en cada uno.

2.1. Principales parámetros en suelos granulares

A lo largo de los años, se han planteado métodos para representar el comportamiento mecánico de los suelos modelando la resistencia mecánica y la deformación bajo cargas aplicadas. Según Mitchell y Soga (2005), la resistencia al corte del suelo es el aspecto más importante para representar su resistencia ya que depende de diversos factores como la relación de vacíos, la composición del suelo, la historia de esfuerzos, la temperatura, la tensión, la velocidad de deformación y la estructura. Sin embargo, muchos de estos factores no disponen de una función que los defina; por ello, el método más usado para determinar la resistencia al corte es la ecuación de Mohr Coulomb ya que, para suelos granulares, lo simplifica a una función que depende del ángulo de fricción que es un parámetro importante para definir el comportamiento de un suelo.

El ángulo de fricción es una representación matemática del efecto físico de rozamiento o fricción que existe entre las partículas del suelo. Cabe destacar que todos los suelos poseen fricción; sin embargo, en el caso de suelos granulares sostiene mayor importancia para evaluar su comportamiento ya que depende de una gran cantidad de factores como el tipo de mineral de las partículas, tamaño, forma y distribución de los granos, microestructura de las partículas, densidad, permeabilidad, presión de confinamiento y la presión de pre consolidación (Yang y Luo, 2017). En la Figura 2.1 y 2.2, se muestran algunas dependencias relevantes del ángulo de fricción.

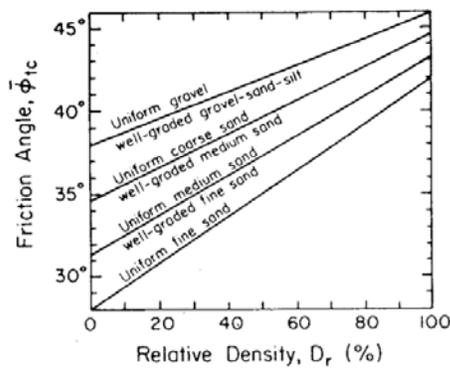


Figura 2.1. Dependencia del ángulo de fricción en suelos granulares y la densidad relativa-gradación (Schertmann, 1978)

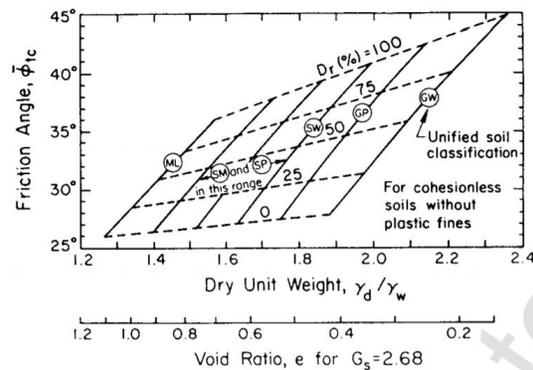


Figura 2.2. Dependencia del ángulo de fricción en suelos granulares y la densidad relativa -peso específico (NAVFAC, 1982)

Además de la fricción, Taylor (1948) menciona que el cambio volumétrico de un suelo afecta sustancialmente su resistencia. Este cambio se conoce como dilatación y controla la deformación volumétrica plástica que desarrolla. De acuerdo a Hernández y Flores (2016), la dilatación es importante para suelos granulares debido a su influencia en el comportamiento esfuerzo – deformación y su dependencia de la compacidad relativa y confinamiento del suelo. Este fenómeno es representado por el ángulo de dilatación (Figura 2.3), el cual se forma cuando una arena densa es sometida al corte y se produce un aumento de volumen. El encaje de estas partículas reagrupadas se le conoce como ángulo de dilatación. Por lo tanto, se afirma que las arenas sueltas no tendrán dilatación y las arenas densas tendrán una dilatación que varía entre 0 y el ángulo de fricción efectivo. Además, la resistencia total del suelo dependerá de ambos parámetros: ángulo de fricción y ángulo de dilatación (Pestana, 2018)

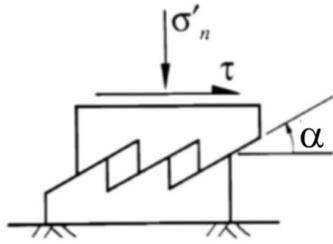


Figura 2.3. Representación del ángulo de dilatación (Houlsby, 1991)

2.2. Modelos numéricos del comportamiento del suelo aplicado en arenas

Para modelar el comportamiento de un suelo existen diferentes metodologías, de las cuales su uso varía de acuerdo al tipo de proyecto y la confiabilidad que requieran en sus resultados. Los principales métodos son el modelo lineal elástico, el modelo elasto-plástico Mohr Coulomb y el modelo elasto-plástico Hardening Soil. El primero es el modelo básico más sencillo que asume una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación del suelo en función del módulo de Young (Ley de Hooke). El modelo de Mohr Coulomb es el modelo aproximado de primer orden del comportamiento no lineal del suelo. Finalmente, el modelo Hardening soil es la aproximación de segundo orden que conforma una variante del modelo elasto-plástico perfecto y lo asume como un modelo hiperbólico. Hardening soil es un modelo más avanzado que permite evaluar el comportamiento de una gran variedad de suelos tanto como cohesivos y granulares.

De acuerdo a Obrzud (2010), el empleo de uno u otro método dependerá del tipo de análisis que requiera un proyecto y del tipo de suelo a evaluar. Para un análisis estático limite; es decir, el cálculo de la capacidad de carga y la estabilidad del suelo se recomienda el uso de modelos típicos como el Modelo lineal elástico básico y el Modelo Mohr-Coulomb. Por el contrario, para realizar análisis de deformaciones para pilotes, excavaciones en túneles, excavaciones profundas y problemas de consolidación se recomienda modelos más avanzados como el Modelo No-Linear y el Modelo Hardening Soil. La Figura 2.4 muestra un cuadro resumen del método utilizado con respecto al tipo de suelo:

Selected soil models implemented in Z_Soil	Type of analysis	SANDS	SILTS		CLAYS		
			Dilatant, Low compressible	Non-dilatant, Compressible	Degree of Overconsolidation ← High Stiff clays Low Normal, Soft clays →		
Mohr-Coulomb (Drucker-Prager)	SLS						
	ULS	■	■		■		
CAP	SLS	■	■	■	■	■	■
	ULS	■	■	■	■	■	■
Modified Cam-Clay	SLS			■			■
	ULS			■			■
HS-Standard HS-Small Strain	SLS	■ HS-Small Strain			■ HS-Std		
	ULS	■ HS-Small Strain			■ HS-Std		

Figura 2.4. Recomendaciones de modelos según el tipo de suelo y tipo de análisis (Obrzurd, 2010)

Como se puede observar el Modelo Mohr Coulomb es un método adecuado y simple para suelos arenosos en proyectos que requieran los análisis básicos del comportamiento mecánico del suelo ya que facilita los cálculos por la dependencia de pocos parámetros a comparación de otros modelos. Por ejemplo, el Modelo Hardering soil depende de 11 parámetros para su evaluación.

- Modelo elasto-plástico Mohr Coulomb

De acuerdo a Robert (2017), este modelo puede representar la respuesta de suelos granulares bajo cargas monotónicas haciendo uso de propiedades básicas como la fricción y dilatación del suelo. Además, se debe tener en cuenta que no simula el comportamiento elastoplástico progresivo que sufre el suelo. El modelo se basa en 5 parámetros para su evaluación como la cohesión, el ángulo de fricción, el ángulo de dilatación, el módulo de Young y la relación de poisson. Pestana (2018) menciona que el método presenta limitaciones en su aplicación como se observa en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Ventajas y limitaciones del Modelo Mohr Coulomb

Ventajas	Limitaciones
Primera aproximación del comportamiento del suelo	No hay una dependencia esfuerzo - rigidez
Análisis simple elasto-plástico con 5 parámetros	Comportamiento lineal elástico antes de la falla
Adecuada para algunas aplicaciones geotécnicas	No se mitiga la dilatación
Buena representación para comportamiento de falla en condiciones drenadas	No modela un comportamiento anisotrópico
	Comportamiento no drenado no siempre es realista
	No hay una dependencia del tiempo (creep)

Nieto, Camacho y Ruiz (2009) mencionan que el Modelo Mohr-Coulomb es el método más utilizado en geotecnia, a pesar de sus limitaciones en simular correctamente las variaciones de rigidez del suelo.

2.3. Métodos de obtención de parámetros en suelos arenosos

De acuerdo con Pestana (2018), los parámetros pueden ser calculados en base a los siguientes métodos:

- Correlaciones con medidas índice como la densidad relativa (D_r), relación de vacíos, entre otros
- Correlaciones con ensayos in-situ como SPT, DMT, CPT, entre otros
- Ensayos de laboratorio como pruebas triaxiales y edométricas

En primera instancia, para el cálculo de los parámetros, como el ángulo de fricción, se recurre a las pruebas triaxiales debido a que es uno de los métodos más confiables y directos (Salas, 2011). Sin embargo, en el caso de suelos granulares se presentan diversas restricciones al momento de realizar este tipo de ensayos debido a la complejidad y el costo de obtener muestras inalteradas adecuadas para su ejecución; por lo tanto, se suele realizar ensayos in-situ (Norma técnica de suelos y cimentaciones, 2018).

Los ensayos in situ son pruebas ejecutadas en campo que proporcionan una gran cantidad de información del suelo ya sea directamente o por medio de correlaciones y nos facilitan la obtención de los parámetros mecánicos del suelo (Mayne, 2012). Los ensayos in situ, más utilizados son el SPT, CPT, DMT, PMT y el ensayo de veleta como se muestra en la figura 2.5. La investigación tiene como objetivo evaluar métodos alternativos para calcular los parámetros del suelo por lo que no se incluirá el ensayo SPT por ser el más conocido y usado en el Perú. Por lo tanto, la investigación se enfocará en los ensayos in-situ CPT, DMT y PMT por ser métodos permitidos en suelos arenosos. Además, se incluirá al ensayo sísmico Down-Hole por ser uno de los métodos más empleados para el cálculo de parámetros de elasticidad del suelo (Look,2007). Finalmente, se mencionará la prueba triaxial drenada para el cálculo del ángulo de dilatancia, ángulo de fricción y módulos elásticos.

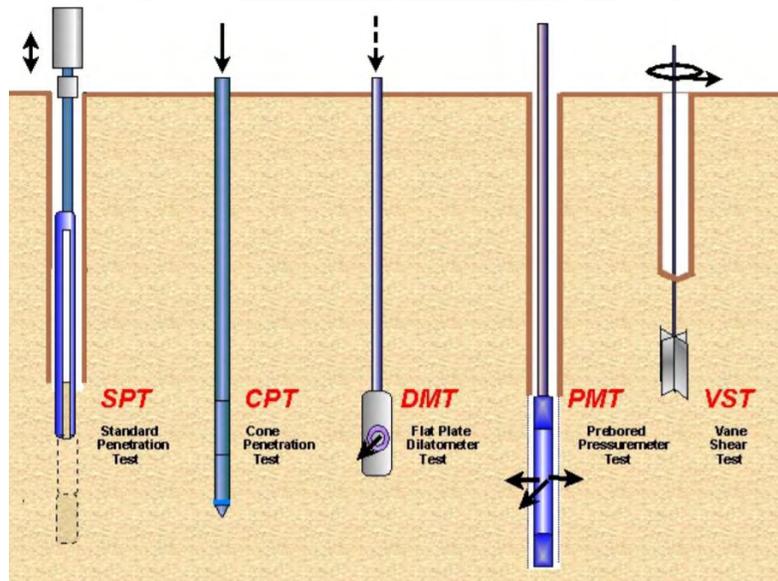


Figura 2.5 Tipos de ensayos in-situ (Mayne, 2012)

Look (2007) presenta una correlación entre los parámetros que podemos obtener de cada ensayo y su aplicabilidad como se muestra en la figura 2.6.

Test	Area of ground interest												
	Soil identification	Establish vertical profile	Relative density D_r	Angle of friction ϕ	Undrained shear strength S_u	Pore pressure u	Stress history OCR and K_0	Modulus: E_s, G'	Compressibility m_v and C_c	Consolidation c_h and c_v	Permeability k	Stress-strain curve	Liquefaction resistance
Acoustic probe	C	B	B	C	C		C	C					C
Borehole permeability	C					A				B	A		
Cone													
Dynamic	C	A	B	C	C		C						C
Electrical friction	B	A	B	C	B		C	B	C				B
Electrical piezocone	A	A	B	B	B	A	A	B	B	A	B	B	A
Mechanical	B	A	B	C	B		C	B	C				B
Seismic down hole	C	C	C					A				B	B
Dilatometer (DMT)	B	A	B	C	B		B	B	C			C	B
Hydraulic fracture						B	B		C	C			
Nuclear density tests			A	B				C					
Plate load tests	C	C	B	B	C		B	A	B	C	C	B	B
Pressure meter menard	B	B	C	B	B		C	B	B			C	C
Self-boring pressure	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A
Screw plate	C	C	B	C	B		B	A	B	C	C	B	B
Seismic down-hole	C	C	C					A				B	B
Seismic refraction	C	C						B					B
Shear vane	B	C			A		B						
Standard penetration test (SPT)	B	B	B	C	C				C				A

Figura 2.6. Aplicaciones generales de los ensayos in-situ (Bowles,1996)

- Cone Penetration Test con medición de presión de poros (CPTu)

El Cone Penetration Test con medición de presión de poroso (CPTu), también conocido como piezocono se encuentra estandarizado por la norma ASTM D5778. Este ensayo es usado particularmente para arcillas blandas, sedimentos suaves y depósitos de arena fina y media. El ensayo consiste en la introducción continua, mediante presión hidráulica, de un cono de dimensiones normalizadas, el cual registra la resistencia puntual (q_c), la resistencia a la fricción (f_s) y la presión de poros (u). Eslami (2019), menciona que las principales aplicaciones del ensayo son: la caracterización de terrenos, control de mejoramiento, monitoreo de presas y la obtención de parámetros resistencia en cimentaciones superficiales y profundas. Para el caso particular de arenas, el ensayo de piezocono se encuentra limitado

para suelos uniformes de grano fino, debido a que de emplearse en suelos densos se pueden generar pandeos a lo largo del varillaje que afectarían a la obtención de los parámetros. Por otro lado, Ameratunga, Sivakugan & Das (2016) mencionan las ventajas y limitaciones de emplear este ensayo, las mismas que son mencionadas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Ventajas y limitaciones del ensayo CPTu (Ameratunga, Sivakugan & Das ,2016)

Ventajas	Limitaciones
Se producen registros continuos	No se obtienen muestras
Obtención de un registro detallado de la estratigrafía	Dificultar para penetrar suelos muy denso o materiales duros
Se elimina la influencia del operador, debido a que el registro es inmediato	Se requiere calibración con otras pruebas para obtener parámetros de esfuerzos y deformaciones
Se obtienen resultados confiables y repetibles	Instrumentación relativamente costosa
Se elimina las posibles perturbaciones del suelo ya que no requiere una perforación	No apto para materiales con partículas grandes o que pueda obstruir la penetración. Los resultados son más confiables en suelos uniformes, de grano fino

- Dilatometer Test (DMT)

El Dilatometer Test (prueba dilatométrica), también conocido como ensayo de paleta se encuentra estandarizado por la norma ASTM D6635. Este ensayo se puede emplear en suelos granulares o cohesivos, de poco a muy denso y de blando a muy duro, pudiendo tener complicaciones en estos últimos. Consiste en la introducción por medio de hincado de la paleta del dilatómetro, la cual se infla realizando mediciones de presión y deformación. Las lecturas medidas corresponderán a la lectura A, necesaria para empezar a desplazar la membrana y la presión B, necesaria para empujar el centro de la membrana un tramo de 1.1 mm fuera de la posición inicial.

Entre las principales aplicaciones del dilatómetro se encuentran: la obtención de parámetros geotécnicos (pertenecientes a deformaciones medianas), control de compactaciones, evaluación de licuefacción, determinación de asentamientos en cimentaciones superficiales y evaluación de cargas laterales en pilotes (Burlo, Frikha & Monaco, 2016). Por otro lado,

entre las ventajas y limitaciones de emplear este ensayo se encuentran las mostradas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Ventajas y limitaciones del ensayo DMT

Ventajas	Limitaciones
No requiere de un sondaje previo	No se obtienen muestras
Se obtienen resultados de esfuerzo y deformación del suelo	Diferentes métodos de interpretación suelen dar distintos resultados
Los resultados son repetibles e independiente del operador	Las pruebas toman más tiempo y son menos continuas que el ensayo CPTu
Proporciona una historia de tensiones en el suelo, lo que permite una mejor caracterización del sitio	Los esfuerzos aplicados son limitados durante la prueba, por lo que los resultados no son recomendados para condiciones de gran esfuerzo
El equipo empleado es portable	

- Menard Pressuremeter (PMT)

La prueba presiométrica (PMT), también conocido como presiómetro de Menard se encuentra estandarizado por la norma ASTM D4719. Este ensayo se puede emplear en suelos todo tipo con excepción de rocas muy duras. El ensayo consiste en la medición de presión y variación de volumen de una probeta cilíndrica colocada dentro de una perforación y expandida con gas. De esta forma, se busca monitorear las variaciones de volumen y presión obteniendo una curva histórica de presiones por incremento de volumen.

Según Briaud (2013), entre las principales aplicaciones de este ensayo se encuentran: determinación de parámetros geo mecánicos empleados en modelamiento computacional, diseño de fundaciones superficiales, evaluación de cargas laterales en fundaciones profundas, evaluación de licuefacción, y análisis deflexiones en muros de contención. Por otro lado, entre las principales ventajas y limitaciones se encuentran las mostradas en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Ventajas y limitaciones del ensayo PMT

Ventajas	Limitaciones
La curva de esfuerzo deformación permite obtener más de una propiedad ingenieril	El equipo presenta un grado de sofisticación, por lo que se requiere personal calificado para operarlo
Se puede determinar el esfuerzo horizontal del suelo	Se recomienda que los resultados sean correlacionados con otros ensayos
Los ciclos de carga y descarga permiten mitigar las perturbaciones producidas por realizar el empleo de una perforación	Los efectos de esfuerzos y alivio sobre las paredes de la excavación deben ser considerados para calibrar el ensayo
Se obtienen correlaciones confiables para determinar propiedades ingenieriles y aplicaciones de diseño	La prueba toma mucho tiempo y el registro no se obtiene de forma continua como en el ensayo CPTu
El presiometro puede ser colocado adecuadamente evitando perturbaciones del terreno	Por lo general diferentes métodos de interpretación del ensayo, generan diferentes resultados
	No se obtienen muestras
	Requiere de perforación

- Down-Hole Seismic Testing (DST)

El ensayo sísmico Down-Hole es un tipo de prueba sísmica invasiva realizada a través de pozos que se encuentra estandarizado por la ASTM D7400. Este método esta permitido para todo tipo de suelos y consiste en el registro de ondas de compresión (P) y corte (S) de la generación de ondas sísmicas superficiales producidas por el martilleo de una placa ubicada de 1.5 a 3 metros del pozo donde se encuentra un geofono receptor que realiza las mediciones. Los parametros dinámicos del suelo que se pueden obtener son los siguientes: el modulo de young, constante Lamé, Modulo Bulk, el modulo de corte y la relación de poisson. Todos estos coeficientes y modulos pueden ser calculados a partir de formulas en función a V_p , V_s y p . Si bien el Cross-Hole seismic test es considerado el método más preciso para determinar las propiedades del material de roca y suelo, el DST es mucho más económico y permite determinar los mismos parametros con resultados similares.(Jung, Sim, Park y Park, 2012)

Según Vergniault y Mari (2018), el método es empleado cuando se requiere modelar la respuesta del suelo para el diseño sísmico de estructuras, el cual requiere de datos más confiables. Además, Gupta (2013) menciona que el método se suele aplicar para resolver problemas geotécnicos como el análisis de suelo estático y dinámico, diseño de base de pilotes y bases para cargas vibratorias, evaluación de licuefacción y la evaluación de la mejora del suelo por voladura. La tabla 2.5 muestra algunas ventajas y limitaciones del ensayo.

Tabla 2.5. Ventajas y limitaciones del ensayo Down-Hole Seismic Test

Ventajas	Desventajas
Método recomendado para obtener ondas de corte	Requiere de una mayor precisión para determinar ondas sísmicas
Permite el reconocimiento de capas delgadas	Se debe considerar un método de sostenimiento para el pozo
Evalúa las posibles zonas de falla	Las lecturas pueden sufrir distorsiones por presencia de fluidos en el sondeo
Permite visualizar la forma de la onda a tiempo real	La calidad de la señal obtenida depende del impulso al generar la onda

- Prueba ensayo triaxial drenado (CD)

El ensayo de consolidación drenada es una variante del ensayo triaxial que se encuentra estandarizado por la ASTM D-2850. El método se emplea generalmente en suelos granulares (arenas) y con restricciones en suelos finos. La prueba triaxial consiste en someter una probeta cilíndrica con una presión hidrostática a condiciones drenadas hasta que ocurra la consolidación completa. Cuando se haya reestablecido el equilibrio estático, se producirán esfuerzos efectivos sobre el suelo, que será llevado hasta la falla por la aplicación de una carga axial. Durante el ensayo se medirán las deformaciones correspondientes para obtener la curva de esfuerzo- deformación. Este proceso se repite para tres probetas y de esta forma dibujar el círculo de Mohr y obtener los parámetros ángulo de fricción, ángulo de dilatación, módulo de elasticidad y relación de Poisson. Para realizar este tipo de prueba se necesitan muestras inalteradas, las cuales son difíciles de obtener en suelos granulares debido a los cambios que sufre la estructura del material (Ladd, 1978). Por ello, es esencial reconstruir las

muestras mediante procesos de compactación controlando la densidad relativa del material con el objetivo de simular las condiciones del terreno en el laboratorio (Camacho, 2014). De acuerdo con Polito (1999), el apisonamiento es un método usual para ensayos triaxiales debido a que mediante esta técnica se obtiene el grado de compactación requerido. El método consiste en la colocación del suelo en capas, las cuales van siendo compactadas por medio de un apisonador.

Este ensayo se aplica para determinar la carga a largo plazo en terraplén construido muy lentamente en capas sobre un depósito de arcilla blanda, presas de tierra con filtración constante, fundación sobre arcilla mucho tiempo después construcción. De acuerdo a Lade (2016), las principales ventajas y limitaciones de un ensayo triaxial consolidado drenado se encuentran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Ventajas y limitaciones del ensayo Triaxial drenado (CD)

Ventajas	Limitaciones
Mide el cambio volumetrico	Existe una concentración de estrés debido a la fricción entre la placa y la muestra
La succión puede ser controlada en suelos parcialmente saturados	No proporcionan los datos necesarios para caracterizar el suelo anisotrópico
Permite el cálculo de módulos a través de las deformaciones medidas	Solo puede simular condiciones axisimétricas a la muestra

Capítulo 3

OBTENCIÓN DE PARÁMETROS

MECÁNICOS EN SUELOS ARENOSOS

En este capítulo se proponen ecuaciones y correlaciones para el cálculo de parámetros como el ángulo de fricción, ángulo de dilatación, módulo de Young y relación de poisson para cada ensayo visto en el capítulo anterior.

3.1. Cone Penetration Test con medición de presión de poros (CPTu)

Los parámetros geotécnicos no se obtienen directamente de los datos medidos por el ensayo, sino de los valores corregidos por resistencia en la punta y presión de poros. Por tal motivo, se presentan las correcciones empleadas y necesarias para la obtención de los futuros parámetros de suelos granulares.

- Resistencia corregida q_t : se define como:

$$q_t = q_c + u_2 (1 - a_n) \quad (1)$$

Donde:

q_t : resistencia corregida

q_c : resistencia en la punta

u_2 : presión de poros medida al terminar la punta

a_n : cociente de área neta (A_n/A_s)

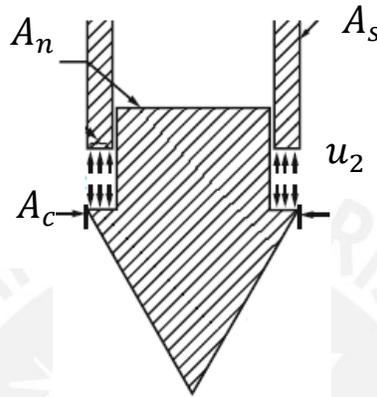


Figura 3.1. Esquema de dimensiones de un ensayo CPTu (Sfriso, 2019)

- Ratio de presión de poros B_q : se define como:

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_n - \sigma_{V0}} \quad (2)$$

Donde:

u_0 : presión de poros en equilibrio, debido al nivel de napa freática

- Esfuerzo efectivo σ'_{V0} : definido como:

$$\sigma'_{V0} = \sigma_{V0} - u_0 \quad (3)$$

Existen otras correlaciones, pero no serán de interés para calcular los parámetros mecánicas del suelo arenoso.

3.1.1. Parámetros de resistencia obtenidos con el CPTu:

Ángulo de fricción: El ensayo de piezocono permite determinar el ángulo de fricción drenado del suelo en base a correlaciones de parámetros corregidos. De esta manera, a continuación, se muestran las principales correlaciones existentes, mostrando estas en orden

cronológico. Es preciso resaltar que la mayoría de estas fueron calibradas considerando arenas limpias.

- Relaciones propuestas por Meyerhoff (1956): Entre las primeras aproximaciones para determinar el ángulo de fricción en suelos granulares en base al ensayo de piezocono se encuentra la propuesta por Meyerhoff. Este autor presenta una tabla, relacionando el estado del suelo y la resistencia medida en la punta del ensayo.

Tabla 3.1. Relación entre compacidad, resistencia en punta y ángulo de fricción en un CPTu (Meyerhoff, 1956)

Compacidad	q_c (Mpa)	Angulo de fricción aproximado
Muy suelto	< 2	< 30
Suelto	2 – 4	30 -35
Medianamente denso	4 – 12	35 – 40
Denso	12 – 20	40 – 45
Muy denso	> 20	> 45

- Ecuación de Robertson & Campanella (1983): fue propuesta para determinar el ángulo de fricción en arenas de cuarzo no cementadas y moderadamente comprensibles, en base a pruebas realizadas en cámaras de calibración. Los resultados fueron corroborados en el 2012 por los mismos autores.

$$\tan \phi' = \arctan\left[0.38 \log\left(\frac{q_c}{\sigma'_{v0}}\right) + 0.1\right] \quad (4)$$

- Kulhawy & Mayne (1990): presenta una alternativa más apropiada a la fórmula descritas líneas arriba:

$$\phi' = 17.6 + 11.01 \log(q_{t1}) \quad (5)$$

Donde:

$$q_{t1} = \frac{(q_t/p_{atm})}{(\sigma'_{v0}/p_{atm})^{0.5}} \quad (6)$$

p_{atm} : presión atmosférica medida de kPa

- Ecuación de Mayne & Capanella (2005): sugieren la siguiente ecuación para suelos que no sean arenas finas.

$$\phi' = 29.5B_q^{0.121} [0.256 + 0.336B_q + \log\left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}\right)] \quad (7)$$

Esta ecuación es aplicable para $20^\circ < \phi' < 45^\circ$ y $0.1 < B_q < 1$, donde si $B_q < 0.1$, la ecuación será preferible para arenas limpias

- Ecuación de Uziell (2013): presenta resultados similares a la ecuación de Mayne & Capanella.

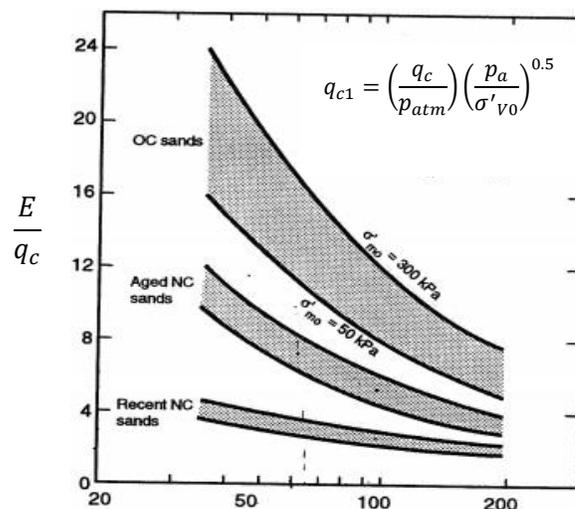
$$\phi' = 25 \left[\frac{\left(\frac{q_t}{p_{atm}}\right)}{(\sigma'_{v0}/p_{atm})^{0.5}} \right]^{0.10} \quad (8)$$

3.1.2. Parámetros de deformación obtenidos con el CPTu

Módulo de Elasticidad E:

Por lo general pruebas de carga lateral permiten obtener buenos resultados de módulos de elasticidad con la desventaja de representar altos costos de inversión los cuales pueden no ser permitidos en etapas tempranas de estudio de un terreno. Debido a esto, se pueden emplear relaciones empíricas para evaluar el módulo de elasticidad aproximado del suelo en etapas de pre diseño.

- Gráfica de Bellotti (1981): aplicable a esfuerzos axiales menores a 0.1%, el autor propuso emplear la siguiente gráfica.



$$q_{c1} \text{ (kPa)}$$

Figura 3.2. Gráfica para determinar el módulo de elasticidad para arenas (Belloti, 1981)

- Ecuación Verbruge (1981): en base a pruebas de campo realizadas en Francia, Holanda, Portugal y Sudáfrica, para valores de q_c mayores a 400 kN/m^2 se muestra la ecuación de Verbruge con buenos resultados para predecir el comportamiento de asentamientos en pilotes.

$$E = 2.2 q_c + 3600 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (9)$$

Módulo de Corte G:

Evaluar el módulo de corte en base a ensayos CPTu, no se considera una práctica recomendable para el diseño a detalle de una estructura. Sin embargo, para el rango de deformaciones de 0.001% , se pueden emplear algunas correlaciones empíricas para describir aproximadamente el comportamiento del suelo.

- Ecuación de Lunne (1997): En base a los reportes realizados por Stokes (1992) y comparándolo con ensayos calibrados en cámaras, se propuso la relación para arenas de cuarzo no cementadas.

$$\left(\frac{G_0}{q_c}\right)_{prom} = 1634 \left(\frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{v0}}}\right)^{-0.75} \quad (10)$$

- Ecuación de Robertson & Cabal (2014): relación propuesta para arenas de sílice no cementada, siendo advertida por los autores que emplear la relación en otro tipo de suelos puede conllevar a errores considerables.

$$G_0 = b(q_t \sigma'_{v0} p_{atm})^{0.3} \quad (11)$$

Donde b es una constante que va entre 110 y 280. Valores altos reflejan la posibilidad de cementación del suelo.

Se menciona también que existe una variación de este ensayo conocida como cono sísmico (SCPTu) la cual puede medir las ondas de corte por medio de sensores integrados en la punta del cono y, de esta forma, obtener parámetros confiables del módulo de corte G .

Relación de poisson ν :

Considerando que las arenas poseen un comportamiento isotrópico y los desplazamientos se mantienen en el rango elástico se puede emplear la siguiente ecuación para determinar el coeficiente de poisson:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (12)$$

3.2. Dilatometer Test (DMT)

Al igual que en el ensayo CPTu, se requieren corregir los parámetros obtenidos del ensayo. Por lo general se emplean las correcciones de presiones propuestas por Marchetti (1980):

- Presiones p_0 y p_1 :

$$p_0 = A + \Delta A \quad (13)$$

$$p_1 = B - \Delta B \quad (14)$$

Donde ΔA y ΔB son calibraciones de presión realizadas a las presiones medidas del ensayo

ΔA : presión externa a la cual está sometida inicialmente la membrana

ΔB : presión interna necesaria para superar la rigidez de la membrana

Por otro lado, se muestran parámetros intermedios empleados para determinar las propiedades mecánicas del suelo. Estos son obtenidos en base a las presiones corregidas.

- Módulo dilatométrico E_D :

$$E_D = \alpha(p_1 - p_0) \quad (15)$$

α : igual a 34.7 para una membrana de dilatómetro de 60 mm

- Índice de esfuerzo horizontal K_D :

$$K_D = \frac{(p_0 - u_0)}{\sigma'_{v0}} \quad (16)$$

- Índice de material I_D :

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (17)$$

3.2.1. Parámetros de resistencia obtenidos del ensayo DMT

Ángulo de fricción: Para determinar el índice de esfuerzo por lo general es necesario solo determinar el índice de esfuerzo horizontal K_D . Sin embargo, en la última década se empezó a introducir el empleo del termino I_D para tal fin.

- **Ecuación de Marchetti (1997):** esta ecuación suele considerarse para marcar un límite inferior con respecto al ángulo de fricción. Por lo general suele tener un error entre 2° y 4° .

$$\phi' = 28 + 14.6 \log K_D - 2.1 (\log K_D)^2 \quad (18)$$

- **Ecuación de Capanella y Robertson (1991):** una aproximación más certera es la ecuación más certera para arenas es la siguiente:

$$\phi' = 37.3 \left(\frac{K_D - 0.8}{K_D + 0.8} \right)^{0.47} \quad (19)$$

- **Ecuación de Ricceri (2002):** esta ecuación permite obtener buenos resultados cuando se trabaja con suelos tipo SP y SM

$$\phi' = 31 + \frac{K_D}{0.236 + 0.066 K_D} \quad (20)$$

- **Ecuación de Mayne (2015):** la ecuación anterior fue modificada por Mayne obteniendo el siguiente valor.

$$\phi' = 37.3 \left(\frac{K_D - 0.8}{K_D + 0.8} \right)^{0.082} \quad (21)$$

- **Ecuación de Tigliani (2015):** por su parte Tigliani propuso la siguiente relación en base a ensayos realizados en campos de prueba Italia para depósitos aluviales de arena.

$$\phi' = 17 + 11 (I_D K_D)^{0.32} \quad (22)$$

Si $I_D \geq 1.2$ y $K_D \leq 7$

3.2.2. Parámetros de deformación obtenidos del Ensayo DMT

Módulo de Young E:

El ensayo dilatómetro permite obtener buenas aproximaciones para determinar el módulo de elasticidad. Sin embargo, es necesario conocer previamente el coeficiente de poisson.

$$E = (1 - \nu^2)E_D \quad (23)$$

Esta fórmula puede ser empleada para ν de 0 a 0.3

3.3. Menard Pressuremeter (PMT)

Los valores empleados para la obtención de los parámetros mecánicos en arenas pueden obtenerse directamente de la gráfica de presión vs incremento de volumen que se muestra a continuación.

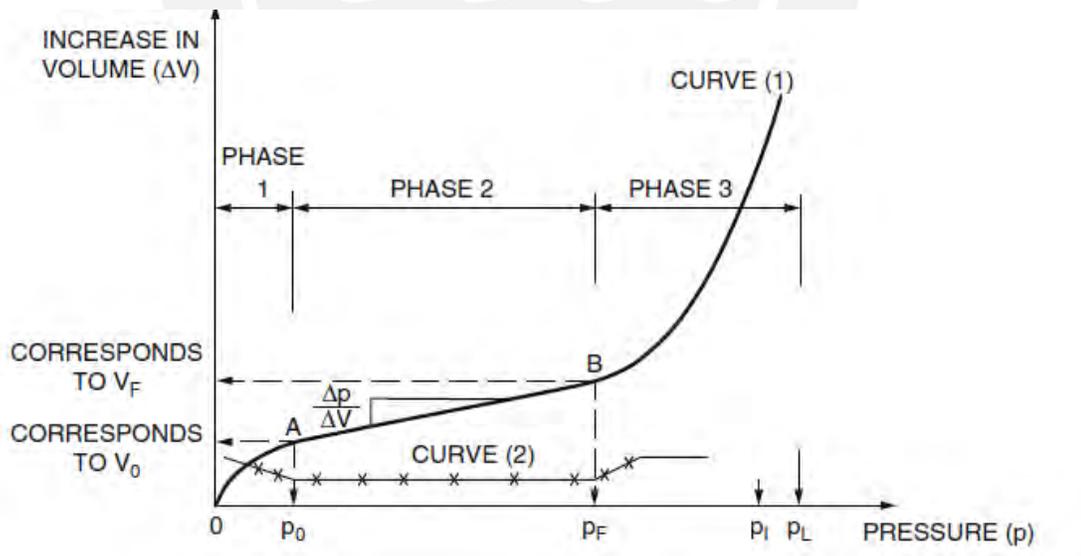


Figura 3.3. Presión vs Incremento de volumen

Donde:

p_0 : presión en la que el aparato adopta el volumen de la perforación

p_F : presión a la cual no se consiguen grandes ΔV con poca Δp (presión creep)
 p_L : presión para la cual ocurre una deformación infinita
 p_l : presión en la que el volumen inicial es el doble
 V_C : volumen de la membrana sin deformar
 V_0 : volumen al cual el aparato adopta la forma de la perforación
 V_F : volumen correspondiente a p_F
 V_m : volumen medio entre V_0 y V_F
 $\Delta p/\Delta V$: pendiente entre (p_0, V_0) y (p_F, V_F)

Además, se suele emplear el módulo de Menard E_M , el cual se define como:

$$E_M = 2.66 V_M \Delta p / \Delta V \quad (24)$$

3.3.1. Parámetros de resistencia obtenidos del ensayo PMT:

Ángulo de fricción:

- Ecuación de Menard (1957): la corrección original fue propuesta por Menard para arenas secas y húmedas fue:

$$\phi' = 24 + 13.3 \log\left(\frac{p_l}{100b}\right) \quad (25)$$

Donde p_L está expresado en kPa, $b = 1.8$ para arenas húmedas y 3.5 para arenas secas, con un valor promedio recomendado de 2.5 .

- Ecuación Van Wembeke (1978): la ecuación original fue modificada obteniendo la siguiente expresión:

$$\phi' = 18.7 + 13.3 \log(p_l - p_0) + b' \quad (26)$$

Donde $b' = 2$ para suelos húmedos y $b' = -2$ para suelos secos

Con el avance de las investigaciones se pudieron obtener correlaciones para suelos arenosos dilatados y no dilatados

- Ecuación de Combarieu (1986): la ecuación presenta permite obtener buenas aproximaciones para suelos no dilatados

Para suelos dilatados Combarieu (1986b) sugiere:

$$\phi' = 18.7 + 13.3 \log(p_l - p_0) + b' \quad (28)$$

3.3.2. Parámetros de deformación obtenidos del Ensayo PMT

Módulo de Young E:

Se mide en base al módulo edométrico obtenido del ensayo y con la constante α mostrada en la tabla 3.2 que dependerá de la consolidación del suelo.

$$E_m = 2.66(V_c + V_m) \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (29)$$

Tabla 3.2. Valores de α para suelos arenosos (Baguelin, 1978)

$$\phi' = \arcsin\left[\frac{\log(p_L/p_0)}{\log\left(\frac{\pi}{2} [E_M/p_L]\right)}\right] \quad (27)$$

Arenas	E_M/p_l	α
Sobre consolidadas	> 14	1/2
Normalmente consolidadas	8 – 14	1/2
Erosionadas	-	1/3

Finalmente, el módulo de Young se puede calcular como:

$$E = E_m^{1/\alpha} \quad (30)$$

Módulo de Corte G:

El módulo de corte se puede determinar en el rango lineal elástico, bajo la teoría de expansión de cavidad y deformaciones pequeñas como:

$$G = \frac{\Delta p}{\Delta V} \times V_0 \quad (31)$$

Relación de Poisson:

Puede determinarse como:

$$v = \frac{E}{2G} - 1 \quad (32)$$

3.4. Down –Hole Seismic Test (DST)

Como se mencionó en el capítulo anterior el ensayo sísmico Down Hole es un método invasivo comúnmente aplicado para determinar parámetros dinámicos, dentro de los cuales se encuentran el módulo de Young y relación de poisson.

3.4.1. Parámetros de deformación obtenidos del Ensayo DST

Bourbié (1986) propone las siguientes ecuaciones para el cálculo de parámetros elásticos en función a la velocidad de ondas de corte tipo P (V_p), Ondas de corte tipo S (V_s) y la densidad de masa del suelo (ρ)

Módulo de Young E:

$$E_{dmax} (Pa) = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (33)$$

Relación de Poisson:

$$v = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)} \quad (34)$$

Gupta, S. (2013) presenta una fórmula que relaciona ambos parámetros, el módulo de Young y la relación de poisson:

$$E = \rho Vp^2 \frac{(1 + u)(1 - 2u)}{1 - u} \quad (35)$$

Donde:

ρ : Densidad de masa del suelo (y/g)

Vp : Velocidad de ondas p

u : relación de poisson

3.5. Ensayo Triaxial consolidado drenado (CD)

3.5.1. Parámetros de resistencia obtenidos del Ensayo Triaxial CD

Ángulo de fricción:

Para calcular el ángulo de fricción se utiliza la formula planteado por Coulomb (1976)

$$\tau = c + \sigma \times \tan(\emptyset) \quad (36)$$

Donde:

τ : Máximo esfuerzo cortante

σ : Esfuerzo normal en la zona de falla

\emptyset : ángulo de fricción

En la figura 3.4 se muestra el diagrama de Mohr Coulomb para suelos granulares, en el que se muestra un valor de cohesión muy cercano a cero interceptando al origen del gráfico.

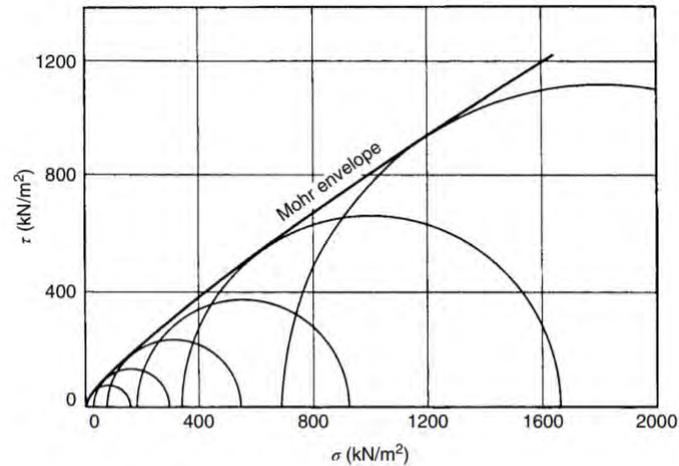


Figura 3.4. Diagrama de Mohr Coulomb para pruebas triaxiales drenadas (Lade, 2016)

Ángulo de dilatancia

Budhu (2002) menciona que el ángulo de dilatancia es la diferencia entre el ángulo de fricción pico (ϕ_p) y el ángulo de fricción para grandes deformaciones (ϕ_{cs}). Se presenta las siguientes fórmulas para el cálculo del ángulo de dilatancia en dos condiciones de suelos granulares.

- Para suelos granulares sueltos a medianamente densos, el ángulo de dilatancia se pueda aproximar a 0° .
- Para suelos granulares densos, se puede aproximar a tres veces el índice de dilatancia (IR)

$$IR = Dr(Q - \ln p') - R \quad (37)$$

Donde:

$p' = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$: Esfuerzo octaédrico efectivo en el pico

Dr : Compacidad relativa

Q y R : Constantes que dependen del tipo de suelo

Para arena Silivri, Turquía: $Q=9$, $R=1.1$ (Cinicioglu y Abadkon, 2015)

3.5.2. Parámetros de deformación obtenidos del Ensayo Triaxial CD

Módulo de Young E:

El módulo Young puede ser determinado mediante el diagrama de esfuerzo – deformación mostrado en la figura 3.5 utilizando la siguiente formula.

$$E = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\varepsilon_1} \quad (38)$$

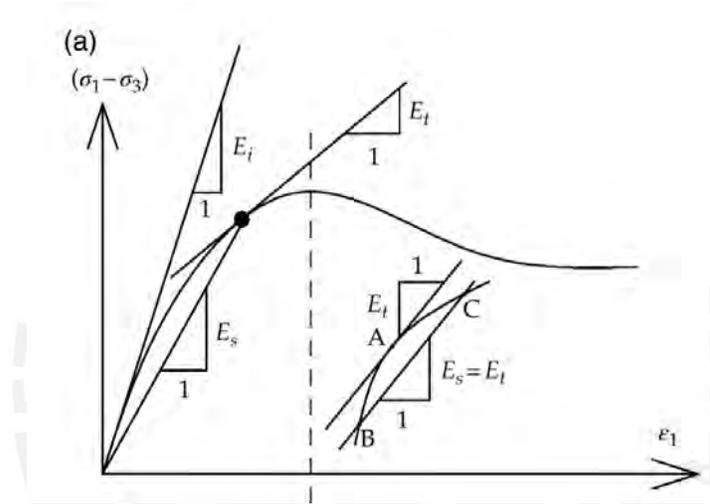


Figura 3.5. Gráfica esfuerzo –deformación (Lade, 2016)

Relación de Poisson:

La relación de poisson es un parametro adimensional que puede ser determiando con la siguiente formula.

$$v = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\varepsilon_1} \right) \quad (39)$$

Donde $\frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\varepsilon_1}$ representa la pendiente de la curva deformación volumétrica como se puede observar en el siguiente gráfico:

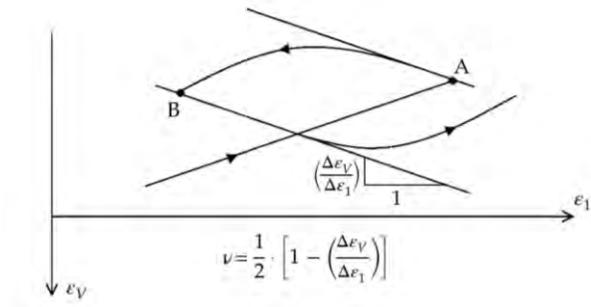


Figura 3.6. Esquema de la determinación de la relación de poisson (Lade, 2016)



Capítulo 4

APLICABILIDAD EN PROYECTOS DE EDIFICACIONES EDUCATIVAS

4.1. Variabilidad de los ensayos

En el Perú, el ensayo más empleado para la obtención de los parámetros mecánicos de un suelo arenoso es el ensayo SPT. Sin embargo, este ensayo presenta una alta variabilidad con respecto a los parámetros obtenidos. Es así que cuando se desea obtener parámetros que caractericen de una forma más confiable el terreno, se procede a emplear métodos, que suelen más precisos y costosos, pero que son justificados debido a la importancia del proyecto.

La obtención de los parámetros mecánicas de un suelo arenoso está fuertemente ligada a la variabilidad de aplicación de los ensayos empleados. Esta puede ser medida con el coeficiente de variabilidad (COV), el cual se obtiene de dividir la media de valores entre la desviación estándar. De esta forma este coeficiente muestra la dispersión de los resultados obtenidos, siendo que un método con bajo COV, permite representar de mejor manera el suelo estudiado. La tabla 4.1, presenta un resumen del COV de los datos medidos para suelos arenosos con los ensayos estudiados.

Tabla 4.1. Resumen de error promedio de ensayos in situ (Phoon & Kulhawy, 1999)

Tipo de Ensayo	Parámetro	COV
SPT	N	54
CPTu	Qc	45
DMT	A	33
DMT	B	37
DMT	ED	50
DMT	ID	53
DMT	KD	44
PMT	PL	40
PMT	EM	42
Triaxial	Phi	14

Se aprecia que el ensayo triaxial permite obtener los resultados más confiables, seguido del ensayo DMT, posteriormente el ensayo PMT, el ensayo CPTu y finalmente el ensayo SPT. Sin embargo, debido a lo complejo y a lo poco probable que resulta obtener una muestra que represente el estado natural del suelo, no se suelen emplear los ensayos triaxiales para caracterizar los suelos arenosos.

Por otro lado, midiendo la variabilidad solo en términos de ensayos de campo se puede apreciar que esta tendencia se mantiene. Los resultados se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Resumen de error promedio de ensayos in situ (Phoon & Kulhawy, 1999)

Ensayo	COV equipo	COV operador	COV aleatorio	COV total	COV rango
SPT	5 - 75	5 - 75	12 - 15	14 - 100	15 - 45
CPTu	3	5	5 - 10	7 - 12	5 - 15
DMT	5	5	8	11	5 - 15
PMT	5	12	10	16	10 - 20

Se aprecia que la tendencia del orden de variabilidad se sigue manteniendo. Evidenciando que el método CPTu posee el menor COV en equipo y un COV total en rangos similares al método DMT. El ensayo PMT posee mayor variabilidad en operador lo que incrementa el COV total en sus resultados.

4.2. Análisis comparativo entre los métodos estudiados

Se resalta que todos los ensayos descritos en la presente investigación caracterizan mejor mecánicamente el suelo que el ensayo SPT. Por un lado, algunos permiten obtener los parámetros de resistencia y otros son más enfocados a obtener los parámetros de deformación. En la tabla 4.3 se resume todo lo escrito anteriormente, mostrando un cuadro comparativo con respecto al costo, variabilidad y la obtención de parámetros de los ensayos mencionados.

Tabla 4.3. Análisis comparativo de costo, variabilidad, rapidez de ejecución del ensayo y parámetros

ENSAYO	COSTO RELATIVO		VARIABILIDAD ENSAYO		RAPIDEZ DE EJECUCIÓN IN-SITU		PARÁMETROS		
	Medio	Elevado	Media	Poca	Lento	Medio	Rápido	Resistencia	Deformación
CPTu	x			x			x	A	A
DMT		x		x		x		A	NA
PMT		x	x		x			A	A
DownHole		x		x				NA	A
Triaxial CD		x		x				A	A

Nota: A: Aplicable, NA: No aplicable

Además, se muestra la siguiente tabla resumen sobre la aplicabilidad en proyectos y las observaciones principales en cada ensayo.

Tabla 4.4. Aplicabilidad de los ensayos en los diferentes proyectos de ingeniería

ENSAYOS	PROYECTOS						OBSERVACIONES
	Fundaciones	Mejoramiento de suelos	Problemas de licuefacción	Presas	Muros de contención	Terraplenes o taludes	
CPTu	S,P	A		A			No aplicable en arenas densas
DMT	S,P		A				No recomendado para condiciones de gran esfuerzo como presas
PMT	P		A		A		Permite obtener información del comportamiento esfuerzo - deformación
Down Hole	P		A				Método recomendado para obtener parámetros dinámicos
Triaxial CD	NA					A	No aplicado en fundaciones por la complejidad y costo elevado del ensayo en arenas

Nota: A: Aplicable, NA: No aplicable, S: Superficial, P: Profunda

4.3. Aplicación en institución educativas

El MINEDU en cuanto al diseño para construcción de instituciones educativas, las clasifica como: nivel inicial, nivel primario – secundario, colegios de alto rendimiento (COAR) e instituciones superiores (universidades). Este tipo de infraestructura sigue los criterios generales de diseño presentados en la Norma técnica de infraestructura educativa NTIE 001-2017. Las restricciones geotécnicas y recomendaciones se presentan en el artículo 9 “El terreno y su entorno” de la norma.

- Los locales educativos no podrán ubicarse en terrenos pantanosos, rellenos sanitarios o zonas de alto riesgo de deslizamiento
- Nivel freático mínimo de 1.0 m de profundidad y preferente de 1.5 m, en épocas de incremento de la capa freática
- Se recomienda que el cimiento deberá ser estable, de grano grueso, seco, compacto y con buena capacidad portante
- Se sugiere que el suelo no tenga arenas o gravas no consolidadas

Con respecto a requerimientos de la edificación de los ambientes de aulas, laboratorios y SUM en el nivel primaria, la edificación deberá tener hasta 2 niveles y en el nivel secundaria, la edificación deberá tener hasta 3 niveles.

Normalmente, una institución educativa deberá cimentarse sobre un suelo adecuado y el número de pisos no representará un problema de cargas por lo que se utilizan cimientos superficiales que, con respecto a la tabla 4.3 podrían ser empleados los ensayos de CPTu y DMT para la obtención de parámetros del suelo. Sin embargo, cabe resaltar que deben estar acompañados de ensayos que permitan la recolección de muestras como el ensayo SPT o algún método de perforación. Por tal motivo, en el Perú se suele emplear solo este último ensayo debido a su bajo costo y facilidad de obtener una gran cantidad de correlaciones de parámetros a pesar de que estos tengan un gran grado de variabilidad. Si el suelo presenta problemas de capacidad portante y licuefacción, será necesario plantear otro tipo de cimentaciones ya sea cimientos superficiales con mejoramiento de suelo para problemas intermedios o cimentaciones profundas para problemas críticos. Para el diseño de estos, los ensayos mencionados adquieren mayor importancia.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Para evaluar la resistencia al corte de un suelo arenoso sobre el cual se construirá una edificación es suficiente emplear el modelo constitutivo elastoplástico perfecto de Mohr-Coulumb. Este modelo, para el caso de suelos granulares, simplifica el comportamiento del suelo en los siguientes parámetros: ángulo de fricción, ángulo de dilatación, módulo de Young y módulo de poisson. La obtención de estos puede determinarse por medio de ensayos de laboratorio y de campo, siendo estos últimos los más empleados debido a su facilidad de ejecución. Es debido a esto que en el Perú comúnmente se suele emplear el método SPT para caracterizar mecánicamente el suelo, pero como se mencionó a lo largo de la tesis, el empleo de este suele conllevar demasiada incertidumbre en su ejecución. Esto trae como consecuencia un sobredimensionamiento de las estructuras. Por consiguiente, resulta conveniente difundir el empleo de ensayos CPTu, DMT y PMT, debido a que estos ensayos permiten caracterizar de mejor forma el suelo y optimizar el diseño de las cimentaciones.

- En caso de modelar comportamientos más complejos tales como diseño de túneles, deformación de pilotes, excavaciones profundas y problemas de consolidación, los modelos constitutivos más recomendables de emplear son el No Linear y el Hardening Soil. La dificultad de estos radica en la complejidad de obtención de los parámetros. Es así que se requieren por lo menos 11 parámetros para evaluar el comportamiento del suelo, varios de los cuales requieren maquinaria que no se suele encontrar en el país. Debido a esto, el tiempo y la inversión económica requerida para caracterizar el suelo, no compensan su empleo en edificaciones.
- De los ensayos mencionados se puede concluir que caracterizan mejor mecánicamente al suelo que el ensayo SPT. Por un lado, algunos permiten obtener parámetros de resistencia y otros son más enfocados a obtener los parámetros de deformación. Sin embargo, cabe destacar que con un solo ensayo no es posible realizar una buena caracterización del suelo, por lo cual para una exploración geotécnica adecuada en suelos arenosos se deberá realizar la combinación entre ensayos que recojan muestras y otros con los cuales se obtengan parámetros confiables.

De cada uno de los ensayos investigados se puede concluir lo siguiente:

- El ensayo CPTu presenta la mayor rapidez de ejecución, la cual, sumada a su continuidad de exploración, lo convierte en el método más útil cuando se desean evaluar grandes extensiones de terreno. Como se mostró en los cuadros de confiabilidad, es el ensayo que presenta mayor variabilidad con respecto a los demás. Sin embargo, se considera lo suficientemente confiable para obras no tan exigentes o como diseño preliminar para obras de gran exigencia. Por lo general, el ángulo de fricción medido presenta mejores resultados para suelos sueltos y no cementados, por lo que no es recomendado para arenas muy densas. Con respecto al módulo de elasticidad, los ensayos fueron calibrados principalmente para ser empleados en fórmulas de mejoramiento de suelos y diseño de pilotes, por lo que no son tan confiables para cimentaciones superficiales. Sin embargo, para solucionar este

inconveniente, se puede recurrir a la variación de este ensayo conocida como cono sísmico (SCPTu). Con este método se pueden obtener parámetros confiables del módulo de corte G en base a mediciones de ondas de corte por medio de sensores integrados en el equipo.

- El ensayo DMT presenta la menor variabilidad con respecto a los ensayos propuestos y, esto sumado a que los tiempos de ejecución no suelen ser largos, convierte al ensayo en una buena opción para caracterizar terrenos de pequeños a muy extensos. Además, implica un ahorro considerable en obras pequeñas, debido a la facilidad de transportar el equipo y a que la ejecución de esta no requiere perforación, factor que suele encarecer los estudios de mecánica de suelo. Por otro lado, posee resultados confiables para caracterizar el ángulo de fricción en cimentaciones superficiales y de poca exigencia. Sin embargo, se pueden tener problemas para caracterizar terrenos sometidos a grandes deformaciones, comunes en reservorios o presas, debido a que los esfuerzos son limitados durante la ejecución de la prueba.
- El ensayo PMT permite obtener información completa de la curva de comportamiento esfuerzo deformación del suelo, aquello que no se puede realizar con los otros ensayos de campo. Además, permite obtener el ángulo de fricción y deformaciones del suelo con factibilidad.
- El ensayo Triaxial permite obtener el ángulo de fricción con menor COV respecto a los demás ensayos. Sin embargo, debido a la dificultad que implica el tener que remoldear la muestra para su ejecución y que el muestreo es puntual, no se suele emplear en proyectos de edificaciones. De esta forma su empleo está más enfocado al diseño de terraplenes, taludes, entre otros.
- El ensayo Down-Hole puede ser empleado para determinar los parámetros de resistencia del suelo y se caracteriza por ser el mejor ensayo, de los estudiados, para caracterizar los parámetros de deformación del suelo, permitiendo obtener resultados que representan eficientemente el comportamiento elástico. Resulta muy costoso de

ejecutar, siendo este costo no justificado para edificaciones comunes. Sin embargo, el precio es justificado cuando se requiere realizar análisis de diseños sísmicos, diseño de bases de pilotes, cimientos sobre máquinas vibratorias y evaluación de estructuras importantes frente a procesos de licuefacción. Cabe resaltar que, si el método in situ empleado en el proyecto es el CPTu, se podría utilizar el ensayo de cono sísmico o SCPTu con el cual se puede realizar ensayos downhole por un mínimo costo adicional.

Del empleo de los métodos descritos en la ejecución de la caracterización de un suelo sobre el cual se construirá una institución educativa se puede comentar lo siguiente:

- Con respecto a la construcción de institución educativa se puede comentar que se suelen buscar suelos estables para construir estos. Para el caso particular de arenas, los cimientos deberán estar ubicados sobre material compacto y con buena capacidad portante, de esta forma, usualmente, no será necesario emplear métodos de mejoramiento ni recurrir a cimentaciones profundas. Por otro lado, la cantidad de niveles de una institución educativa, por lo general 3, no implica la necesidad de realizar exploraciones profundas. De esta forma, pueden ser empleados los ensayos de CPTu y DMT para la obtención de parámetros del suelo. Sin embargo, estos deben estar acompañados de ensayos que permitan la recolección de muestras como el ensayo SPT o de algún método de perforación. Por otro lado, para suelos en los que se requiera mejoramiento, presenten problemas de licuefacción o requieran el empleo de cimentaciones profundas, el empleo de métodos como el PMT.

Recomendaciones para la investigación:

- Para futuras investigaciones resultaría enriquecedor evaluar el comportamiento de los suelos empleando los modelos constitutivos No Lineales.

- Evaluar la variabilidad de los ensayos mediante la ejecución de un proyecto. De esta forma se comprobaría la variación de los parámetros de resistencia y deformabilidad obtenidos con los distintos ensayos mostrados.
- Estudiar el empleo de los métodos mostrados en un proyecto que requiera mejoramiento de suelo o cimentación profunda.



REFERENCIAS

- Amatetunga, B., Sivakunga & Das (2016). *Correlations of Soils and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. New Delhi, India: Springer
- Aponte J. (2011). Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia
- Atala, C. (2011). Estudio experimental sobre correlaciones en suelos granulares finos (arenas) compactados usando equipos de penetración. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima
- Baguelin, F., Je'zeque'l, J. & Shileds, D. (1978). The pressuremeter and foundation engineering. Trans Tech Publications, Clausthal.
- Bellotti, R. (1989). Shear strength of sand from CPT. *In: Proceedings, 12th international conference on soil mechanics and foundation engineering*. Rio de Janeiro. Balkema Pub., Rotterdam, vol 1, pp 179–184.
- Briaud, J, (2013). “The pressuremeter test: Expanding its use”. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris.
- Burlon, S. Frikha, W & Monaco, P. (2016). Session Report: Pressuremeter and Dilatometer. Proc. 5th Int. Conf. On Geotechnical and Geophysical Site Characterization. ISC 5, Gold Coast, Australia.
- Camacho-Tauta, J. F., Molina Gómez, F. A., Reyes Ortiz, O. J. (2014). Preparación de especímenes de arena para ensayos triaxiales mediante un método controlado de compactación. *Rev. Cient. Gen. José María Córdova*, 12(14). 185-196.
- Campanella, R. & Robertson, P. (1991) “Use and interpretation of a research dilatometer”, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 28, no. 1, pp. 113–126.
- Eslami, A. (2019). *Piezocone and Cone Penetration Test (CPTu and CPT) Applications in Foundation Engineering*. London, UK: Butterworth-Heinemann
- Combarieu, O. (1996) “*A propos de la détermination de l’angle de frottement des sols pulvérulents au pressiomètre*”, *Revue Française de Géotechnique*, vol. 77, pp. 51–57, 1996.
- Combarieu, O. (1996b). “Estimation rapide de l’angle de frottement d’un sol granulaire au pressiomètre”, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, NIT 4017, no. 203, pp. 121–123
- GeoMod Consulting. (2010). On the use of the Hardening Soil Small Strain model in geotechnical practice. Recuperado de <http://www.geomod.ch/pdf/zsday-hard.pdf>

- Gupta, S. (2013). Crosshole/ Downhole Seismic Test. *Workshop cum Demo Session of Cengr Geotechnics Pvt Ltd.*
- Hernandez B. y Flores C. (noviembre del 2016). Determinación del ángulo de dilatación, esfuerzos picos y residuales en jales parcialmente saturados. En *XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. Llevado a cabo en *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. A.C, México*
- Jung, J.-S., Sim, Y., Park, J.-B., & Park, Y.-B. (2012). A Comparative Study on Borehole Seismic Test Methods for Site Classification. *LHI Journal of Land, Housing, and Urban Affairs*, 3(4), 389–397
- Kulhawy, F. & Mayne, P. (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design, Report EPRI EL6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto.
- Lade, P. (2016). *Triaxial Testing of Soils*. Oxford, UK: John Wiley & Sons
- Look, B. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*, London, UK: Taylor & Francis Group
- Lunne, T. & Robertson, P. (1997) *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic & Professional/Chapman-Hall Publishers, London, 312 p.
- Marchetti, S. (1980). In situ tests by flat dilatometer. *J Geotech Eng Div ASCE* 106(GT3):299–321.
- Marchetti, S. (1997). “The flat dilatometer: design applications”, *Proceedings, 3rd International Geotechnical Engineering Conference*, pp. 421–448, Soil Mechanics and Foundations Research Laboratory, Cairo University.
- Mari, J. & Vergnault, C. (2018). *Well Seismic Surveying and Acoustic Logging*, Les Ulis, Francia: EDP Sciences.
- Mayne, P. & Campanella, R. (2006). “The 2nd James K. Mitchell lecture: undisturbed sand strength from seismic cone tests”, *Geomechanics and Geoengineering*, vol. 1, no. 4, pp. 239–247.
- Mayne, P. (2015). “Peak friction angle of undisturbed sands using DMT”, *3rd International Conference on DMT*, no. 20, Rome.
- Menard, L. (1957). “Mesure in situ des propriétés physiques des sols”, *Annales des Ponts et Chaussées*, no. 14, pp. 357–377, Paris.
- Meyerhoff, G. (1956). Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *J Soil Mech Found Div ASCE* 82(SM1):1–19
- Ministerio de Educación (2017). *Norma técnica de infraestructura educativa*. Lima, Perú: El Ministerio.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018). *Norma Técnica E.050 Suelos y cimentaciones*. Lima, Perú: El Ministerio.
- Mitchell, J. y Soga, K. (2005). “Strength and deformation behavior”. En *Fundamentals of soil behavior* (pp. 369 – 410). New Jersey, Estados Unidos: John Willey & Sons

- Nieto, A.; Camacho, J. y Ruiz, E. (2009). Determinación de parámetros para los modelos elasto-plásticos Mohr-Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 75 – 91.
- Phoon, K. & Kulhawy, F. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36 (4), 612–624.
- Ricceri, G., Simonini, P. & Cola, S. (2002). Applicability of piezocone and dilatometer to characterise the soils of the Venice Lagoon. *Geotech Geol Eng* 20(2):89–121.
- Robertson, P. & Campanella, R. (1983). Interpretation of cone penetration tests: part I sands & part II clays, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 20, no. 4, pp. 718–745.
- Robertson, P. & Cabal, K.(2014). Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering, 6th edn. Gregg Drilling & Testing, Inc., Signal Hill, California
- Robert, D. (2017). A Modified Mohr-Coulomb Model to Simulate the Behavior of Pipelines in Unsaturated Soils. *Computers and Geotechnics*, 91, 146-160
- Salas, O. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. *Métodos y materiales*, 1(1), 14-24
- Sfriso, A. (2019). Ensayos de Suelos II [Figura]. Recuperado <https://docplayer.es/2459729-Ensayos-in-situ-ii-64-08-mecanica-de-suelos-fiuba.html>
- Suárez, J. (2009). “Resistencia al cortante”. En *Deslizamientos: Análisis geotécnico* (pp.75-84). Santander, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Togliani, G., Calzolari, L. & Menghini, A. (2015) “Governolo (Italy) experimental site: *in situ* test comparisons and mutual conversions”, *Third Conference on DMT*, no. 88, Rome, 2015.
- Uzielli, M. (2013). “Probabilistic assessment of design strengths for sands from *in-situ* testing data”, *Modern Geotechnical Design Codes of Practice*, vol. 1, IOS Press, Amsterdam.
- Van Wambeke, A. (1978). “Caractéristiques pressiométriques pour le pressiomètre normal – détermination, exploitation”, *Interprétation et utilisation pratique des résultats des essais pressiométriques*, Groupement Belge de Mécanique des Sols, Brussels.
- Verbrugge, J. (1981). “Evaluation du tassement des pieux à partir de l’essai de pénétration statique”, *Revue Française de Géotechnique*, vol. 15, pp. 75–82
- Yang, J. y Luo, XD (2017). *El ángulo de fricción de estado crítico de los materiales granulares: ¿depende de la clasificación?* *Acta Geotechnica*, 13 (3), 535–547.