

**COMPARACIÓN DE ENSAYOS DINAMICOS UTILIZADOS EN MECANICA DE
SUELOS**

Autores

JESUS LEONARDO MORENO MOSCOSO

FABIAN EDUARDO RUEDA GRANDE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTA DE INGENIERÍA FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

**COMPARACIÓN DE ENSAYOS DINAMICOS UTILIZADOS EN MECANICA DE
SUELOS**

Autores

JESUS LEONARDO MORENO MOSCOSO

FABIAN EDUARDO RUEDA GRANDE

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Directora

HEBENLY CELIS LEGUIZAMO

Ingeniera Civil, M. Sc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTA DE INGENIERÍA FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y en particular al cuerpo docente de la Escuela de Ingeniería Civil por la formación académica brindada.

A la profesora Hebenly Celis Leguizamo por la orientación que nos brindó en el proceso para el desarrollo de este proyecto.

A nuestros Familiares y seres queridos por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo de grado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. FUNDAMENTOS DE LA DINÁMICA DE SUELOS	16
1.1. DEFINICIÓN E IMPORTANCIA DE LA DINÁMICA DE SUELOS	17
1-2. PROBLEMAS DE LA DINÁMICA DE SUELOS	18
1.3. PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS.....	21
1.4. CUADRO RESUMEN PROPIEDADES DINAMICAS	22
2. ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DINAMICAS DE LOS SUELOS	23
2.1. PRUEBAS DINÁMICAS DE CAMPO Y LABORATORIO.....	23
2.1.1 Pruebas dinámicas de laboratorio.....	23
2.1.2 Pruebas dinámicas de campo.....	25
2.1.3 Pruebas de alta y Baja deformación	26
2.2. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS.....	28
2.2.1 Ensayo Triaxial Dinámico.....	28
2.2.1.1 Introducción al Ensayo Triaxial Dinámico	28
2.2.2.2 Descripción Del Equipo.....	29
2.2.2.3 Procedimiento Del Ensayo;.....	31
2.2.3 Ensayo de Columna Resonante	35
2.2.3.1 Introducción Ensayo de Columna Resonante	35
2.2.3.2 Descripción del ensayo y del equipo.....	38
2.2.3.3 Procedimiento Del Ensayo.....	39
2.2.4 Ensayo Piezoeléctrico.....	40
2.2.4.1 Introducción Ensayo Piezoeléctrico	40
2.2.4.2 Descripción Del Equipo.....	42
2.2.4.3 Procedimiento Del Ensayo.....	44
2.2.4.4 Análisis Y Cálculo De Datos	45

2.2.5 Ensayo Cross Hole	46
2.2.5.1 Introducción Ensayo Cross Hole	46
2.2.5.2 Descripción Del Equipo.....	47
2.2.5.3 Procedimiento Del Ensayo.....	47
2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ENSAYOS.....	49
3. CUADRO COMPARATIVO DE LOS ENSAYOS DINAMICOS EXPUESTOS....	50
4. CONCLUSIONES	51
5. RECOMENDACIONES.....	52
BIBLIOGRAFÍA.....	56
ANEXO	59

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cuadro resumen propiedades dinámicas.....	22
Tabla 2. Cuadro comparativo de los ensayos	50

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Carretera en Saitama afectada por la licuefacción de suelos	19
Figura 2: Perdida portante del suelo	20
Figura 3: Estudio comparativo de la resistencia dinámica de las arenas	25
Figura 4: Rango de deformación angular de pruebas dinámicas de campo y laboratorio	26
Figura 5: Rango de deformación angular de pruebas dinámicas de campo y laboratorio	27
Figura 6: Actuales equipos triaxiales dinámicos	29
Figura 7: Esquema del equipo Triaxial.....	31
Figura 8: Curva típica Desviador-Deformación vertical de ensayo no drenado	36
Figura 9: Curva módulo de corte-deformación.....	37
Figura 10: Variación del módulo de corte en la arcilla de Todi con pequeñas deformaciones	38
Figura 11: Esquema de la disposición de la instrumentación para el ensayo	39
Figura 12: Elemento piezoeléctrico Bender.	43
Figura 13: Osciloscopio	44
Figura 14: Esquema del procedimiento piezoeléctrico con elementos Bender.	45
Figura 15: Esquema del ensayo CrossHole.....	49

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Cuadro Resumen Propiedades Dinamicas De Los Suelos	59
Anexo B. Ventajas y desventajas de los ensayos	60
Anexo C Cuadro Comparativo De Ensayos Seleccionados	64

RESUMEN

TITULO: COMPARACIÓN DE ENSAYOS DINAMICOS UTILIZADOS EN MECANICA DE SUELOS

AUTORES: JESUS LEONARDO MORENO MOSCOSO
FABIAN EDUARDO RUEDA GRANDE **

PALABRAS CLAVES: Ensayos Dinamicos, Triaxial, Propiedades Dinamicas, Suelos, Piezoelectricidad

DESCRIPCIÓN.

Los sucesos sísmicos y de cualquier índole (explosiones de bombas, operaciones de maquinarias y martillos, operaciones de construcción, hincado de pilotes, explosiones de canteras, tráfico intenso, aterrizaje de aviones, viento, carga debido a la acción de las olas en el agua) que impliquen el daño de las estructuras, están correlacionados con las alteraciones que sufren los suelos ante cargas de características dinámicas o estáticas. La carencia de información referente a las propiedades dinámicas y formas de implementación en los diferentes tipos de suelos, conlleva a analizar los procedimientos que se pueden emplear para mitigar daños en las estructuras. El comportamiento de suelos sometidos dinámicamente constituye un aspecto importante en la ingeniería sísmica y geotécnica, por esta razón se estudió las técnicas más relevantes para el análisis de suelos sometidos a cargas dinámicas, permitiendo realizar un desglose de los principales resultados y los diferentes mecanismos que producen fallas (deslizamientos, asentamientos, licuefacción, entre otros).

Se realizó un cuadro comparativo de los ensayos referentes en el campo ingenieril para un mayor entendimiento de los resultados y propiedades que se obtienen en los ensayos dinámicos y el método más adecuado para cierto tipo de suelos, partiendo de las ventajas, alcance y restricciones al momento de diseñar estructuras civiles.

* Trabajo De Grado

*Faculty of Mechanical Engineering Physicist. School of Civil Engineering Director Hebenly Celis Leguizamo

ABSTRACT

TITLE: COMPARISON OF DYNAMIC TESTS USED IN SOIL MECHANICS

AUTHORS: LEONARDO MORENO JESUS MOSCOSO
FABIAN EDUARDO RUEDA GRANDE**

KEY WORDS: Dynamic Test, Triaxial, Dynamic Properties, Soils, Piezoelectricity

The seismic events and the ones from any kind (bomb blasts, machinery operations and hammers, construction operations, pile driving, blasting, quarrying, heavy traffic, aircraft landing, wind loading due to wave action in the event water) that involve the damage of the structures, are correlated with the alterations that suffered the soil in the face of the load-dynamic or static characteristics. The lack of information related to the dynamic properties and ways of implementation in the different types of soils entail to analyze the procedures that can be used to reduce /mitigate the damages in the structures. The behavior of the soils dynamically subjects constitute an important aspect in the seismological and geotechnical engineering, for this reason it was studied the more relevant techniques to analyze the soils subject to dynamic loads allowing to carry out a breakdown of the main results and the different mechanisms that produce a failure (landslide, settling, liquefaction among others)

A comparative square of the test was done with regard to the engineering field to a better understanding of the results and properties that are obtained in the dynamic test as well as the most appropriate method to certain kind of soils, based on the benefits, scope and constraints when designing civil structures.

* Work Degree

** Facultad Fisicomecanicas, Escuela De Ingeniería Civil. Director Hebelyn Celis Leguizamo

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el anhelo por construir e innovar en el campo civil, ha presentado inconvenientes al momento de evaluar y representar hipotéticamente de qué forma se comportará un suelo cuando sufre variaciones en su forma, debido a cargas externas las cuales pueden ser estáticas o dinámicas.

En la actualidad, con los adelantos que han existido en el campo de la geotecnia, se han empleado diversas formas para el estudio y análisis de un suelo con el fin de prevenir desastres en las construcciones. Sin embargo, debido a la falta de conocimiento al momento de interpretar datos obtenidos mediante el estudio de los suelos han ocurrido fallas en ciertas estructuras.

Existe actualmente una gran variedad de técnicas de campo y laboratorio con diferentes ventajas y limitaciones para determinar las propiedades dinámicas de los suelos, varios están orientados a medidas de bajas deformaciones y otros están enfocados a determinar grandes deformaciones. La selección de técnicas para ensayos dinámicos de suelos requiere cuidado y un conocimiento adecuado para determinar el problema que existe [1].

En vista de la información, metodología y conocimiento que existe en torno a los ensayos dinámicos existentes en el análisis de las propiedades mecánicas de los suelos, es necesario hacer una recopilación sobre este tema. De igual forma es menester mostrar que resultados se pueden obtener en cada uno de los ensayos dinámicos más utilizados, para brindar un comparativo y de esta forma escoger el ensayo más factible al momento de evaluar el comportamiento de un suelo cuando se piense en una construcción.

1- FUNDAMENTOS DE LA DINÁMICA DE SUELOS

El diseño de estructuras civiles requiere el conocimiento de factores como:

- Cargas transmitidas a las estructuras
- Requisitos de construcción
- Comportamiento de esfuerzo- deformación en un suelo
- Condiciones geológicas y geotécnicas del suelo

Los factores más relevantes o de mayor importancia son el de analizar el comportamiento de un suelo en base a esfuerzo- deformación y a las condiciones tanto geológicas como geotécnicas de un suelo ya que tienen que ver con la mecánica de suelos, la cual permite describir el comportamiento del suelo colindante o debajo de una estructura.

Hay que agregarle la importancia que tiene el suelo en la modificación de las características de un posible movimiento sísmico actuante (amplificación dinámica), dicha respuesta está controlada en gran medida por las propiedades dinámicas del suelo, siendo el módulo de corte (G) y el amortiguamiento (ξ) los principales parámetros para modelar la respuesta sísmica del suelo. La dinámica de suelos se encarga del estudio y determinación de dichas propiedades. Probablemente este sea un tema muy señalado por muchos ingenieros civiles pero poco se conoce del rol fundamental que juega en la caracterización del suelo cuando suceden movimientos fuertes, como los provocados por un sismo [2].

En los siguientes apartados de este capítulo se relacionan tópicos referentes a la dinámica de suelos, tales como importancia de la dinámica de suelos, problemáticas en el área de dinámica de suelos y posteriormente un análisis de

los estados de esfuerzos en el suelo, ya sea en estado natural o en la aplicación de una carga de condiciones estáticas o dinámicas.

1.1. DEFINICIÓN E IMPORTANCIA DE LA DINÁMICA DE SUELOS

La Dinámica de Suelos comprende el estudio tanto teórico como experimental del efecto de las fuerzas dinámicas sobre masas de suelo, de igual forma esta área se complementa con otras áreas del conocimiento de la Ingeniería Civil como lo son la Dinámica Estructural, Dinámica del medio continuo y la Ingeniería Sísmica, entre otras.

Dentro de los diferentes comportamientos que el suelo presenta ante cargas o sollicitaciones dinámicas se puede mencionar [3]:

- Pérdida de resistencia o pérdida de la capacidad portante del suelo (licuefacción).
- Cambios de volumen en el suelo (densificación).
- Cambios en el estado de esfuerzos de las masas de suelos.
- Amplificación dinámica y resonancia en suelos blandos

Dentro de los parámetros dinámicos del suelo de singular interés, se encuentran: módulo de rigidez estático (G), módulo de rigidez dinámico (μ), relación de amortiguamiento (ξ), relación de Poisson (ν). La obtención de estos parámetros se hace ya sea en el laboratorio o bien en campo, por medio de procedimientos de ensayos, algunos de los cuales se encuentran documentados en las normas de la Asociación Americana para Pruebas y Materiales ASTM.

1.2. PROBLEMAS DE LA DINÁMICA DE SUELOS

Para considerar que un problema hace parte de la dinámica de suelos se establecen que los procedimientos de análisis y diseño no son apropiados para la solución de un problema.

Habitualmente los problemas que trata la dinámica de suelos tienen que ver con: la estabilidad de un talud, la capacidad de carga de una estructura, el estado natural de masa de un suelo; son análisis que se realizan suponiendo que las cargas que soportan no cambian con el tiempo, o la frecuencia de la carga es tan pequeña que se puede suponer estática, cubriendo variados e importantes temas tales como: [\[4\]](#).

- Determinación de las propiedades dinámicas del suelo.
- Respuesta sísmica de depósitos y estructuras de tierra.
- Licuefacción.
- Prospección del subsuelo mediante el análisis de propagación de ondas de cuerpo y de superficie.
- Fundaciones de máquinas.
- Interacción dinámica suelo-estructura.
- Vibraciones en obras viales.
- Entre otros.

Algunos de los principales problemas que estudia la dinámica de suelo son:

- Determinación de las propiedades dinámicas del suelo

Las propiedades más comunes y de aspecto relevante en la dinámica de suelos son el módulo de rigidez al corte (G) y el coeficiente de amortiguamiento los

cuales se obtienen en ensayos de laboratorio y de campo en un rango amplio de deformaciones.

Respuesta sísmica de depósitos y estructuras de tierra

- Licuefacción

La licuación (o licuefacción) de suelos, ocurre cuando un material no consolidado (generalmente arenas) pierde su resistencia al esfuerzo cortante a causa de una vibración intensa y rápida (sismos), que rompe su estructura granular al reducir su presión inter-granular. Al iniciarse la vibración, por efecto de un sismo, el material se expande y las partículas sólidas adoptan un estado muy suelto (por pérdida del soporte mutuo entre los granos); cuando el movimiento cesa, el material tiende a compactarse bruscamente, produciendo las presiones intersticiales que causan la licuación [5].

Figura 1: Carretera en Saitama afectada por la licuefacción de suelos



Fuente (www.lavidacotidiana.es/la-licuefaccion-del-suelo)

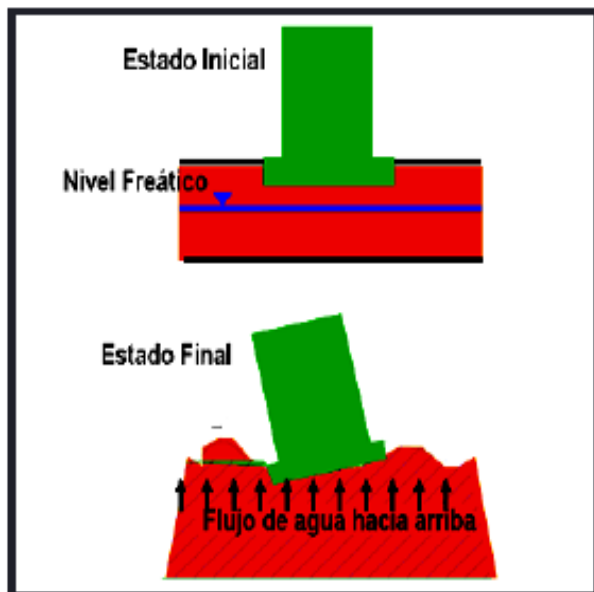
- Desplazamientos laterales

Estos involucran el desplazamiento lateral de un bloque grande de suelo como resultado de la licuefacción de una capa más profunda, El desplazamiento ocurre como respuesta a una combinación de fuerzas gravitacionales e inerciales generadas por un sismo.

- Perdida de la capacidad de soporte del suelo

Cuando un suelo soporta un edificio u otro tipo de estructura y sufre licuefacción y pérdida de resistencia, ocurren grandes deformaciones en la masa de suelo, las que producen asentamientos y volcamientos de las estructuras lo cual está influenciado significativamente por el nivel freático.

Figura 2: *Perdida portante del suelo (Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos del Salvador)*



1.3. PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS.

Las cargas dinámicas que actúan sobre cimentaciones y estructuras de suelo pueden originarse debido a terremotos, explosiones de bombas, operaciones de maquinarias y martillos, operaciones de construcción (tales como el hincado de pilotes), explosiones de canteras, tráfico intenso (incluyendo aterrizaje de aviones), viento, carga debido a la acción de las olas en el agua, la naturaleza de cada una de estas cargas es bastante diferente de las otras, siendo la producida por sismos la fuente más importante de cargas dinámicas sobre estructuras y cimentaciones [3].

Las principales propiedades de los suelos que necesitan ser determinadas en dinámica de suelos e ingeniería geotécnica son [6]:

- Resistencia al corte evaluado en términos de razón de deformación y características de esfuerzo-deformación.
- Módulo dinámico, módulo de Young, módulo de corte, módulo de volumen y módulo de confinamiento.
- Relación de Poisson
- Amortiguamiento
- Parámetros de licuación

1.4. CUADRO RESUMEN PROPIEDADES DINAMICAS

Tabla 1. Cuadro resumen propiedades dinámicas

PROPIEDAD	SIMBOLO	DEFINICIÓN	ENSAYOS DE LABORATORIO	ENSAYOS DE CAMPO	PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL VALOR DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS
MODULO DE RIGIDEZ AL CORTE	G	Capacidad de un objeto sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos.	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO •ENSAYO COLUMNA RESONANTE 	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO CROSSHOLE •ENSAYO PIEZOELECTRICO 	<ul style="list-style-type: none"> •Efecto de la relación de vacíos. •Efecto de la amplitud de deformación. •Efecto de la presión confinante. •Grado de saturación
RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO	X	Se define como la propiedad que representa la capacidad de disipación de energía del suelo.	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO •ENSAYO COLUMNA RESONANTE 	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO CROSSHOLE 	<ul style="list-style-type: none"> •Efecto de la amplitud de deformación angular •Efecto de la presión confinante. •Efecto de la frecuencia de carga.
RELACIÓN DE POISSON	V	La relación entre la deformación unitaria en una dirección no esforzada y la deformación unitaria en la dirección esforzada	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO •ENSAYO COLUMNA RESONANTE 	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO CROSSHOLE 	<ul style="list-style-type: none"> •La presión de celda o presión de confinamiento •Influencia del amasado en suelos cohesivos •Tamaño y forma de las muestras.
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO (YOUNG)	Ed	cambio de longitud que experimenta el suelo cuando esta sometido a la acción de tensiones de tracción o de compresión.	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO •ENSAYO COLUMNA RESONANTE 	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO CROSSHOLE •ENSAYO PIEZOELECTRICO 	<ul style="list-style-type: none"> •La presión de celda o presión de confinamiento •Influencia del amasado en suelos cohesivos •Tamaño y forma de las muestras.

2. ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DINAMICAS DE LOS SUELOS

Actualmente los estudios geotécnicos han desarrollado diferentes técnicas para cuantificar las propiedades dinámicas de los suelos teniendo en cuenta el rango de deformaciones y características de cada aplicación. Todavía no existe un ensayo único que cubra todo el intervalo de deformaciones requerido en la solución de los problemas de la dinámica de suelos.

Teniendo como punto de mayor importancia estos aspectos mencionados y considerando el cuidado y conocimiento expresado en el campo de la construcción al determinar la mayor precisión en cuanto a información de bajas y grandes deformaciones en los suelos, se deduce que los más frecuentes y de mayor relevancia tanto en campo como en laboratorio a la hora de arrojar datos son:

- Ensayos de laboratorio
 - Ensayo Triaxial Dinámico
 - Ensayo de Columna Resonante
- Ensayos de campo
 - Ensayo Piezoeléctrico
 - Ensayo Cross Hole

2.1. PRUEBAS DINÁMICAS DE CAMPO Y LABORATORIO

2.1.1 Pruebas dinámicas de laboratorio.- La precisión en la obtención de propiedades dinámicas del suelo en las pruebas de laboratorio está directamente relacionada a la habilidad de replicar las condiciones iniciales que se tienen en

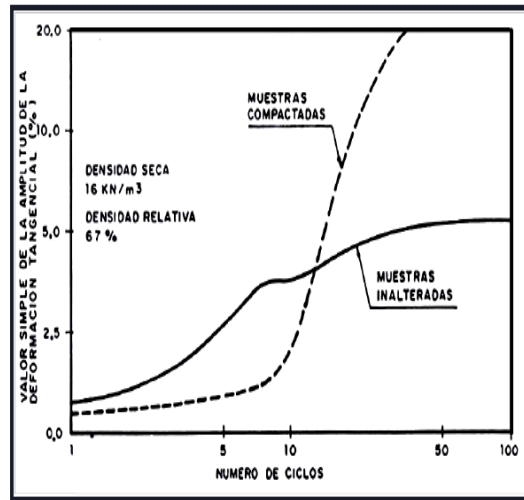
campo, debido a que las pruebas se realizan en especímenes pequeños en comparación a la masa de suelo estudiada.

Los especímenes que se usan en la prueba de laboratorio pueden ser inalterados o pueden ser remoldeados (compactados). Cuando el suelo tiene consistencia natural y puede ser muestreado con procedimientos convencionales que no alteran sus condiciones naturales, se utilizan especímenes inalterados, pero si el suelo que se quiere analizar no tiene consistencia natural, como el caso de un suelo granular, el problema de la determinación de las propiedades se dificulta, debido a que se deben utilizar especímenes remoldeados que si bien generan condiciones de esfuerzos y relación de vacíos, no reproducen otros efectos de factores que influyen en dichas propiedades dinámicas.

Según unas investigaciones realizadas por Horn (1979) pudo demostrar que aunque las pruebas sean tomadas cuidadosamente, los resultados obtenidos para ambos especímenes siempre diferirán, aun cuando las densidades y esfuerzos aplicados sean los mismos. [7]

La Figura #3 muestra un estudio comparativo en el que se observa que para pocos ciclos y bajo nivel de deformación, la resistencia cíclica de especímenes inalterados es mayor a la obtenida en especímenes remoldeados. Pero este comportamiento cambia cuando se alcanza aproximadamente el treceavo ciclo y una deformación tangencial de +/- 4%.

Figura 3: Estudio comparativo de la resistencia dinámica de las arenas



2.1.2 Pruebas dinámicas de campo. Estas pruebas se realizan en el propio sitio de estudio y por tanto no es necesario recuperar especímenes para rehacer condiciones del suelo tales como estado de esfuerzo, relación de vacíos (e), contenido de humedad (w), etc. Esto es una ventaja comparándolo con los ensayos de laboratorio donde tienen dificultad en rehacer las condiciones iniciales del suelo cuando se trata de suelos granulares y es necesario que los especímenes sean remoldeados.

Las pruebas dinámicas de campo se fundamentan en la obtención de la velocidad de propagación de ondas S más que en la obtención de ondas P para la determinación de las propiedades dinámicas del suelo, debido a que la velocidad de las ondas P están influenciadas por la presencia de agua en el terreno. No obstante el efecto que tiene el grado de saturación de un suelo sobre la velocidad de las ondas P, toma importancia al momento de definir el potencial de licuefacción de un suelo arenoso.

Las pruebas dinámicas de campo tienen algunas desventajas en relación a las pruebas dinámicas de laboratorio. No existe manera de medir las presiones de poros porque se trata de una gran masa de suelo y por esta razón no se pueden controlar las condiciones de fronteras. Además las velocidades de propagación de ondas

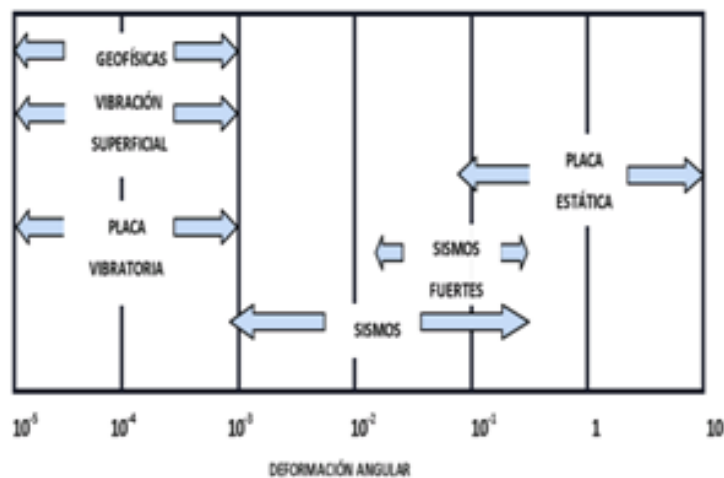
sísmicas obtenidas por las diferentes técnicas de campo solo pueden ser obtenidas para niveles bajos de deformación para un orden de 10^{-4} % por lo que para estimar las propiedades dinámicas del suelo a un nivel sísmico real, se necesita extrapolar dichos valores de campo, con los obtenidos por pruebas dinámicas en laboratorio.[\[2\]](#)

2.1.3 Pruebas de alta y Baja deformación. Las pruebas de baja deformación son aquellas en las que la deformación angular provocada en el suelo es menor de 0.001% y en las cuales los cambios de volumen en la muestra se consideran despreciables.

Las pruebas de alta deformación abarcan un rango de deformación angular mayores de 0.01 % y en estas las características de cambios de volúmenes son importantes. La figura 4 y 5 muestran el nivel de deformación angular que abarcan algunas de las pruebas dinámicas.

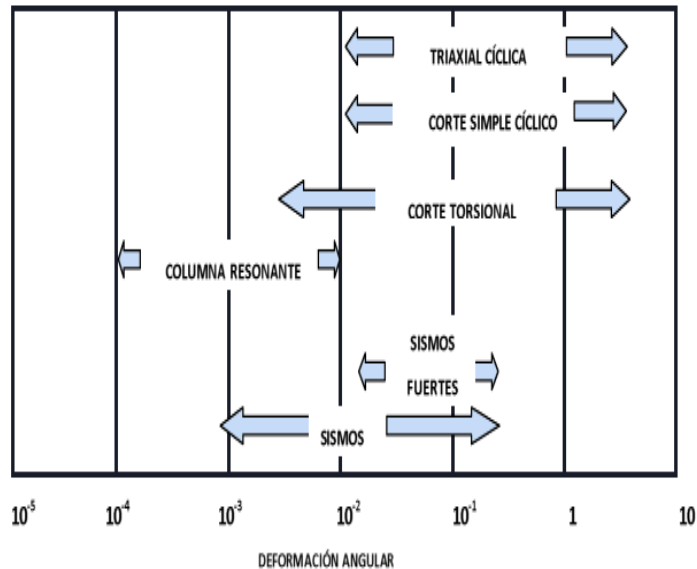
- Pruebas de campo

Figura 4: Rango de deformación angular de pruebas dinámicas de campo y laboratorio (modificado de cenapred 1999)



- Pruebas de laboratorio

Figura 5: Rango de deformación angular de pruebas dinámicas de campo y laboratorio (modificado de cenapred 1999)



Es de gran importancia estudiar las propiedades dinámicas del suelo en altas como en bajas deformaciones. A bajas deformaciones las propiedades dinámicas como la rigidez (G) y el amortiguamiento (\square) son de mayor interés debido a que sufren una variación considerable dentro de sus rangos.

En otro lado el estudio a altas deformaciones tiene en cuenta la naturaleza del suelo como un material no lineal, este nivel de deformaciones provoca que las propiedades dinámicas del suelo se vean influenciadas por factores tales como, amplitud y numero de ciclos, entre otros. [8]

2.2. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS

2.2.1 Ensayo Triaxial Dinámico

2.2.1.1 Introducción al Ensayo Triaxial Dinámico; El ensayo Triaxial dinámico o cíclico fue desarrollado por Seed y Lee en 1966 para poder determinar los patrones que controlan la licuación de arenas saturadas y de deformaciones de los suelos, consiste en la aplicación de cargas de confinamiento y axial a una muestra de suelo, en forma cíclica tratando de simular la frecuencia y magnitud de las cargas a la cual podría estar sometida la muestra. Es un ensayo de laboratorio, debido a su simplicidad y a la disponibilidad del equipamiento necesario es el procedimiento de ensayo más comúnmente usado [9].

Actualmente el aparato Triaxial dinámico permite efectuar una gran variedad de ensayos tomando como referencia el tipo de ensayo, amplitud y duración de la excitación, material ensayado, variables controladas y fenómenos a modelar. Los tipos fundamentales de ensayos son [8]:

- Ensayo de carga controlada: en este tipo de ensayo, se fija una tensión a aplicar, ya sea en base a ciclos regulares de carga, como irregulares, simétricos o asimétricos. Este tipo de ensayo se emplea para el estudio del comportamiento del suelo en grandes deformaciones (fatiga de suelos cohesivos, licuefacción de suelos granulares saturados, entre otros), de igual forma se emplea este tipo de ensayo para la determinación de parámetros dinámicos (módulo de elasticidad dinámico y amortiguamiento) y el estudio de cómo evoluciona en el proceso
- Ensayo de deformación controlada: se somete el suelo a una serie de ciclos en los cuales la deformación axial varía entre un valor máximo y uno mínimo los cuales son especificados en el ensayo. Durante el ensayo se mide la carga vertical y la variación de la presión. A partir de las medidas se obtiene una curva de forma

característica ($G \leftrightarrow \gamma$ y $\lambda \leftrightarrow \gamma$) para el estudio de suelos granulares saturados y obtención de parámetros dinámicos (módulos de elasticidad y coeficientes de amortiguamiento).

2.2.2.2 Descripción Del Equipo; El equipo Triaxial dinámico o cíclico permite preparar especímenes, confinarlos, saturarlos, consolidarlos y aplicarles una carga cíclica que induce esfuerzos de cortes cíclicos en planos de compresión triaxial, simulando el efecto de un movimiento sísmico y la inmediata respuesta dinámica del modelo ensayado.

El sistema de carga para el ensayo es neumático, es decir, accionado por aire presurizado, el cual funciona por medio de un motor eléctrico.

El sistema para medir y adquirir datos es electrónico, con lo cual se puede monitorear de forma analógica y digital el desarrollo de la prueba, ya sea por medio de gráficos continuos o en la computadora. El equipo para el ensayo se complementa con una microcomputadora en la cual se dispone del software para el procesamiento de la información obtenida en el ensayo [3].

Figura 6: Actuales equipos triaxiales dinámicos (GDS, GCTS, 2004)



Este tipo de aparatos está compuesto por tres unidades comúnmente [10]:

- Unidad de registro de información
- Unidad de regulación de presión
- Unidad de aplicación de carga

- Unidad de registro de información

Esta unidad se basa principalmente en un sistema de control a través del cual se lleva a cabo el encendido del equipo para que opere. Además de tener un control de las otras dos unidades como son las magnitudes de la presión de confinamiento, magnitudes de carga, deformaciones verticales permanentes y reportar los resultados obtenidos, también cuenta con un pc de alta velocidad utilizado para el control de adquisición y representación de resultados, todo el sistema es controlado por medio de un software que se utiliza para pruebas triaxiales (estáticas y dinámicas) pruebas de consolidación, entre otras.

- Unidad de regulación de presión

Suministra y mantiene el aire presurizado que utiliza el equipo. Tiene un dispositivo automático el cual se activa cuando el valor de la presión descende por debajo de cierto valor, asegurando así una presión constante durante todo el desarrollo del ensayo.

- Unidad de aplicación de carga

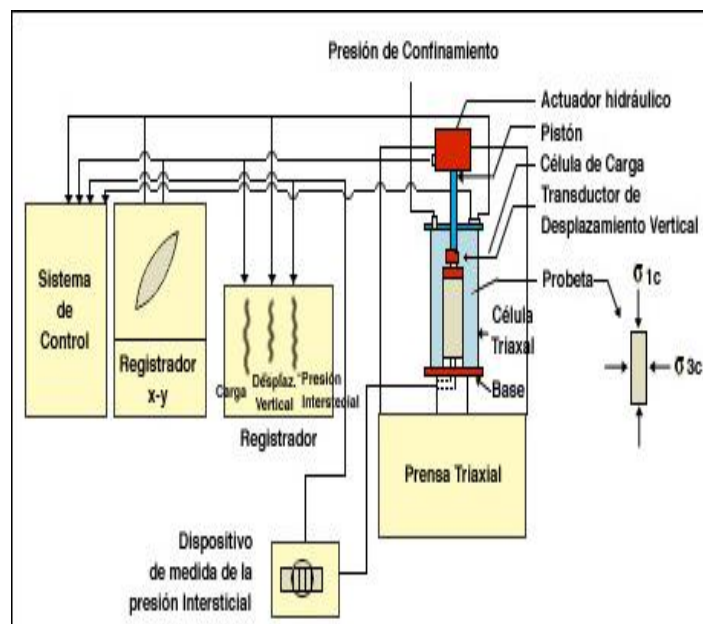
Consta de un marco de carga, cámara Triaxial para permitir grandes cargas con un actuador dinámico cíclico. También cuenta con unos transductores los cuales transmiten las deformaciones verticales medidas hacia la unidad de información así como las deformaciones transversales.

Los equipos triaxiales cíclicos utilizan un marco tradicional de carga y una célula Triaxial para permitir la alta carga de trabajo estático con un actuador dinámico de +/- 5 KN adicional para el trabajo cíclico dinámico y estos pueden ser servo-

hidráulicos o servo-neumáticos los cuales trabajan a una frecuencia no mayor a 70 Hz.

En estos equipos se pueden probar especímenes de 70 mm, 100 mm, 150 mm y hasta 350 mm de diámetro.

Figura 7: Esquema del equipo Triaxial (CEDEX)



2.2.2.3 Procedimiento Del Ensayo;

Montaje y preparación de la muestra.

En la toma y montaje se usa un molde con sección dividida y un pequeño compactador, el molde se une al cabezal inferior de tal forma que la membrana no sufra desviaciones ni cortes. Después de ubicado, se asegura con dos abrazaderas que impidan el movimiento relativo de todas las partes del molde y la aparición de aristas libres que puedan romper la membrana.

Después de haber puesto el molde, la parte saliente de la membrana se dobla sobre él, de tal forma que el interior quede liso, sin arrugas o dobleces y adherido al molde.

Una vez se haya preparado la muestra, se procede a poner el cabezal superior, se sube la membrana y se colocan los anillos de goma. Es necesario aplicar un pequeño vacío por la parte superior de -0.1 a -0.2 kg/cm^2 para retirar el molde partido. Con el vacío en el interior al interior de la probeta se toman las medidas de esta, con una precisión de ± 0.001 cm. Se miden los diámetros superior, medio e inferior (se descuenta el espesor de la membrana) y tres alturas equidistantes. Se toman los valores promedios como medidas de la muestra. Para culminar el montaje se cierra la celda Triaxial

- Presión de confinamiento y saturación

Para aplicar las presiones, se introduce agua a la celda Triaxial, dejando un colchón de aire en la parte superior de la celda para controlar los cambios de presión que induce la entrada y salida del pistón de carga.

A continuación por la línea de drenaje inferior se aplica una pequeña presión de agua con el objeto de ir saturando la muestra por percolación. Mientras menor sea esta presión, mayor será la cantidad de aire desplazado de los vacíos del suelo. Teniendo conectado el sistema de contra-presión y manteniendo cerrada la línea de drenaje superior y abierta la inferior, se aumenta paralelamente el valor de la contra-presión y la presión de celda, manteniendo una diferencia de 0.1 a 0.2 kg/cm^2 entre estas dos presiones, hasta llegar a un valor de 0.2 Kg/cm^2 de contra-presión y 0.3 o 0.4 kg/cm^2 de presión de celda. Dejando que el sistema se estabilice, se procede a medir el grado de saturación del espécimen, por medio del coeficiente B de Skempton para lo cual se cierra la línea de drenaje inferior, se aumenta paralelamente la contra-presión y la presión de celda en 0.2 kg/cm^2 ,

como la línea de drenaje está cerrada, el aumento de la contra-presión no afectará al espécimen, solo producirá el aumento de la presión de celda, el cual producirá a su vez un incremento de la presión de poros al interior del espécimen. Se mide esta presión (Δu), luego:

$$\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} = B$$

dónde:

Δu = aumento de la presión de poros

$\Delta \sigma_c$ = aumento de la presión de celda.

Se considera el espécimen aceptablemente saturado cuando $B = 0.95$. Si $B \leq 0.95$, significa que aún existen burbujas de aire atrapadas, para lo cual, se abre la línea de drenaje superior permitiendo la circulación del agua a través del espécimen, la cual a su vez irá desalojando el aire existente. Después de un cierto tiempo se vuelve al paso de aumentar paralelamente ambas presiones cerrando ambas líneas de drenaje. Se repite este procedimiento hasta que el espécimen se encuentre saturado ($B = 0.95$) [8].

Consolidación

Después de saturar la probeta se aumenta la presión de cámara a los valores pertinentes de modo de consolidar a un valor de esfuerzo efectivo deseado, manteniendo cerradas las líneas de drenaje. Realizando la conexión del sistema a través de la pipeta volumétrica, se deja disipar el aumento de la presión de poros producido por la diferencia de las presiones anteriores, abriendo las líneas de drenaje superior e inferior, hasta alcanzar el valor de la contra-presión aplicada. Luego de la consolidación se mide la deformación volumétrica (ΔV), que el

espécimen ha experimentado por efectos de ésta, en la pipeta volumétrica y se calcula la deformación axial. El área final del espécimen se calcula:

$$A_f = \frac{V_i \Delta V}{h_i \Delta h}$$

Proceso de Aplicación de la carga cíclica

Para aplicarle la carga se elige una relación de esfuerzos cíclicos del ensayo (R) y se calcula el valor máximo de la onda de carga de la siguiente forma:

Teniendo en cuenta que el valor máximo de onda varía en función de del esfuerzo desviador y el esfuerzo efectivo de confinamiento, tenemos:

$$R = \frac{\sigma_d}{2\sigma_0}$$

$\sigma_d =$ *esfuerzo desviador*

$\sigma_0 =$ *esfuerzo efectivo de confinamiento inicial*

Teniendo que

$$\sigma_d = \frac{Fc}{A_f}$$

$Fc =$ *valor maximo de la onda de carga*

$$Fc = \sigma_0 R 2 A_f$$

Se cierran las válvulas de drenaje y se aplica la carga cíclica de amplitud y frecuencia deseada. Se registra en el convertidor analógico / digital las señales emitidas por los siguientes transductores de Medición:

- Fuerza axial externa
- Fuerza axial interna
- Presión de Poros

- Deformación axial

Adicionalmente se imprime en papel fotosensible del oscilógrafo las señales analógicas continuas de estos cuatro canales de medición contra el tiempo. [\[11\]](#)

Fuentes de Error

Los errores se pueden producir debido a:

a) Preparación de la muestra

- Compactación no uniforme.
- Imprecisión en las medidas de altura y diámetro.
- Inadecuada manipulación de la muestra, que induzca estados tensionales.
- Saturación incompleta.
- Consolidación incompleta.

b) Solicitación dinámica

- Cargas muy altas que originen tracciones que corten la probeta.
- Ciclos de carga no simétrica.
- Frecuencia de la carga no constante.
- Pico de la carga variable

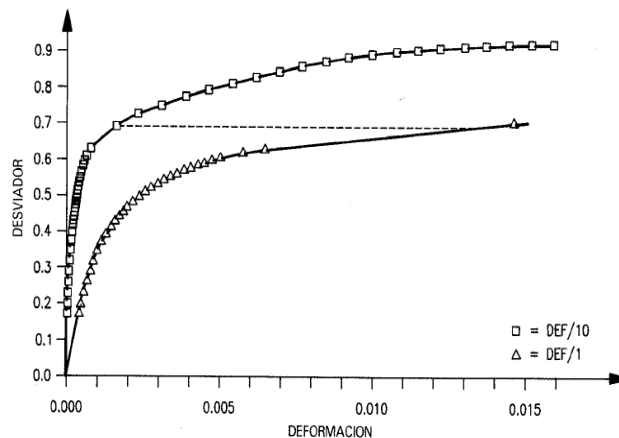
2.2.3 Ensayo de Columna Resonante

2.2.3.1 Introducción Ensayo de Columna Resonante: A medida que la geotecnia avanzaba en los estudios estáticos y dinámicos, era necesario evaluar características de esfuerzo – deformación sobre un amplio rango de amplitud de corte – deformación, esto permitió un desarrollo en la variedad de técnicas de medición tanto en laboratorio como en campo. Hoy en día existen ensayos de laboratorio que proporcionan valores pocos representativos del módulo elástico, debido a dos factores: por la alteración del suelo durante el muestreo y por la

dificultad de tomar medidas cuando existen pequeñas deformaciones (inferiores al 1%).

La figura #8 muestra una curva tensión deformación típica de un suelo sometido a un ensayo triaxial no drenado, donde podemos observar la no linealidad del comportamiento que se extiende a deformaciones muy pequeñas. Debido a esto se puede decir que la rigidez del suelo disminuye con la deformación. Si conocemos la variación que tiene el módulo respecto la deformación, nos va permitir utilizar métodos de análisis no lineales donde el valor del módulo en cada punto se va ajustar según el nivel de deformación en un proceso iterativo. [12]

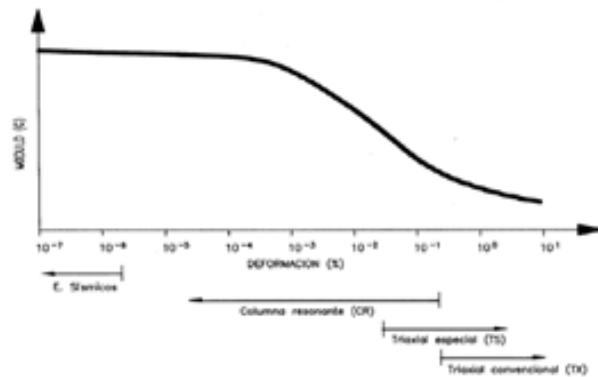
Figura 8: Curva típica Desviador-Deformación vertical de ensayo no drenado (Gili et al 1982)



El ensayo de columna resonante es uno de los laboratorios más utilizados para calcular las propiedades dinámicas de baja deformación en el suelo, el cual cubre la determinación del módulos de rigidez, la respuesta dinámica de suelo (coeficiente de amortiguamiento) cuando es sometido a una carga cíclica y la velocidad de onda de corte para muestras cilíndricas de suelo en condiciones alteradas o inalteradas. Este método está normalizado bajo la designación D4015-92 de la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM por sus iniciales en inglés). En la

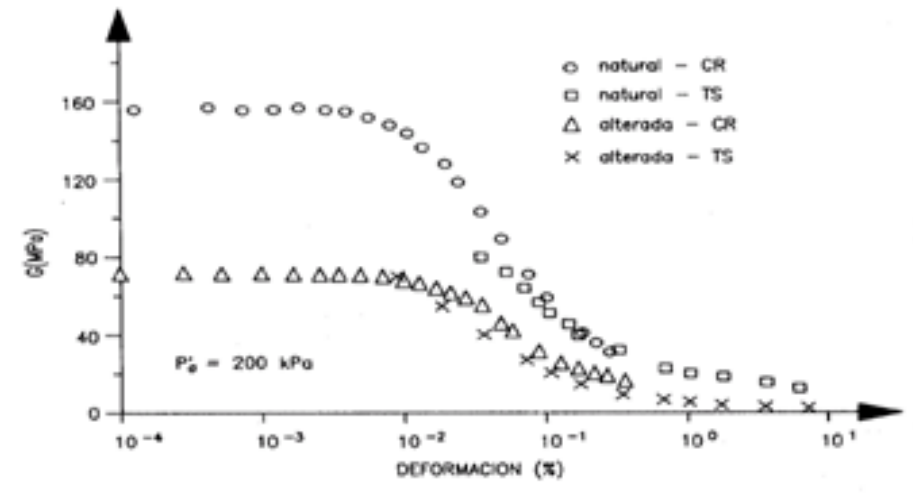
Figura#9 (Curva módulo de corte-deformación Atkinson y Salfords 1991) se puede observar que los módulos que se obtienen del ensayo columna resonante están en un amplio rango de deformaciones menores que el triaxial convencional, sin embargo no alcanza las pequeñas deformaciones que inducen los ensayos sísmicos.

Figura 9: Curva módulo de corte-deformación (Atkinson y Salfords)



Ahora que conocemos el rango de deformaciones que podemos obtener del ensayo columna resonante, se podría superponer con la curva modulo-deformación obtenida con el ensayo triaxial y analizarlas. En la fig. 3 (variación del módulo de corte en la arcilla de Todi con pequeñas deformaciones (Georgiannou et al 1991)) tenemos la superposición de estos dos ensayos y claramente se puede observar que el ensayo de columna resonante predomina sobre el ensayo triaxial convencional por el amplio rango de deformaciones, este hecho justifica que en la mayoría de estudios geotécnicos se utilice el aparato de columna resonante.

Figura 10: Variación del módulo de corte en la arcilla de Todi con pequeñas deformaciones (Georgiannou et al 1991)

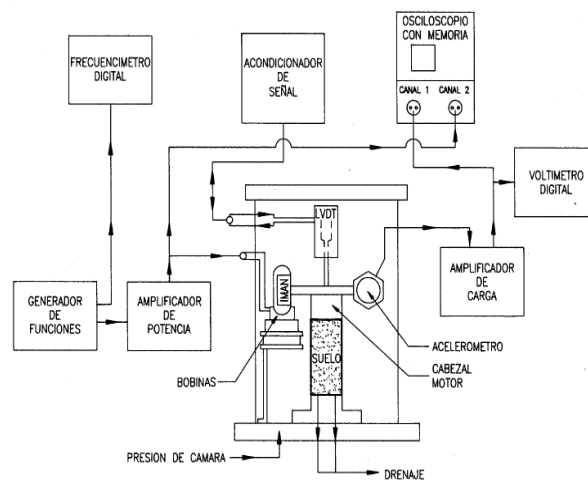


2.2.3.2 Descripción del ensayo y del equipo: Richard (1970); Drnevich (1978); Anderson y Stokoe (1978) fueron quienes desarrollaron el aparato clásico de columna resonante, cuyo funcionamiento se basa en la propagación de ondas (longitudinales o transversales) a lo largo de una muestra cilíndrica. Es importante tener en cuenta la porosidad y el estado tensional al cual se somete la probeta en el ensayo, debido a que puede alterar los resultados de un determinado suelo, esto indica que los resultados no solo dependerán del nivel de deformación.

En el ensayo de columna resonante se pueden desarrollar varias versiones dependiendo de las condiciones de fijación en los extremos y de confinamiento de la muestra. Matemáticamente se demuestra que existe proporcionalidad para cada tipo de condiciones de contorno entre la frecuencia de resonancia de la probeta y la velocidad de propagación de la onda correspondiente (Richart et al., 1970). Por lo tanto, el objetivo principal del ensayo es conocer, bajo las condiciones deseadas, la frecuencia de resonancia más baja, para la cual se encuentra en fase la fuerza(o el momento) excitatriz, con el movimiento de la probeta [8].

La figura #11 muestra el equipo de columna resonante. Este equipo está conformado por dos partes bien diferenciadas: Una parte es encargada de someter la probeta a las presiones de confinamiento e intersticiales deseadas. También permite mantener empotrada la muestra y solicitar a la probeta longitudinalmente o torsionalmente en el otro extremo y utilizando un sistema electromagnético para realizar un esfuerzo que varía sinusoidalmente en el tiempo. La otra parte del equipo es la encargada de generar, ampliar y medir las fuerzas excitatrices, y con un conjunto de transductores se puede medir las deformaciones que sufre la probeta.

Figura 11: Esquema de la disposición de la instrumentación para el ensayo



2.2.3.3 Procedimiento Del Ensayo: Esta prueba se realiza en un espécimen cilíndrico de suelo con diámetro mínimo de 3.3 cm y de altura de 2 a 7 veces el diámetro ($2d \leq H \leq 7d$). Inicialmente el espécimen se somete a una condición determinada de esfuerzo efectivo de consolidación, aplicando esfuerzos de confinamiento (σ_c) y contrapresión (σ_{cp}). [13]

Durante la etapa de prueba se aplica una fuerza de vibración forzada torsional y/o longitudinal, (F), en la parte superior del espécimen mientras que su base se

encuentra empotrada y se registran las aceleraciones de respuesta, con el acelerómetro montado en el sistema móvil. Luego se hace variar la frecuencia de excitación. A estas lecturas de aceleración desde una frecuencia inicial (f_i) hasta una frecuencia final (f_f) con incrementos Δ_f se le llama barrido de frecuencias, al terminar cada barrido de frecuencias se incrementa la fuerza de torsión en valores Δ_f , de manera que al final de la prueba se tendrá una serie de barridos de frecuencia, hasta alcanzar la frecuencia de resonancia para la columna de suelo

2.2.4 Ensayo Piezoeléctrico

2.2.4.1 Introducción Ensayo Piezoeléctrico: Los pequeños módulos de esfuerzos cortantes (G_{max}), proporcionan una valiosa información sobre el suelo, que es relevante para una amplia gama de tareas de ingeniería, incluyendo el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas, monitorización de procesos, evaluación de licuefacción y el control de la mejora del suelo. El valor de G_{max} puede obtenerse a partir de mediciones de la velocidad de onda de corte que utilizan transductores piezoeléctricos. Jacques y Pierre Curie descubren el fenómeno de la piezoelectricidad en 1880. A finales de la década de 1940, diversos estudios encuentran que la sustancia cerámica puede polarizarse y hacer el proceso piezoeléctrico.

Históricamente, Lawrence (1963) fue el primero en aplicar transductores piezoeléctricos. El ensayo permite tomar una medida de la velocidad de las ondas de corte en una muestra o en una capa de suelo. El ensayo se llevó a cabo en muestras de suelos arcillosos y suelos arenosos, con transductores de placa de corte alojadas en el pedestal de la base y la tapa superior de un aparato Triaxial. El inconveniente inicial con este ensayo, radicaba en que los transductores de ondas S (secundarias) no eran adecuadas para medir la velocidad de onda de

corte en los suelos, debido a la directividad de estas ondas y mal acoplamiento con el suelo. Posteriormente, Shirley y Anderson (1975) introdujeron la cerámica dobladora (Bender) en lugar de las placas de corte para probar la arena seca. Estos eran preferidos debido a la generación de las señales más fuertes con menor excitación eléctrica. Dyvik y Madshus (1985) ha desarrollado con éxito los elementos dobladores para ensayos de suelos saturados. Introdujeron un epoxi-capa de la cerámica para el aislamiento contra la naturaleza, potencial conductor de tierra, lo que podría afectar negativamente a las señales recibidas. Este descubrimiento condujo a una gran expansión de las pruebas de elemento doblador en los laboratorios [\[14\]](#).

Un requisito previo para el desarrollo de excelentes técnicas de medición de la velocidad de onda de corte era una mejora sustancial en la calidad de la señal recibida. Esto se logró mediante un cuidadoso blindaje de los cables que conectan los elementos Bender para evitar la interferencia externa, de manera que las señales no requieren amplificación, el filtrado o promediado de los datos. Se encontraron que se obtuvieron las señales más estables si la tierra del elemento doblador receptor estaba en conexión eléctrica con la muestra de suelo, y que todas las rutas de conexión a tierra se evitaron para el transmisor para evitar la inducción de la tierra recorre la muestra al receptor. Jovičić et al. (1996) reportaron que para captar un elemento de señal doblador que se puede interpretar de manera objetiva, un pulso de onda sinusoidal es preferible a una onda cuadrada de uno. Las ondas cuadradas demostraron ser demasiado complejo para el análisis debido a la amplia gama de frecuencias presentes que pueden resultar en efectos de campo cercano [\[15\]](#).

Como parámetro de precisión y aceptación de datos en los ensayos, se optó por utilizar el ensayo Piezoeléctrico con elementos dobladores (Bender).

2.2.4.2 Descripción Del Equipo: El elemento activo en la mayoría de los dispositivos y transductores ultrasónicos es un elemento piezoeléctrico, que puede pertenecer a uno de estos grupos: cristales de cuarzo, hidrosolubles, mono cristales, semiconductores piezoeléctricos, cerámicas piezoeléctricas, polímeros y elementos piezoeléctricos. Las cerámicas piezoeléctricas pertenecen al grupo que da mayor flexibilidad de formato y de propiedades, siendo ellas ampliamente utilizadas en ensayos no destructivos y equipos para monitorear vibraciones [16].

El ensayo piezoeléctrico consta de tres secciones fundamentales

- Transductor (elemento Bender)
- Osciloscopio (medición tensiones)
- Unidad de computo

Transductor:

Existen diferentes tipos de transductores, para el caso de ensayos en suelos, se utiliza los transductores piezoeléctrico dado que se basan en el fenómeno de la piezoelectricidad. Por mayor flexibilidad y mejor recepción de señales eléctricas se opta por trabajar con transductores de elemento doblador (Bender)

La prueba de elemento doblador es un ensayo no destructivo que ha ganado popularidad en la determinación de laboratorio de pequeño módulo de corte de tensión, G_{max} . Los elementos Bender son esencialmente un par de transductores piezoeléctricos bimorfeos: el transmisor genera un movimiento de flexión cuando se excita con un pequeño voltaje, mientras que el "receptor" detecta la vibración se propaga a través del medio y produce una salida de tensión, ver Figura #12. Las señales eléctricas transmitidas y recibidas se registran como formas de onda en un osciloscopio un examen más detenido. La prueba elemento doblador puede llevarse a cabo en especímenes no confinadas, o más comúnmente, en un aparato de ensayo (por ejemplo, célula Triaxial, edométricas y aparato de la

columna resonante) para proporcionar mediciones de la velocidad de onda de cizalla.

Figura 12: Elemento piezoeléctrico Bender. (Geotechnical Earthquake Engineering. Steve L. Kramer)



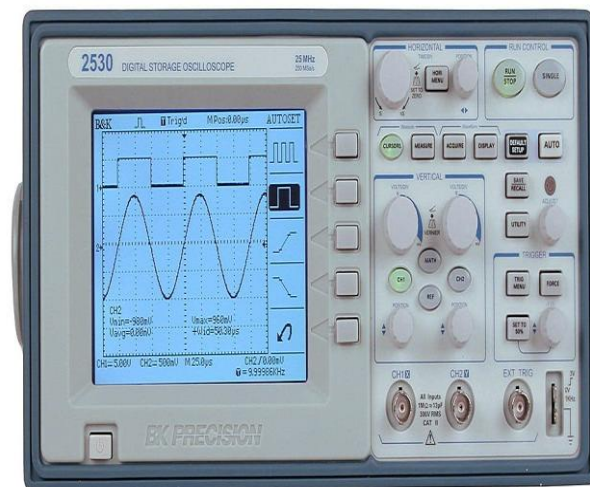
Un voltaje positivo causa que el elemento se doble hacia un lado, un voltaje negativo causa que se doble hacia el otro lado.

Osciloscopio:

Instrumento de medición electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo. Presenta los valores de las señales eléctricas en forma de coordenadas en una pantalla, en la que normalmente el eje X (horizontal) representa tiempos y el eje Y (vertical) representa tensiones. La imagen así obtenida se denomina oscilograma. Suelen incluir otra entrada, llamada "eje THRASHER" o "Cilindro de Wehnelt" que controla la luminosidad del haz, permitiendo resaltar o apagar algunos segmentos de la traza. Ver figura #13. Un osciloscopio puede ser utilizado para estudiar propiedades físicas que no

generan señales eléctricas, por ejemplo las propiedades mecánicas. Para poder representar en la pantalla del osciloscopio dichas propiedades, es necesario utilizar transductores que conviertan la señal que le llega, en este caso la mecánica, en impulsos eléctricos. Un osciloscopio es un aparato que basa su funcionamiento en la alta sensibilidad que tiene a la tensión, por lo que se podría entender como un voltímetro de alta impedancia. Es capaz de analizar con mucha precisión cualquier fenómeno que podamos transformar mediante un transductor en tensión eléctrica [17].

Figura 13: Osciloscopio (tomado de Eduteka)



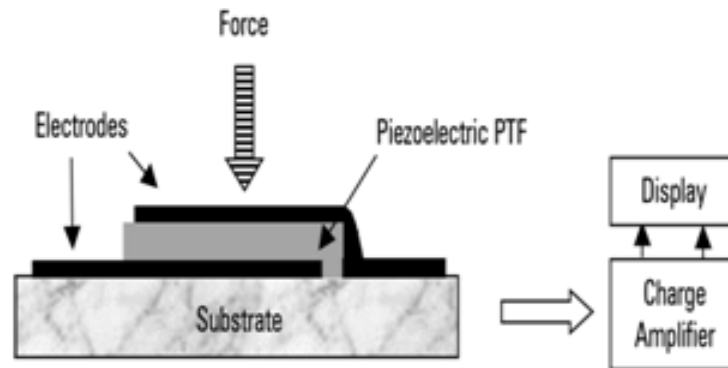
Unidad de cómputo:

Para analizar y llevar un registro enlazado con la unidad del osciloscopio, es necesaria una unidad de cómputo, en la cual se establecen las propiedades y características de la muestra o suelo que se está analizando.

2.2.4.3 Procedimiento Del Ensayo: En el ensayo, principalmente se adjudican dos elementos actuando independientemente como transmisor y receptor respectivamente a una muestra de suelo. Para transmitir el esfuerzo sobre la

muestra, un generador emite al elemento transmisor un voltaje de entrada, produciendo un efecto de deformación en la muestra, ocasionando un voltaje en forma de onda cortante que viaja a lo largo de la muestra, hasta llegar al elemento receptor el cual se dobla y genera un pulso eléctrico en forma de onda que es captado por un osciloscopio que muestra y captura las señales emitidas. De esta forma se calcula y mide la diferencia de tiempo existente entre los dos voltajes de tal forma que para calcular la velocidad de onda se divide la diferencia de voltajes en la distancia que hay entre los dos elementos transductores [18].

Figura 14: Esquema del procedimiento piezoeléctrico con elementos Bender.



2.2.4.4 Análisis Y Cálculo De Datos: Teniendo como base el tiempo medido entre los dos voltajes tomados en el ensayo que se realice, se hace el cálculo para la velocidad de onda cortante [7]:

Ecuación #1

$$V_s = \frac{L}{t}$$

$V_s =$ velocidad de onda

$L =$ distancia de desplazamiento entre pulsos

$t =$ diferencia de tiempo entre los pulsos

El modulo cortante varía en función de la velocidad de onda cortante y de la densidad de la muestra, se tiene:

Ecuación #2

$$G = V_s^2 \rho$$

$G = \text{modulo cortante}$

$V_s = \text{velocidad de onda}$

$\rho = \text{densidad de la muestra}$

2.2.5 Ensayo Cross Hole

2.2.5.1 Introducción Ensayo Cross Hole: En la actualidad es muy común encontrar discontinuidades o accidentes puntuales del terreno en la zona de apoyo de las estructuras, estos problemas son de indudable importancia y determina la estabilidad de la estructura. Algunos de estos accidentes, por sus limitadas dimensiones, son muy difíciles de detectar y caracterizar mediante sondeos debido al carácter puntual de los datos obtenidos de la perforación, aún en el caso de que estos sondeos se distribuyan en una malla muy cerrada.

Existen métodos geofísicos, englobados bajo la denominación genérica de Cross-hole, capaces de estudiar y caracterizar el medio rocoso situado entre dos sondeos, mediante medidas de algún parámetro físico característico del terreno realizadas a lo largo de ellos; identificando accidentes tales como huecos, fallas y contactos entre unidades litológicas con diferentes características geotécnicas.

En su sentido más amplio, un estudio Cross-hole consiste en determinar de forma detallada la distribución de un determinado parámetro del terreno en el espacio comprendido entre dos sondeos situados relativamente próximos entre sí. Entre los diversos parámetros físicos del terreno uno de los más significativos en el ámbito de las aplicaciones geotécnicas es la velocidad de transmisión de las ondas de compresión, es decir ondas primarias (V_p) a través del mismo. Su importancia en relación con los estudios geotécnicos radica en que los valores de este parámetro dependen del grado de compacidad e integridad de los materiales

y, por lo tanto, están directamente relacionados con la calidad del macizo rocoso. La representatividad y significado de la velocidad de transmisión de las ondas de cizalla u ondas secundarias (V_s) es semejante y, de hecho, también pueden hacerse estudios como gráficos basados en ellas. Por razones de sencillez todos los comentarios en este artículo de referirán exclusivamente a las ondas de compresión [\[19\]](#).

2.2.5.2 Descripción Del Equipo: El equipo necesario para realizar el ensayo está compuesto por los siguientes aparatos:

- ❖ Aparato para permitir la inspección interna.
- ❖ Aparatos para determinar los parámetros de la prueba física.
 - Medición ponderada Bob Tape.
 - Brújula
- ❖ Aparato para la realización de mediciones
 - Sondas
 - Transmisor sonda
 - Receptor sonda
 - Sonda Centralizer
 - Señal de transmisión cables
- ❖ Aparatos para el registro
 - Generales
 - Aparato de grabación
 - Aparatos de datos
 - Aparatos para la visualización de datos medidos

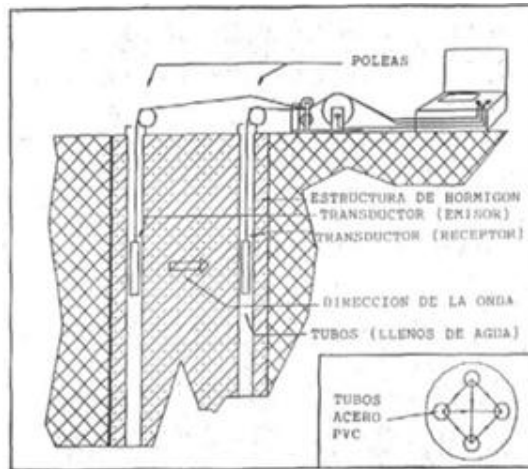
2.2.5.3 Procedimiento Del Ensayo: El ensayo se realiza según la norma ASTM D 6760

Para la realización del ensayo se precisa que en los pilotes el constructor deje instalados tubos para poder introducir las sondas hasta la profundidad que se quiera ensayar. Los requisitos para estos tubos son los siguientes: Los tubos deben ser preferentemente de acero, con diámetro mínimo 40 mm y preferiblemente 50 mm. Se pueden emplear tubos de plástico en pilotes cortos, pero es muy fácil que se deterioren durante el hormigonado y queden inservibles. Los empalmes deben realizarse con manguitos roscados, ya que las uniones soldadas pueden producir rebabas que dificulten el paso de las sondas o deterioren los cables. Los extremos inferiores deben cerrarse herméticamente por medio de tapones metálicos, para impedir la entrada de elementos extraños y para evitar la pérdida del agua que deben contener durante el ensayo. Los extremos superiores deben también cerrarse para evitar la caída accidental de material hasta el momento de realización del ensayo. Sobresaldrán al menos 40 cm del hormigón del pilote. Los tubos deben llenarse de agua dulce limpia previamente al ensayo, y deberá comprobarse que no tienen obstrucciones, ni se producen pérdidas de agua. El número de tubos por pilote, según la norma francesa DTU 13.2, es el siguiente [\[20\]](#):

- 2 tubos para diámetros de pilote inferiores o iguales a 60 cm.
- 3 tubos para diámetros de pilote hasta 120 cm.
- 4 tubos para diámetros de pilote superiores a 120 cm.

Los pilotes deben estar accesibles y sin presencia de agua. El hormigón no tiene, en general, menos de una semana en el momento del ensayo. Es recomendable disponer de un plano con la identificación de los pilotes, su longitud aproximada, e información sobre posibles incidencias durante su construcción. En condiciones óptimas, se pueden realizar más de 130 m de ensayo a la hora.

Figura 15: Esquema del ensayo CrossHole (Carlos Fernández Tadeo, CFT & Asociados, 2010)



2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ENSAYOS

Los ensayos en cualquiera de los casos, presentan cierto tipo de ventajas y desventajas ya sean por el equipo, la manipulación u otros factores referentes a interpretación de datos.

ANEXO: *Tabla de ventajas y desventajas de los ensayos dinámicos escogidos.*

3. CUADRO COMPARATIVO DE LOS ENSAYOS DINAMICOS EXPUESTOS.

Tabla 2. Cuadro comparativo de los ensayos

TABLA # 3: CUADRO COMPARATIVO DE ENSAYOS SELECCIONADOS				
TIPO DE PRUEBA	ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO ENSAYO DE LABORATORIO	ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE ENSAYO DE LABORATORIO	ENSAYO CROSSHOLE ENSAYO DE CAMPO	ENSAYO PIEZOELECTRICO ENSAYO DE CAMPO Y LABORATORIO
CARACTERÍSTICAS PARA EL TIPO DE DEFORMACION QUE SE OBTIENE AL EMPLEAR LA PRUEBA	Ensayo empleado para determinar altas deformaciones en el suelo.	Permite determinar bajas deformaciones en los suelos	Ensayo que reconoce bajas deformaciones en los suelos	El método para ambos tipos de prueba permite determinar bajas deformaciones.
VENTAJAS PRESENTES EN CADA ENSAYO, TENIENDO EN CUENTA PARAMETROS DE USO, SIMPLICIDAD DE USO, COSTOS DE EQUIPOS, IMPLICACION EN LA PRUEBA, ENTRE OTROS.	<ul style="list-style-type: none"> • Prueba económica • Relativa facilidad con la que las variables se pueden controlar • Se obtienen valores del modulo para pequeñas deformaciones muy proximos a los verdaderos • Debido a su relativa simplicidad y a la gran disponibilidad del equipamiento necesario, es todavia el procedimiento de ensayo mas usado • Relativa facilidad con la que las variables se pueden controlar 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativa facilidad con las que las variables se pueden controlar • Se obtienen valores del modulo para pequeñas deformaciones muy proximos a los verdaderos • Es capaz de medir el espectro completo del modulo extendiéndose a deformaciones altas • Con una misma probeta se pueden obtener curvas modulo-deformación para distintas presiones de confinamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Se conoce la trayectoria de la onda • Polaridad reversible • La alteración del suelo puede ser minimizada • Obtención de perfiles de velocidades a profundidades de 30 a 60 (m) mediante fuentes emisoras mecanicas y profundidades mayores de 60 (m) utilizando fuentes emisoras explosivas • Se conoce la trayectoria de la onda 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo no destructivo • No tiene limite en el numero de pruebas repetitivas que se pueden realizar • Permite detectar discontinuidades tanto superficiales, subsuperficiales e internas. • Los equipos pueden ser portatiles y adaptables a un gran número de condiciones.
LIMITACIONES INHERENTES AL SIMULAR LAS CONDICIONES DE ESFUERZO Y DEFORMACION DE UN SUELO REPRESENTATIVO.	<ul style="list-style-type: none"> • Ocurre un cambio de 90° en la dirección del esfuerzo principal mayor durante la segunda parte del ciclo de carga, en especímenes confinados isotrópicamente; y en ciertos niveles de aplicación de esfuerzos cíclicos en especímenes confinados anisotrópicamente. • El máximo esfuerzo axial cíclico que se puede aplicar a un espécimen saturado está controlado por las condiciones de esfuerzo al final de la aplicación de la presión de confinamiento y de la presión de poro generada durante la prueba. • Una prueba triaxial cíclica cuidadosamente conducida puede proporcionar datos del comportamiento cíclico del suelo con un grado de exactitud adecuado para una evaluación significativa del módulo de elasticidad dinámico (Ed) y la razón de amortiguamiento (ξ) bajo un nivel de deformación cortante (γ) del 0.5 %. 	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta Dificultad de transmisiones altas de tensiones cíclicas a la probeta • Solo se pueden tomar medidas fiables a deformaciones mayores de 10⁻¹ % 	<ul style="list-style-type: none"> • hay dificultad para determinar el tiempo de arribo de la primera onda cortante, principalmente cuando se usan cargas explosivas para generar la perturbación • hay que evitar la alteración del suelo a estudiary procurar una verticalidad en los pozos • Presenta defectos en mediciones ocasionados por factores del medio ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • El ensayo No permite medir amortiguamiento de un suelo • la prueba solo aplica para condiciones de isotropia o muy ligera anisotropia • El rango para obtener deformacion es muy bajo • La señal es sensible a las diferencias en composición y estructura del material, lo que enmascara pequeños defectos o proporciona mediciones falsas.
ALCANCE EN CUANTO A OBTENCIÓN DE PROPIEDADES DINAMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Este método de prueba cubre la determinación del módulo de elasticidad dinámico (Ed) y la razón de amortiguamiento del suelo (ξ) en estado inalterado o alterado, mediante la aplicación de la técnica triaxial cíclica a carga o deformación constante. • Este método de prueba es aplicable a suelos de grano fino y grano grueso. Los especímenes de prueba pueden ser inalterados o alterados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los especímenes que se tienen en cuenta pueden ser inalterados (extraídos de tubo muestreador) o bien alterados (reconstruido por compactación) • El ensayo de columna resonante permite determinar las siguientes propiedades dinámicas del suelo: Modulo de elasticidad dinámico, Modulo dinámico al esfuerzo cortante, Razon de amortiguamiento, Amplitud promedio de deformación cortante, Amplitud promedio de deformación elástica axial. • Esta prueba es considerada no destructiva, cuando las amplitudes de vibración forzada son menores de 10⁻⁴ rad. (10⁻⁴ pulg. / pulg.), y otras mediciones pueden ser hechas en el mismo espécimen solamente variando el esfuerzo de confinamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los datos pueden ser utilizados como datos de entrada en análisis estático-dinámicos, o bien como un medio para la obtención de propiedades dinámicas como: Modulo de rigidez al esfuerzo cortante, Modulo de elasticidad dinámico, Relacion de Poisson . • El ensayo de Cross-hole se limita a la determinación del tiempo de viaje horizontal de ondas sísmicas de compresión (P) y de corte (S) en sitios formados principalmente de suelo (no en sitios rocosos). 	<ul style="list-style-type: none"> • Esta prueba permite la determinación del Modulo de elasticidad dinámico y el modulo dinámico al esfuerzo cortante • El método permite determinar el tipo de suelo en una capa estratificada por medio de los pulsos emitidos (ver ASTM D 2487)
RENDIMIENTO EN COSTOS APROXIMADOS PARA EJECUTAR LA PRUEBA (PRECIOS UNITARIOS)	\$ 898.800	\$ 1'111.110	\$ 112.400	\$ 164.000
NORMA PARA LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO	ASTM D 3999	ASTM D 4015	ASTM D 4428	ASTM D 2845

4. CONCLUSIONES

- Partiendo de la información de este proyecto, podemos concluir que si una estructura es diseñada utilizando como datos de entrada parámetros dinámicos del suelo obtenida de uno de los ensayos estudiados en este documento, el comportamiento de dicha estructura estará sujeto a medidas de confianza, seguridad y precisión en lugar de utilizar correlación de los mismos.
- La perspectiva teórica que se expresa en este documento está limitada a una exposición para adquirir unos criterios básicos al momento de implementar posibilidades de análisis en el campo de la Geotecnia.
- Dado la variedad de equipos existentes para la ejecución de los ensayos documentados en este documento, no es posible encontrar un método único que pueda ser compatible con las características de todos los equipos, sin embargo todas las etapas expuestas para cada prueba tales como: Generalidades, descripción del equipo y procedimiento son comunes a cualquier tipo de prueba independientemente del modelo del equipo que se utilice.
- Los ensayos documentados tienen características variables dependiendo el enfoque al cual estén sometidos. De esto depende el grado de validez que tenga cada ensayo.
- Se presenta un cuadro comparativo entre los ensayos dinámicos escogidos para determinar el más viable en función de ventajas, alcance, costo y restricciones al momento de diseñar estructuras de cualquier índole civil.

5. RECOMENDACIONES

A futuro se pretende seguir profundizando en los parámetros y diferencias que pueden presentar los ensayos dinámicos para llegar a tener una idea más exacta del comportamiento del suelo al momento de diseñar estructuras de índole Civil.

REFERENCIAS

- [1] Steven L. Kramer. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall International series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.1996, p.184
- [2] Jose Guillermo Bran Sanchez, Rafael Antonio Gonzales Cruz, Hugo Alejandro Ortiz Landaverde. Metodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos del Salvador.Universidad de el Salvador. [Tesis de Pregrado]. 2009.
- [3] Ing. Antonio Campos Sigüenza, Ing. Oscar Vásquez Huamani CISMID-FIC-UNI, Seminario Taller de Mecánica de Suelos y Exploración Geotécnica, 1992. p 5
- [4] Asociación Costarricense de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones [1994] Código de Cimentaciones de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica. p.150.
- [5] Fenomeno de licuefacción de suelos:
http://www.portalhuarpe.com.ar/medhime20/Talleres/TALLERES%20CUIM/Taller%2013/03%20licuefaccion/que_es_la_licuefaccion_de_suelos.html [citado 24 Enero de 2014]
- [6] Lambe and Whitman, Holtz and Kovac. Textos de ingeniería geotécnica estándar. 1996; 1981.
- [7] Diana Isabel Cepeda Gómez, Leidy Bibiana Arenas López. Caracterización dinámica de suelos: estado del arte e implementación de laboratorio. Universidad Industrial de Santander. [Tesis de Pregrado]. Bucaramanga. 2010.
- [8] M. Pastor, R. Blazquez, C. Olaya. Caracterización en laboratorio de las propiedades dinámicas de los suelos. Revista de obras públicas, Junio 1983, p. 423 a 432.
- [9] O'REILLY M,BROWN S, Cyclic Loading of Soils, Van Nostrand Reinhold, 1991

[10] Selene Citlallin Perez Lopez. Puesta a punto de un equipo Triaxial cíclico para módulo de resiliencia. [Msc tesis] Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. Morelia. 2008.

[11] ASTM D 3999-91 [2003] —Método de Prueba Estándar para la Determinación del Módulo y Amortiguamiento del Suelo usando el Aparato Triaxial Cíclico (Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus), Philadelphia, U.S.A. ASTM volumen 04.08.

[12] Josep Suriol Castellvi, Ingeniero de caminos, canales y puertos. Medida de la deformabilidad de suelos mediante el equipo de columna resonante. Revista de obras públicas N° 3.319. 1993, p. 57

[13] ASTM D 4015-92 [2003] —Método de Prueba Estándar para la Determinación del Módulo y Amortiguamiento del Suelo por el Método de la Columna Resonante (Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method)|.

[14] Steven L. Kramer. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall International series in Civil Engineering and Engineering Mechanics 1996, p.219

[15] Chee-ming Chan, Bender Element Test in Soil Specimens:Identifying the Shear Wave Arrival Time, *Universiti Tun Hussein Onn, Malaysia*.

[16] GALLEGO, J.; Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers, J. Phys. E: Sci. Instrum., 22 p. 804-816. 1989

[17] EIOsciloscopio:<http://www.geocities.ws/pnavar2/oscilos/intro.html> [citado 26 Enero de 2014]

[18] Jong-Sub Lee, J. Carlos Santamarina. Bender elements: Performance and Signal Interpretation JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING ASCE. SEPTEMBER 2005. p 1063

[19] Ángel Granda Sanz y Jose Cambero Calzada, Ingenieros de minas IGT,S.I

[20] ASTM International, Designation D6760-08. Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing.

BIBLIOGRAFÍA

- Ángel Granda Sanz y Jose Cambero Calzada, Ingenieros de minas IGT,S.I
- Antonio Campos Sigüenza, Ing. Oscar Vásquez Huamani CISMID-FIC-UNI, Seminario Taller de Mecánica de Suelos y Exploración Geotécnica, 1992. p 5
- Asociación Costarricense de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones [1994] Código de Cimentaciones de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica. p.150.
- ASTM D 3999-91 [2003] —Método de Prueba Estándar para la Determinación del Módulo y Amortiguamiento del Suelo usando el Aparato Triaxial Cíclico (Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus), Philadelphia, U.S.A. ASTM volumen 04.08.
- ASTM D 4015-92 [2003] —Método de Prueba Estándar para la Determinación del Módulo y Amortiguamiento del Suelo por el Método de la Columna Resonante (Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method)||.
- ASTM International, Designation D6760-08. Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing.
- Chee-ming Chan, Bender Element Test in Soil Specimens:Identifying the Shear Wave Arrival Time, *Universiti Tun Hussein Onn, Malaysia*.

- Diana Isabel Cepeda Gómez, Leidy Bibiana Arenas López. Caracterización dinámica de suelos: estado del arte e implementación de laboratorio. Universidad Industrial de Santander. [Tesis de Pregrado]. Bucaramanga. 2010.
- EIOsciloscopio:<http://www.geocities.ws/pnavar2/oscilos/intro.html> [citado 26 Enero de 2014]
- Fenomeno de licuefacción de suelos: http://www.portalhuarpe.com.ar/medhime20/Talleres/TALLERES%20CUIM/Taller%2013/03%20licuefaccion/que_es_la_licuefaccion_de_suelos.html [citado 24 Enero de 2014]
- GALLEGO, J.; Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers, J. Phys. E: Sci. Instrum., 22 p. 804-816. 1989
- Jong-Sub Lee, J. Carlos Santamarina. Bender elements: Performance and Signal Interpretation JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING ASCE. SEPTEMBER 2005. p 1063
- Jose Guillermo Bran Sanchez, Rafael Antonio Gonzales Cruz, Hugo Alejandro Ortiz Landaverde. Metodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos del Salvador.Universidad de el Salvador. [Tesis de Pregrado]. 2009.
- Josep Suriol Castellvi, Ingeniero de caminos, canales y puertos. Medida de la deformabilidad de suelos mediante el equipo de columna resonante. Revista de obras públicas N° 3.319. 1993, p. 57

- Lambe and Whitman, Holtz and Kovac. Textos de ingeniería geotécnica estándar. 1996; 1981.
- M. Pastor, R. Blazquez, C. Olaya. Caracterización en laboratorio de las propiedades dinámicas de los suelos. Revista de obras públicas, Junio 1983, p. 423 a 432.
- O'REILLY M, BROWN S, Cyclic Loading of Soils, Van Nostrand Reinhold, 1991
- Selene Citlallin Perez Lopez. Puesta a punto de un equipo Triaxial cíclico para módulo de resiliencia. [Msc tesis] Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. Morelia. 2008.
- Steven L. Kramer. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall International series in Civil Engineering and Engineering Mechanics. 1996, p.184
- Steven L. Kramer. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall International series in Civil Engineering and Engineering Mechanics 1996, p.219

Anexo A. Cuadro Resumen Propiedades Dinamicas De Los Suelos

<i>PROPIEDAD</i>	<i>SIMBOLO</i>	<i>DEFINICIÓN</i>	<i>ENSAYOS DE LABORATORIO</i>	<i>ENSAYOS DE CAMPO</i>	<i>PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL VALOR DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS</i>
MODULO DE RIGIDEZ AL CORTE	G	Capacidad de un objeto sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos.	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO •ENSAYO COLUMNA RESONANTE 	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO CROSSHOLE •ENSAYO PIEZOELECTRICO 	<ul style="list-style-type: none"> •Efecto de la relación de vacíos. •Efecto de la amplitud de deformación. •Efecto de la presión confinante. •Grado de saturación
RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO	x	Se define como la propiedad que representa la capacidad de disipación de energía del suelo.	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO •ENSAYO COLUMNA RESONANTE 	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO CROSSHOLE 	<ul style="list-style-type: none"> •Efecto de la amplitud de deformación angular •Efecto de la presión confinante. •Efecto de la frecuencia de carga.
RELACIÓN DE POISSON	v	La relación entre la deformación unitaria en una dirección no esforzada y la deformación unitaria en la dirección esforzada	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO •ENSAYO COLUMNA RESONANTE 	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO CROSSHOLE 	<ul style="list-style-type: none"> •La presión de celda o presión de confinamiento •Influencia del amasado en suelos cohesivos •Tamaño y forma de las muestras.
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO (YOUNG)	Ed	cambio de longitud que experimenta el suelo cuando esta sometido a la acción de tensiones de tracción o de compresión.	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO •ENSAYO COLUMNA RESONANTE 	<ul style="list-style-type: none"> •ENSAYO CROSSHOLE •ENSAYO PIEZOELECTRICO 	<ul style="list-style-type: none"> •La presión de celda o presión de confinamiento •Influencia del amasado en suelos cohesivos •Tamaño y forma de las muestras.

Anexo B. Ventajas y desventajas de los ensayos

ENSAYOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Cross-Hole	• Se conoce la trayectoria de la onda	• Necesita de dos o más agujeros
	• Polaridad reversible	• Se necesita examinar la verticalidad de los agujeros
	• Trabaja en espacios limitados	• Dificultad para controlar las condiciones de frontera
	• Ensayo de un volumen mayor de suelo	• Dificultad para determinar el tiempo de arribo de la primera onda cortante, sobre todo cuando se utilizan cargas explosivas para generar la perturbación.
	• Alteración del suelo puede ser minimizada	
	• Obtención de perfiles de velocidades a profundidades de 30 a 60 (m) mediante fuentes emisoras mecánicas y profundidades mayores de 60 (m) utilizando fuentes emisoras explosivas	
Triaxial Cíclico	• Prueba económica	• Alteración de la muestra provocada por los procedimientos de muestreo, transporte, almacenamiento y ensayo
	• Relativa facilidad con la que las variables se pueden controlar	
		• Se presenta un cambio de 90° en la

ENSAYOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	<ul style="list-style-type: none"> Definición de condiciones de frontera 	dirección del esfuerzo principal mayor durante las dos mitades del ciclo de carga sobre especímenes isotrópicamente consolidados
	<ul style="list-style-type: none"> Se obtienen valores del módulo para pequeñas deformaciones muy próximos a los verdaderos 	
	<ul style="list-style-type: none"> Debido a su relativa simplicidad y a la gran disponibilidad del equipamiento necesario, es todavía el procedimiento de ensayo más usado 	<ul style="list-style-type: none"> Adecuado cuando se trata de ver el comportamiento del suelo a la rotura
Columna Resonante	<ul style="list-style-type: none"> Relativa facilidad con las que las variables se pueden controlar 	<ul style="list-style-type: none"> Mala calidad en los resultados si se utilizan procedimientos rudimentarios
	<ul style="list-style-type: none"> Definición de condiciones de frontera 	<ul style="list-style-type: none"> No se puede efectuar el drenaje en la parte superior de la probeta
	<ul style="list-style-type: none"> Se obtienen valores del módulo para pequeñas deformaciones muy próximos a los verdaderos 	<ul style="list-style-type: none"> Dificultad de transmisión a la probeta de tensiones cíclicas de corte elevadas
	<ul style="list-style-type: none"> Es capaz de realizar 	

ENSAYOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	pruebas triaxiales convencionales (dinamicas y estaticas)	
	<ul style="list-style-type: none"> • Es capaz de medir el espectro completo del módulo extendiéndose a deformaciones altas 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Con una misma probeta se pueden obtener curvas módulo-deformación para distintas presiones de confinamiento 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Actúa en la zona de deformaciones que corresponden a las deformaciones "en servicio" de obras geotecnicas 	
Piezoeléctrico	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo no destructivo 	<ul style="list-style-type: none"> • carencia en la subjetividad a la hora de la medicion del tiempo de llegada de la onda cortante
	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene límite en el número de pruebas repetitivas que se pueden realizar 	<ul style="list-style-type: none"> • se requiere personal altamente calificado para interpretar los datos
	<ul style="list-style-type: none"> •Permite detectar 	

ENSAYOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	<p>discontinuidades tanto superficiales, subsuperficiales e internas.</p>	<p>•La señal es sensible a las diferencias en composición y estructura del material lo que enmascara pequeños defectos o proporciona indicaciones falsas.</p>
	<p>•Los equipos pueden ser portátiles y adaptables a un gran número de condiciones.</p>	

Anexo C Cuadro Comparativo De Ensayos Seleccionados

TABLA # 3: CUADRO COMPARATIVO DE ENSAYOS SELECCIONADOS

TIPO DE PRUEBA	ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO	ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE	ENSAYO CROSSHOLE	ENSAYO PIEZOELECTRICO
	ENSAYO DE LABORATORIO	ENSAYO DE LABORATORIO	ENSAYO DE CAMPO	ENSAYO DE CAMPO Y LABORATORIO
CARACTERISTICAS PARA EL TIPO DE DEFORMACION QUE SE OBTIENE AL EMPLEAR LA PRUEBA	Ensayo empleado para determinar altas deformaciones en el suelo.	Permite determinar bajas deformaciones en los suelos	Ensayo que reconoce bajas deformaciones en los suelos	El metodo para ambos tipos de prueba permite determinar bajas deformaciones.
VENTAJAS PRESENTES EN CADA ENSAYO, TENIENDO EN CUENTA PARAMETROS DE USO, SIMPLICIDAD DE USO, COSTOS DE EQUIPOS, IMPLICACION EN LA PRUEBA, ENTRE OTROS.	<ul style="list-style-type: none"> • Prueba económica • Relativa facilidad con la que las variables se pueden controlar • Se obtienen valores del modulo para pequeñas deformaciones muy proximos a los verdaderos • Debido a su relativa simplicidad y a la gran disponibilidad del equipamiento necesario, es todavia el procedimiento de ensayo mas usado • Relativa facilidad con la que las variables se pueden controlar 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativa facilidad con las que las variables se pueden controlar • Se obtienen valores del modulo para pequeñas deformaciones muy proximos a los verdaderos • Es capaz de medir el espectro completo del modulo extendiéndose a deformaciones altas • Con una misma probeta se pueden obtener curvas modulo-deformación para distintas presiones de confinamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Se conoce la trayectoria de la onda • Polaridad reversible • La Alteración del suelo puede ser minimizada • Obtención de perfiles de velocidades a profundidades de 30 a 60 (m) mediante fuentes emisoras mecánicas y profundidades mayores de 60 (m) utilizando fuentes emisoras explosivas • Se conoce la trayectoria de la onda 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo no destructivo • No tiene limite en el numero de pruebas repetitivas que se pueden realizar • Permite detectar discontinuidades tanto superficiales, subsuperficiales e internas. • Los equipos pueden ser portátiles y adaptables a un gran número de condiciones.
LIMITACIONES INHERENTES AL SIMULAR LAS CONDICIONES DE ESFUERZO Y DEFORMACION DE UN SUELO REPRESENTATIVO.	<ul style="list-style-type: none"> • Ocorre un cambio de 90° en la dirección del esfuerzo principal mayor durante la segunda parte del ciclo de carga, en especímenes confinados isotrópicamente; y en ciertos niveles de aplicación de esfuerzos cíclicos en especímenes confinados anisotrópicamente. • El máximo esfuerzo axial cíclico que se puede aplicar a un espécimen saturado está controlado por las condiciones de esfuerzo al final de la aplicación de la presión de confinamiento y de la presión de poro generada durante la prueba. • Una prueba triaxial cíclica cuidadosamente conducida puede proporcionar datos del comportamiento cíclico del suelo con un grado de exactitud adecuado para una evaluación significativa del módulo de elasticidad dinámico (Ed) y la razón de amortiguamiento (ξ) bajo un nivel de deformación cortante (γ) del 0.5 %. 	<ul style="list-style-type: none"> • El rango para obtener deformaciones es muy bajo • Presenta Dificultad de transmisiones altas de tensiones cíclicas a la probeta • Solo se pueden tomar medidas fiables a deformaciones mayores de 10⁻¹ % 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay dificultad para determinar el tiempo de arribo de la primera onda cortante, principalmente cuando se usan cargas explosivas para generar la perturbación • Hay que evitar la alteración del suelo a estudiar y procurar una verticalidad en los pozos • Presenta defectos en mediciones ocasionados por factores del medio ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • El ensayo No permite medir amortiguamiento de un suelo • La prueba solo aplica para condiciones de isotropia o muy ligera anisotropia • El rango para obtener deformación es muy bajo • La señal es sensible a las diferencias en composición y estructura del material, lo que enmascara pequeños defectos o proporciona mediciones falsas.
ALCANCE EN CUANTO A OBTENCIÓN DE PROPIEDADES DINAMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Este método de prueba cubre la determinación del módulo de elasticidad dinámico (Ed) y la razón de amortiguamiento del suelo (ξ) en estado inalterado o alterado, mediante la aplicación de la técnica triaxial cíclica a carga o deformación constante. • Este método de prueba es aplicable a suelos de grano fino y grano grueso. Los especímenes de prueba pueden ser inalterados o alterados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los especímenes que se tienen en cuenta pueden ser inalterados (extraídos de tubo muestreador) o bien alterados (reconstruido por compactación) • El ensayo de columna resonante permite determinar las siguientes propiedades dinámicas del suelo: Modulo de elasticidad dinámico, Modulo dinámico al esfuerzo cortante, Razon de amortiguamiento, Amplitud promedio de deformación cortante, Amplitud promedio de deformación elástica axial. • Esta prueba es considerada no destructiva, cuando las amplitudes de vibración forzada son menores de 10⁻⁴ rad. (10⁻⁴ pulg. /pulg.), y otras mediciones pueden ser hechas en el mismo espécimen solamente variando el esfuerzo de confinamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los datos pueden ser utilizados como datos de entrada en análisis estático-dinámicos, o bien como un medio para la obtención de propiedades dinámicas como: Modulo de rigidez al esfuerzo cortante, Modulo de elasticidad dinámico, Relacion de Poisson. • El ensayo de Cross-hole se limita a la determinación del tiempo de viaje horizontal de ondas sísmicas de compresión (P) y de corte (S) en sitios formados principalmente de suelo (no en sitios rocosos). 	<ul style="list-style-type: none"> • Esta prueba permite la determinación del Modulo de elasticidad dinámico y el modulo dinámico al esfuerzo cortante • El metodo permite determinar el tipo de suelo en una capa estratificada por medio de los pulsos emitidos (ver ASTM D 2487)
RENDIMIENTO EN COSTOS APROXIMADOS PARA EJECUTAR LA PRUEBA (PRECIOS UNITARIOS)	\$ 898.800	\$ 1'111.110	\$ 112.400	\$ 164.000
NORMA PARA LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO	ASTM D 3999	ASTM D 4015	ASTM D 4428	ASTM D 2845