



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**MEDICIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS DE ARENA CON FINOS
MEDIANTE COLUMNA RESONANTE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL

SOFÍA ESPERANZA ARAYA CONTRERAS

PROFESOR GUÍA:

IVAN ORLANDO BEJARANO BEJARANO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

FELIPE AGUSTÍN OCHOA CORNEJO

LENART GONZÁLEZ LAGOS

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
Ingeniería Civil
POR: Sofía Araya C.
FECHA: 21/04/2017
PROFESOR GUÍA: Iván Bejarano B.

MEDICIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS DE ARENA CON FINOS MEDIANTE COLUMNA RESONANTE

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo; escenario de grandes terremotos en el pasado y con toda seguridad, en el futuro. En particular, los suelos son afectados por movimientos sísmicos. Por lo que es importante conocer las propiedades dinámicas del suelo (rigidez máxima " G_{max} ", curvas de degradación " G/G_{max} " y el amortiguamiento " D ") para el correcto diseño de proyectos de ingeniería.

Existen distintos ensayos para medir parámetros dinámicos del suelo, sometidos a pequeñas y grandes deformaciones. El módulo de corte " G " y el amortiguamiento " D " se obtienen con ensayos de laboratorio y terreno. En particular, en laboratorio, uno de los ensayos que cubre un mayor rango de deformación es el de columna resonante (D4015-15, 2016).

Este trabajo de título consistió en realizar ensayos de columna resonante en arenas de relave del muro del tranque El Torito (Mina de cobre El Soldado). Los ensayos fueron hechos con probetas de arena preparadas entre 35% y 85% de densidad relativa, y confinamientos que variaron entre 1 [kg/cm^2] y 4 [kg/cm^2]. Los resultados obtenidos se compararon con los obtenidos en el equipo *Bender Element*.

Los " G_{max} " dieron entre 40 y 180 [MPa]. Los ensayos de columna resonante entregaron rigideces máximas moderadamente mayores (5%) a los de *Bender Element*. Esto debido posiblemente a que las probetas del primer ensayo se vieron menos alteradas en su confección.

Todas las curvas de degradación del módulo de corte " G/G_{max} " y amortiguamiento " D " varían respecto a su deformación al corte con una tendencia que concuerda con lo observado en la literatura.

A mayor confinamiento, las muestras tienen mayor rigidez inicial, mayor " G/G_{max} " y menor amortiguamiento. A mayor índice de vacíos, las probetas tienen menor rigidez inicial y mayor " G/G_{max} ", el amortiguamiento no tiene mayor variación respecto este parámetro. El comportamiento de las muestras al 5% de saturación es similar al de las muestras saturadas.

Palabras clave: módulo de corte, amortiguamiento, columna resonante, *Bender Element*, velocidad de onda.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecer a mis padres, Ruby y Javier, y también a Guillermo y Andrea, por todo el cariño y apoyo que me han entregado durante mi vida. Gracias por ser ejemplos a seguir y por mostrarme que en la vida uno jamás termina de aprender. A mis hermanas, Fernanda, Camila e Isidora, por su cariño y compañía.

A los amigos que han compartido conmigo desde que entré a la Universidad, Angélica, Verónica, Diego C., Diego P., Tatiana, Pablo, Libertad y Lemuel. A mis amigos de Ingeniería Civil, Natalia, Damián, David y Valentina por su compañía y ánimo. A mis amigas del colegio que siguen conmigo a pesar de los años, Muriel, María José, Maureen, Constanza y Ninoska. A mis compañeros de la sala de memoristas, en especial a Sergio por conseguirme un puesto.

A Omar González y Mario Carrillo, con quienes trabajé como “niña MECESUP”. Gracias por su tiempo y dedicación para ayudarme en la primera parte del proceso experimental.

A Mario Vásquez, Rodrigo Jara, Luis Chávez y quienes me acompañaron en el IDIEM, mientras usaba la columna resonante. Gracias Rodrigo por tu paciencia y buen ánimo ayudándome en el montaje del equipo.

A mi profesor guía Iván Bejarano, por sus consejos y experiencia. A los miembros de mi comisión Lenart González y Felipe Ochoa. A Carolina Smith por permitirme trabajar en el laboratorio. Gracias a todos, sus consejos me han ayudado a ser mejor persona no sólo en lo académico, también en lo cotidiano.

A mis compañeros del coro de la Facultad, con quienes pasé grandes momentos. A mis compañeros de la rama de andinismo de la universidad quienes me acompañan recorriendo y observando la naturaleza.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.1.1.	Objetivos Generales	2
1.1.2.	Objetivos Específicos	2
1.2.	Organización de la Tesis.....	2
2	Revisión Bibliográfica	3
2.1	Propiedades dinámicas de los suelos	3
2.1.1	Introducción	3
2.1.2	Ondas sísmicas	3
2.1.3	Módulo de corte	5
2.1.4	Amortiguamiento.....	7
2.1.5	Parámetros que afectan el módulo de corte y el amortiguamiento	8
2.2	Ensayos dinámicos de los suelos	14
2.2.1	Métodos Geofísicos	15
2.2.2	Bender Element	15
2.2.3	Columna Resonante	16
2.2.4	Ensayo Triaxial Cíclico	16
2.2.5	Corte simple cíclico.....	17
2.3	Resumen.....	17
3	Suelo ensayado, equipos y metodología	18
3.1	Suelo ensayado	18
3.1.1	Clasificación geotécnica del suelo ensayado	18
3.2	Metodología de Ensayos.....	20
3.2.1	Programa de Ensayos	20
3.2.2	Preparación de Probetas	21
3.3	Equipos utilizados, montaje y ensayo	23
3.3.1	Bender Element	23
3.3.2	Columna Resonante	26
4	Presentación y Análisis de Resultados	32
4.1	Módulo de rigidez al corte inicial	32
4.1.1	Ensayos de Bender Element	32
4.1.2	Ensayo de columna resonante	39
4.1.3	Módulo de rigidez al corte “ G_{max} ” y del amortiguamiento “D” a pequeñas y medianas deformaciones.	43
5	Análisis y conclusiones	53
6	Bibliografía	57
7	Anexos	60
7.1	Caracterización de arena de relave El Torito.	60
7.1.1	Granulometría.....	60
7.1.2	Hidrometría	62
7.1.3	Peso específico	65
7.1.4	Densidades mínima y máxima.....	67
7.1.5	Proctor Modificado.....	69
7.1.6	Densidad Relativa DR [%].	70

7.2	Bender Element	71
7.2.1	Generador de señales y su manejo	71
7.2.2	Osciloscopio digital y su manejo.....	72
7.3	Columna Resonante.....	73
7.3.1	Obtención de Parámetro de Rigidez (G).....	73
7.3.2	Obtención de Parámetro de Deformación Torsional.....	77
7.3.3	Calibración. Obtención de parámetro de inercia “I _o ”	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1.-Tipos de ondas sísmicas.....	4
Figura 2. 2.-Diagrama tensión-deformación en un material lineal (Santibañez, 2006).	5
Figura 2. 3.- Diagrama tensión-deformación de un material no lineal (Santibañez, 2006).	5
Figura 2. 4.-Degradación de rigidez y amortiguamiento respecto la deformación al corte (Z. Wu, 2014).	6
Figura 2. 5.-Límites “ γ_t^e ” y “ γ_t^v ” para distintas plasticidades de material (Vucetic, 1994) ..	7
Figura 2. 6.-Obtención del amortiguamiento (Ishihara, 1996)	7
Figura 2. 7.- “G _{max} ” vs grado de saturación “S _r ”. (S. Wu, Gray, & Richart Jr, 1984).....	9
Figura 2. 8.- “G _{max} ” o “G _o ” con respecto a “e” y “ σ'_c ” para arenas secas redondeadas (líneas continuas) y angulares (líneas discontinuas) (Hardin & Richart, (1963); adaptado).	11
Figura 2. 9.-Degradación de rigidez y amortiguamiento respecto al tipo de suelo.(Seed, Wong, Idriss, & Tokimatsu, 1986)	11
Figura 2. 10.-“G/G _{max} ” y “D” respecto el confinamiento efectivo “ σ'_c ” para arena remoldeada (Stokoe, 1993).	12
Figura 2. 11.- “G/G _{max} ” y “D” con respecto al índice de vacíos para arena de Toyoura (Kokusho, 1980).	12
Figura 2. 12.-“G/G _{max} ” con respecto a la deformación por corte, para distintos índices de plasticidad.	13
Figura 2. 13.- a) Esquema del ensayo triaxial cíclico. b) Curva histerética y obtención de resultados (Ishihara, 1996).	16
Figura 2. 14.-a) Esquema del ensayo de corte simple cíclico. b) Curva histerética y obtención de resultados. (Ishihara, 1996)	17
Figura 3. 1.-Sector de extracción de la arena de relaves estudiada.....	18
Figura 3. 2.-Distribución granulométrica y foto al microscopio del material estudiado. ...	19
Figura 3. 3.- Materiales de confección de probetas.....	22
Figura 3. 4.-Equipo Bender Element (Camacho-Tauta et al., 2012).	24
Figura 3. 5.-Elemento piezoeléctrico y Bender Element.....	24
Figura 3. 6.-Pantalla osciloscopio digital. Obtención de tiempo de llegada de onda "tt".	25
Figura 3. 7.-Sistema electromagnético. Ensayo a torsión (Izquierda); Ensayo a flexión (Derecha).(GDS Instruments., 2010).....	26
Figura 3. 8.-Equipo de columna resonante.....	27
Figura 3. 9.-Forma correcta de poner papel filtro y piedras porosas sobre los cap superior e inferior.	29

Figura 3. 10.-Montaje de Columna Resonante. N°1: Paso 1. N° 2: Pasos 2 a 4, donde la flecha indica la conexión de un tubo de drenaje. N°3: Pasos 5 a 6, donde las flechas indican las conexiones de bobinas. N°4: Paso 7, donde la flecha indica la conexión del acelerómetro. N° 5: Pasos 8 a 10. N° 6: Paso 11.	29
Figura 3. 11.-Curva de amortiguación (GDS Instruments., 2010).	30
Figura 4. 1.-Ensayos de Bender Element para “DR _o ” 35%. Tiempo de llegada de onda “tt”	32
Figura 4. 2.- Ensayos Bender Element para “DR _o ” 50%. Tiempo de llegada de onda “tt”.	33
Figura 4. 3.- Ensayos de Bender Element para “DR _o ” 70%. Tiempo de llegada de onda “tt”	34
Figura 4. 4.- Ensayos de Bender Element para “DR _o ” 85%. Tiempo de llegada de onda “tt”	35
Figura 4. 5.-Módulo de rigidez máxima “G _{max} ” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. Bender Element.	37
Figura 4. 6.- Módulo de rigidez máxima “G _{max} ” versus confinamiento por densidad relativa. Bender Element.....	38
Figura 4. 7.- Velocidad de onda de corte “V _s ” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. Bender Element.	38
Figura 4. 8.- Módulo de rigidez máxima “G _{max} ” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. Columna resonante.....	41
Figura 4. 9.- Módulo de rigidez máxima “G _{max} ” versus confinamiento por densidad relativa. Columna resonante.	41
Figura 4. 10.- Velocidad de onda de corte “V _s ” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. Columna resonante.....	42
Figura 4. 11.-Comparación de “G _{max} ” de ensayos de columna resonante CR y Bender Element BE.	43
Figura 4. 12.-Ensayo columna resonante para “DR _o ” del 35% por confinamiento para material saturado.....	44
Figura 4. 13.- Ensayo columna resonante para “DR _o ” del 50% por confinamiento para material saturado.....	45
Figura 4. 14.- Ensayo columna resonante para “DR _o ” del 70% por confinamiento para material saturado.....	46
Figura 4. 15.- Ensayo columna resonante para “DR _o ” del 85% por confinamiento para material saturado.....	47
Figura 4. 16.- Ensayo columna resonante 1[kg/cm ²] de confinamiento por distintas “DR _o ”. Material saturado.....	49
Figura 4. 17.- Ensayo columna resonante para “DR _o ” del 70% por confinamiento para muestra al 5% de saturación.....	50
Figura 4. 18.-Ensayos de arena saturada respecto a muestras al 5% de S _r ” para “DR _o ” del 70%.	52
Figura 5. 1.-Resultados de memoria comparados con resultados históricos, para “σ’ _c ” = 1kg/cm ² .(Khouri, 1984).....	55
Figura 7. 1.-Distribución granulométrica de arena del muro del tranque de relaves "El torito"	65
Figura 7. 2.-Ensayo proctor modificado.....	69

Figura 7. 3.-Generador de señales.....	71
Figura 7. 4.-Osciloscopio digital.	72
Figura 7. 5.-Ondas torsionales en un elemento diferencial de suelo.....	73
Figura 7. 6.- Obtención del parámetro “ θ ”	78
Figura 7. 7.-Barras de calibración.	78
Figura 7. 8.-Obtención de “ I_o ”	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1.-Parámetros que afectan la resistencia al corte y amortiguamiento.(Hardin & Drnevich, 1972)	8
Tabla 2. 2.- Constantes de ecuaciones de “ G_{max} ” (Ishihara, (1996) & Kokusho, (1981))	10
Tabla 3. 1.- Caracterización geotécnica de arena de relaves.....	19
Tabla 3. 2.-Programa de ensayos.	20
Tabla 7. 1.-Granulometría 1.	60
Tabla 7. 2.-Granulometría 2.	61
Tabla 7. 3.-Granulometría 3.	61
Tabla 7. 4.-Granulometría 4.	61
Tabla 7. 5.-Granulometría 5.	62
Tabla 7. 6.-Parámetro A. Norma ASTM D422.	63
Tabla 7. 7.-Hidrometría 1.	63
Tabla 7. 8.-Hidrometría 2.	64
Tabla 7. 9.-Peso específico 1.	66
Tabla 7. 10.- Peso específico 2.	66
Tabla 7. 11.- Peso específico 3.	66
Tabla 7. 12.- Peso específico 4.	66
Tabla 7. 13.- Peso específico 5.	67
Tabla 7. 14.-Densidad mínima del material usando método por deposición lenta.	68
Tabla 7. 15.-Densidad máxima del material usando método japonés.	68
Tabla 7. 16.-Ensayo proctor modificado. En amarillo está la densidad máxima.....	69
Tabla 7. 17.-Tabla de densidad relativa.	70
Tabla 7. 18.- Valores de “ β ” comúnmente encontrados para “ I/I_o ”	76
Tabla 7. 19.-Inercias barras de calibración y pesos.	80
Tabla 7. 20.-Cálculos para la obtención de “ I_o ”	80

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Chile es un país sísmico, donde el suelo se ve afectado por movimientos sísmicos, afectando las construcciones sobre él. Por esto, es de suma importancia conocer las propiedades dinámicas del suelo (módulo de rigidez máxima, degradación de rigidez y amortiguamiento) para la correcta ejecución de proyectos de ingeniería.

La obtención de los parámetros de rigidez “G” y amortiguamiento “D” es importante porque permite estimar la amplificación de ondas sísmicas a través de los suelos, con lo cual se puede construir un espectro sísmico de respuesta.

Existen distintos ensayos que pueden medir los parámetros “G” y “D”, los cuales excitan suelos de pequeñas a grandes deformaciones. En este trabajo de título se usó el equipo de columna resonante del IDIEM, el cual funciona a pequeñas y medianas deformaciones. Mediante el uso del equipo se obtendrán los parámetros dinámicos de la arena de relave del muro del tranque El Torito, perteneciente a la mina de cobre El Soldado. Los resultados se compararán con los obtenidos con el equipo *Bender Element* del IDIEM, capaz de obtener el módulo de corte no degradado “G_o” o “G_{max}”.

La columna resonante es un equipo que excita dinámicamente una probeta de suelo a rangos de pequeñas y medianas deformaciones, mediante uso de imanes y bobinas. Con el equipo se encuentra la frecuencia fundamental de la probeta, la cual permite la obtención de los parámetros previamente mencionados (Kramer, 1996). El equipo es instrumentado y automatizado, lo cual minimiza el tiempo de ejecución del ensayo.

Cabe destacar que el equipo de columna resonante a utilizar fue recientemente adquirido por el IDIEM y es el segundo de este tipo que existe en el país.

En Chile recién se está comenzando a obtener curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento con el equipo de columna resonante, lo cual motiva a realizar y hacer investigación en suelos de interés dinámico.

1.2 OBJETIVOS

1.1.1. Objetivos Generales

Análisis de propiedades dinámicas “G” y “D” de arena de relaves del tranque El Torito mediante uso de columna resonante.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Obtener “ G_{max} ” con columna resonante y comparar los resultados con ensayos de *Bender Element*.
- Obtener la curva de degradación de rigidez y amortiguamiento para el material seleccionado a distintas densidades del material y presiones de confinamiento usando columna resonante.
- Analizar los resultados obtenidos.

1.2. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El primer capítulo es una introducción al trabajo, donde se describen las principales motivaciones y objetivos que dieron origen a esta investigación.

El segundo capítulo presenta una descripción detallada de los estudios previos que sustentan esta investigación y que conforman su marco teórico. Dentro de los temas abordados se encuentran las propiedades dinámicas de los suelos y sus métodos de medición.

El tercer capítulo entrega una completa descripción de los equipos usados en esta investigación y la caracterización geotécnica del suelo empleado. Además, describe la metodología desarrollada para llevar a cabo la parte experimental de la memoria.

El cuarto capítulo muestra el detalle de los resultados obtenidos de la campaña experimental.

El quinto capítulo expone las conclusiones obtenidas para los objetivos trazados en el primer capítulo.

El sexto capítulo entrega las referencias de la memoria.

El séptimo capítulo expone los anexos de la memoria.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS

2.1.1 Introducción

Vibraciones de maquinaria, terremotos o tronadura de rocas son ejemplos de problemas de ingeniería donde el suelo está sometido a una carga cíclica. En estas situaciones, el conocimiento de la magnitud de la carga es insuficiente para evaluar la respuesta del suelo; es necesario tener en cuenta la repetitividad y la reversibilidad a lo largo de la duración de cada ciclo de carga para analizar el problema apropiadamente. La dinámica de suelos puede resolver problemas que implican varios órdenes de magnitud en ambas escalas de frecuencia y tiempo.

Bajo movimiento sinusoidal, las fuerzas de inercia aumentan en proporción al cuadrado con la frecuencia de excitación. Por lo tanto, aún en pequeñas deformaciones, las fuerzas de inercia tienen una importancia significativa. Por consiguiente, la dinámica de suelos y los bajos niveles de deformación son dos conceptos altamente relacionados (Camacho-Tauta, 2011).

La dinámica de suelos es una extensa disciplina que estudia distintas temáticas tales como: comportamiento y respuesta del suelo durante la aplicación de carga dinámica, sus propiedades dinámicas (módulo de corte, amortiguamiento y el comportamiento de ondas, principalmente). Es importante saber que mediante este estudio se obtiene información que contribuye a la ejecución de proyectos y resolución de problemas de ingeniería (López & Cruz, 2012).

2.1.2 Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son un tipo de onda elástica consistentes en la propagación de perturbaciones temporales del campo de tensiones que generan pequeños movimientos en un medio.

Las ondas sísmicas pueden ser generadas por movimientos sísmicos naturales. Existe toda una rama en la sismología que se encarga del estudio de este tipo de fenómenos físicos. Las ondas sísmicas pueden ser generadas también artificialmente mediante el empleo de explosivos o camiones vibradores (Díaz, 2005). Según su forma de propagación, las ondas se pueden clasificar como ondas superficiales (ondas de Rayleigh y Love) u ondas de cuerpo (ondas de compresión y corte).

La dinámica de suelos, relaciona propiedades como el módulo de rigidez y el amortiguamiento, con procesos y fenómenos indispensables como son las ondas, elemento básico que se mide y donde se valora especialmente la velocidad onda de corte (López & Cruz, 2012).

2.1.2.1 Ondas Rayleigh

Rayleigh, (1985) predijo la presencia de ondas superficiales, diseñando matemáticamente el movimiento de ondas planas en un espacio semi-infinito elástico. Las ondas de Rayleigh ilustradas en la Figura 2. 1 causan un movimiento rodante parecido a las ondas del mar y sus partículas se mueven en forma elipsoidal en el plano vertical, que pasa por la dirección de propagación. En la superficie, el movimiento de las partículas es retrógrado con respecto al avance de las ondas (López & Cruz, 2012).

2.1.2.2 Ondas de Love

Las ondas de Love (Figura 2. 1) son superficiales y producen un movimiento horizontal de corte en superficie. Se denominan así en honor al matemático Augustus Love, quien desarrolló un modelo matemático de estas ondas (Love, 1911).

2.1.2.3 Ondas de compresión

Llamadas también ondas “p”, longitudinales o de compresión. Bajo este tipo de onda, las partículas, oscilan en el mismo sentido de su dirección de propagación. Las ondas de compresión “p” (Figura 2. 1) son parecidas a las ondas sonoras ordinarias y son más rápidas que las ondas transversales “s”; es decir, después de un temblor, a un punto específico llegan primero las ondas “p”, y segundo las ondas “s”(Kramer, 1996).

2.1.2.4 Ondas transversales

Conocidas también como ondas de corte u ondas "s". Bajo este tipo de onda, las partículas oscilan perpendicularmente a su dirección de propagación (Figura 2. 1, Kramer, (1996)).

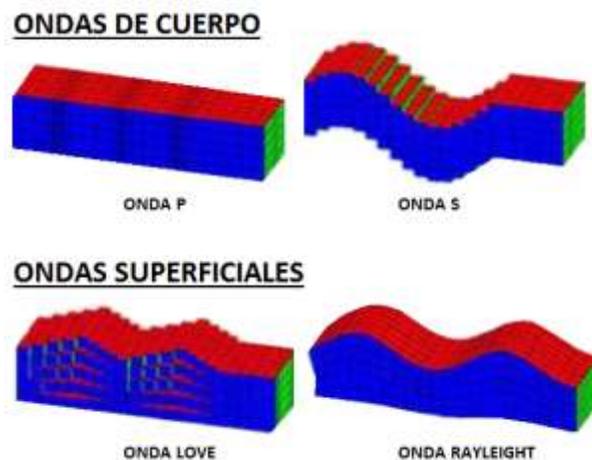


Figura 2. 1.-Tipos de ondas sísmicas.

2.1.3 Módulo de corte

El módulo de corte “G” es un parámetro ingenieril importante en un amplio rango de aplicaciones geotécnicas como son los casos de: diseño de fundaciones, predicciones de asentamiento, mejoramiento del control del suelo y evaluación de licuefacción. Este módulo, describe el comportamiento del suelo bajo cargas de trabajo y movimientos sísmicos (López & Cruz, 2012).

El módulo de corte a pequeñas deformaciones se puede definir como la relación entre la tensión de corte “ τ ” y la deformación al corte “ γ ” y se deriva directamente de la ley de Hooke.

$$G = E/(2(1 + \nu)); G = \tau/\gamma \quad (2.1)$$

Donde “E” es el módulo de Young y “ ν ” es el coeficiente de Poisson del suelo.

La respuesta que presenta un suelo frente a las deformaciones se puede obtener en un diagrama de tensión-deformación. En un material lineal, la gráfica se presenta como una línea recta, mientras que uno no lineal (como el suelo), se genera una curva donde el módulo varía a lo largo de ésta. Por consiguiente, se definen varios módulos de corte: máximo “ G_{\max} ”, secante “ G_{sec} ” y tangente “ G_{tan} ”, representados en las Figura 2. 2 y Figura 2. 3 (Santibáñez, 2006):

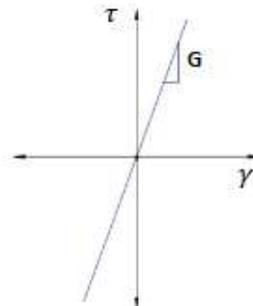


Figura 2. 2.-Diagrama tensión-deformación en un material lineal (Santibáñez, 2006).

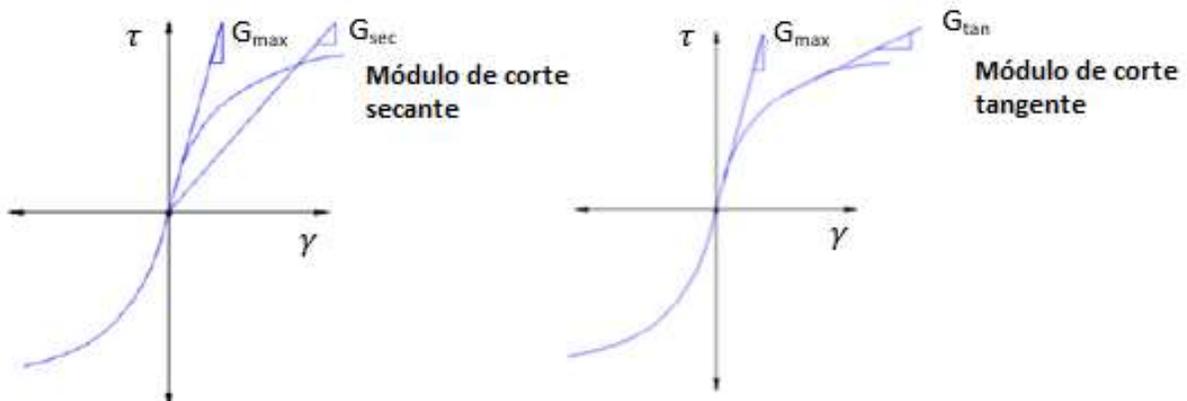


Figura 2. 3.- Diagrama tensión-deformación de un material no lineal (Santibáñez, 2006).

Es común encontrar la representación del módulo de corte versus la deformación al corte, conocida como curva degradación de rigidez. Se observa que el módulo de corte disminuye a medida que aumenta la deformación, mientras que el amortiguamiento aumenta (Figura 2. 4).

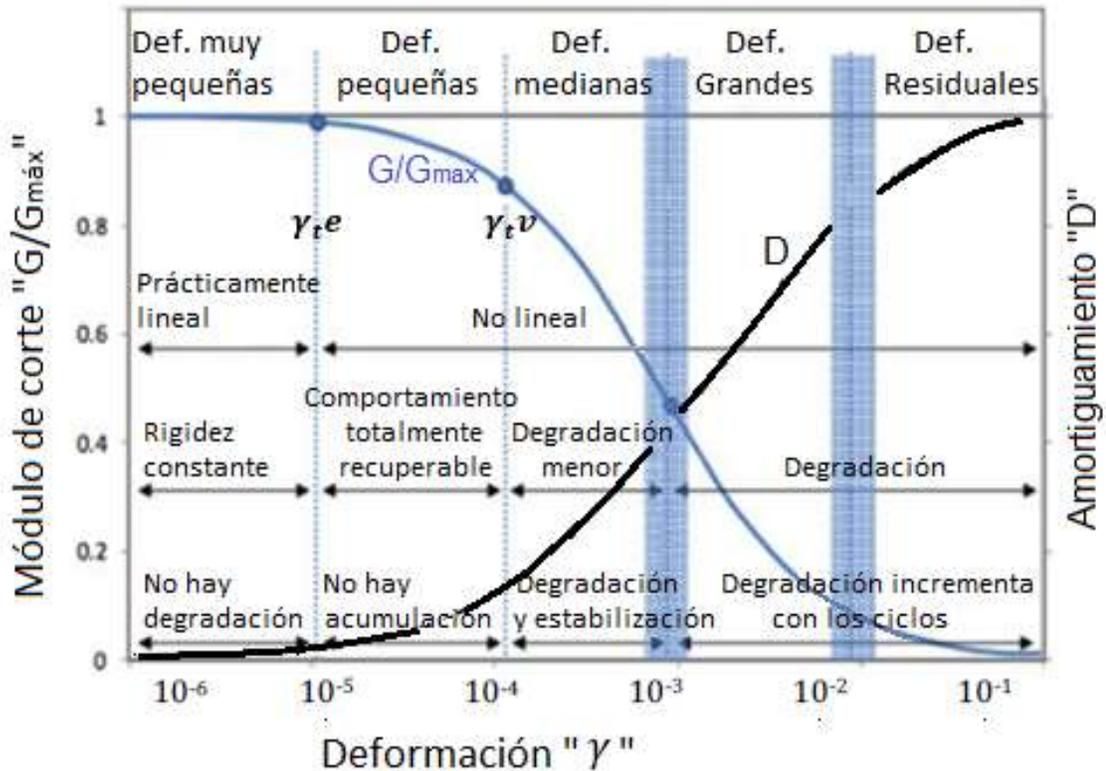


Figura 2. 4.-Degradación de rigidez y amortiguamiento respecto a la deformación al corte (Z. Wu, 2014).

El módulo de corte de un suelo se mantiene relativamente constante hasta " γ_t^e " ($G/G_{\max} \sim 0,99$), donde se considera que este sólo puede desarrollar deformación elástica. Después, el módulo disminuye al aumentar las deformaciones y el suelo comienza a comportarse como un material elasto-plástico hasta " γ_t^v ", donde este aún no se ve alterado ($G/G_{\max} \sim 0,6$ y $0,85$) (Vucetic, 1994).

Los límites unitarios de " γ_t^e " van entre 10^{-6} y 10^{-4} y de " γ_t^v " entre 10^{-4} y 10^{-3} . Estos varían respecto a la plasticidad del material, aumentando a medida que crece (Figura 2. 5).

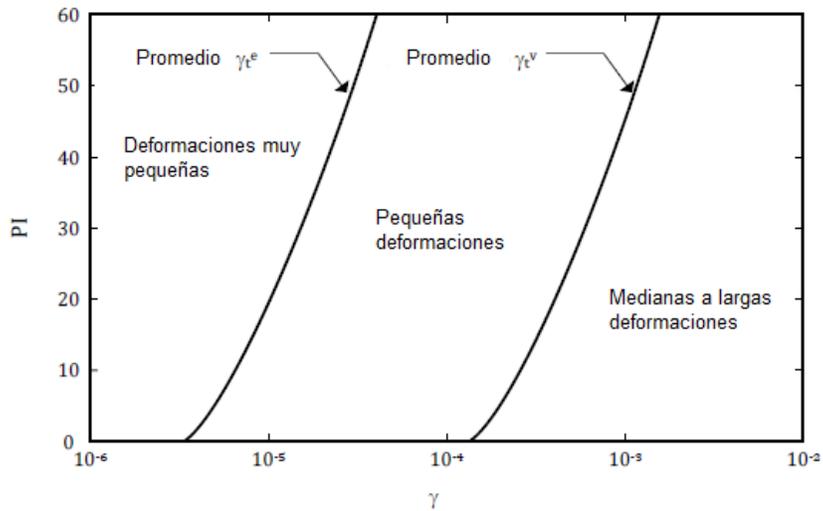


Figura 2. 5.-Límites “ γ_r^e ” y “ γ_r^v ” para distintas plasticidades de material (Vucetic, 1994)

2.1.4 Amortiguamiento

El amortiguamiento se describe como la disipación de energía del suelo durante la deformación dinámica y cuantifica los fenómenos en que la vibración de un material disminuirá en amplitud y eventualmente desaparecerá después de que la excitación haya cesado (López & Cruz, 2012).

El amortiguamiento “D”, se define por la siguiente ecuación:

$$D = \frac{\Delta W}{4\pi * W} = \frac{1 * A_{\text{lazo}}}{2\pi * G_{\text{sec}} * \gamma_a^2} \quad (2.2)$$

Donde “ ΔW ” es la energía disipada, “ W ” es la energía de deformación máxima, “ A_{lazo} ” es el área del lazo del ciclo de histéresis, “ G_{sec} ” es el módulo de corte secante e “ γ_a ” es la deformación (Figura 2. 6).

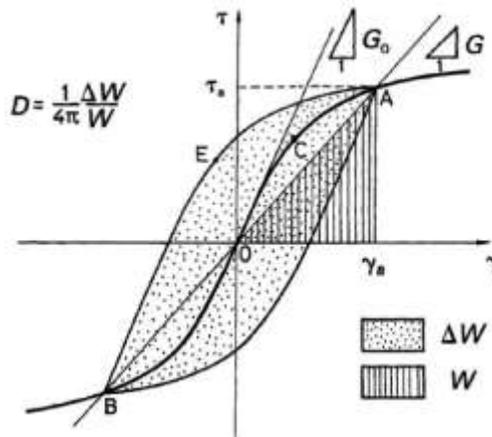


Figura 2. 6.-Obtención del amortiguamiento (Ishihara, 1996)

El amortiguamiento, para pequeñas deformaciones, se puede medir usando la teoría de la vibración, siendo descrita por el decremento logarítmico (Ecuación 2.4), que se define como el logaritmo natural de dos amplitudes sucesivas de movimiento:

$$D = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (2.3)$$

Donde “A” es la amplitud.

En ensayos de columna resonante, el decremento logarítmico se puede determinar experimentalmente, manteniendo la muestra de suelo en vibración constante y, posteriormente, desconectando la potencia para simular una condición de vibraciones libres (Richard, Woods, & Hall Jr, 1970). Otro método para medir la amortiguación es el “método del ancho de banda”, donde este parámetro se asocia a la diferencia entre dos frecuencias que corresponden a la misma amplitud (Das, 1993).

2.1.5 Parámetros que afectan el módulo de corte y el amortiguamiento

Los parámetros que afectan estas propiedades están representados en la Tabla 2. 1. La influencia de estos parámetros está dividida en 4 categorías: muy importante (V), menos importante (L), relativamente sin importancia (R) y sin importancia (U).

Tabla 2. 1.-Parámetros que afectan la resistencia al corte y amortiguamiento. (Hardin & Drnevich, 1972)

Parámetro	Importancia			
	Módulo de Corte		Amortiguamiento	
	Arena Limpia	Suelo Cohesivo	Arena Limpia	Suelo Cohesivo
Deformación “ γ ”	V	V	V	V
Confinamiento efectivo “ σ'_c ”	V	V	V	V
Índice de vacíos “e”	V	V	V	V
Número de ciclos de carga	R	R	V	V
Grado de saturación “ S_r ”	R	V	L	U
Índice de sobreconsolidación “OCR”	R	L	R	L
Línea de estado último “LEU”	L	L	L	L
Historia de carga “H”	L	L	L	L
Frecuencia de carga “f”	R	R	R	L
Características del suelo “C”	R	R	R	R
Estructura del suelo “ θ ”	R	R	R	R

El módulo de corte inicial o máximo “ G_{max} ” crece con “f”, “ σ'_c ”, “OCR”, “H” e índice de plasticidad “IP” (si “OCR” > 1; si no se mantiene), y disminuye con “e”. Otros factores que afectan “ G_{max} ” son “C” y “ θ ”, asociados a las características y estructura del suelo. A mayor contenido de finos y/o mejor granulometría, “ G_{max} ” disminuye (Iwasaki & Tatsuoka, 1977), mientras que a mayor de cementación, “ G_{max} ” aumenta. El número de ciclos “N” no afecta “ G_{max} ” a pequeñas deformaciones de corte (menores a 0,01%) (Whitman & Dobry, 1997).

El módulo “ G_{max} ” varía respecto el grado de saturación (Figura 2. 7), teniendo un óptimo en saturaciones entre el 5% y el 18%. Al óptimo grado de saturación, “ G_{max} ” puede ser significativamente mayor respecto al del suelo seco. Después del 75% saturación no hay mayores variaciones del módulo de corte máximo.

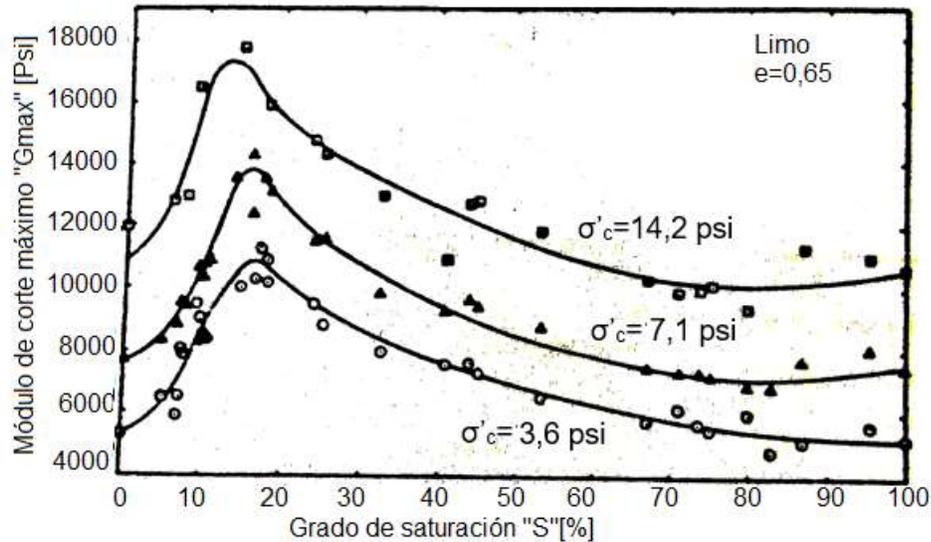


Figura 2. 7.- “ G_{max} ” vs grado de saturación “ S_r ”. (S. Wu, Gray, & Richart Jr, 1984)

El confinamiento efectivo “ σ'_c ” e índice de vacíos “ e ” afectan en gran medida al módulo de corte y al amortiguamiento del suelo. Hardin & Richart, (1963) parametrizaron resultados de “ G_{max} ” en base a “ V_s ”, con curvas de regresión de la siguiente forma:

$$V_s = C * (B - e) * (\sigma'_c)^{n/2} \quad (2.4)$$

$$G_{max} = \rho * V_s^2 = A * \frac{(B-e)^2}{1+e} * (\sigma'_c)^n = A * F(e) * (\sigma'_c)^n \quad (2.5)$$

Donde “ A ”, “ B ” y “ n ” son constantes empíricas determinadas experimentalmente, “ e ” es el índice de vacíos y “ σ'_c ” es el confinamiento efectivo en [kPa]. El parámetro “ n ” se obtiene a partir de la relación de potencia entre “ G_{max} ” y “ σ'_c ”, éste indica el grado de contacto entre las partículas del suelo (Cascente & Santamarina, 1996). El parámetro “ B ” se consigue de la relación lineal del gráfico de “ V_s ” con respecto a “ e ”. Finalmente, “ A ” es el coeficiente que mejor se ajusta a las curvas de “ G_{max} ” (Whitman & Dobry, 1997).

Más adelante, Ishihara, (1996) reunió resultados experimentales que fueron complementados por Kokusho, (1981) con datos de distintos autores de diferentes ensayos para arenas, arcillas y gravas. La Tabla 2. 2 presenta los datos disponibles de referencias citadas y otras publicaciones recientes. Se puede agregar lo siguiente:

- El parámetro “ n ” va entre 0,34 y 0,70; para arenas, en general, entre 0,3 y 0,5. El parámetro “ B ” es alrededor de 2 para arenas y “ A ” es del orden de 10^3 .

- Los módulos de corte máxima varían con respecto al tipo de suelo. Para arcillas, “ G_{max} ” va aproximadamente hasta los 100 [Mpa], las arenas van entre los 100 y 400 [Mpa] y los módulos mayores se asocian a las gravas.

Tabla 2. 2.- Constantes de ecuaciones de “ G_{max} ” (Ishihara, (1996) & Kokusho, (1981))

Referencia	A	B	N	Tipo de suelo	Método
(Hardin & Richart, 1963)	7000	2,17	0,5	Arena de Ottawa Redondeada $e= 0,37-0,79$; $\sigma'_c= 24-287$ [kPa]	RC
(Hardin & Richart, 1963)	3300	2,97	0,5	Cuarzo triturado $e= 0,63-1,27$; $\sigma'_c= 24-287$ [kPa]	RC
(Iwasaki & Tatsuoka, 1977)	14100	2,17	0,4	11 tipos de arena limpia $e= 0,55-0,88$; $\sigma'_c= 20-400$ [kPa]	RC
(Kokusho, 1980)	8400	2,17	0,5	Arena de Toyoura $e= 0,64-0,80$; $\sigma'_c= 20-300$ [kPa]	CTX
(Yu & Richart, 1984)	7000	2,17	0,5	3 tipos de arena limpia	RC
(Gomes Correia et al., 1993)	5000	2,41	0,5	Arena limosa. 41% de finos: $PI=9$ $e= 0,57$; $\sigma'_c= 50-200$ [kPa]	RC
(Gomes Correia et al., 1963)	9000	2,17	0,5	Arena. $D_{50}=0,65$ [mm] $e= 0,59-0,74$; $\sigma'_c= 50-200$ [kPa]	RC
(Hardin & Black, 1968)	3300	2,97	0,5	Arcillas de baja plasticidad $e= 0,6-1,5$; $\sigma'_c= 240-700$ [kPa]	RC
(Marcuson & Wahls, 1972)	4500	2,97	0,5	Kaolinita. $PI=35$ $e= 1,1-1,3$; $\sigma'_c= 70-550$ [kPa]	RC
(Marcuson & Wahls, 1972)	450	4,4	0,5	Bentonita. $PI=60$ $e= 1,8-2,4$; $\sigma'_c= 70-550$ [kPa]	RC
(Kokusho et al., 1982)	141	7,32	0,6	Arcilla no alterada. $PI=40-85$ $e= 1,4-4$; $\sigma'_c= 20-500$ [kPa]	CTX
(Heelis & Gomes Correia, 1998)	350	9	0,5	Turba $e= 4-5$; $\sigma'_c= 50-70$ [kPa]	RC
(Santos et al., 1999)	520	5	0,5	Arcilla limosa. $PI=40-42$ $e= 1,32-2$; $\sigma'_c= 20-200$ [kPa]	RC
(Prange, 1981)	7230	2,97	0,38	Balasto. $D_{50}=40$ [mm] $e= 0,68-0,78$; $\sigma'_c= 60-100$ [kPa]	RC
(Kokusho & Esashi, 1981)	13000	2,17	0,55	Roca triturada. $D_{50}=30$ [mm] $e= 0,39-0,58$	CTX
(Kokusho & Esashi, 1981)	8400	2,17	0,6	Grava redondeada. $D_{50}=10$ [mm] $e= 0,32-0,43$	CTX

La Figura 2. 8 muestra un ejemplo donde se observa como varía “ G_{max} ” con respecto a distintos confinamientos efectivos “ σ'_c ” e índices de vacíos “ e ”.

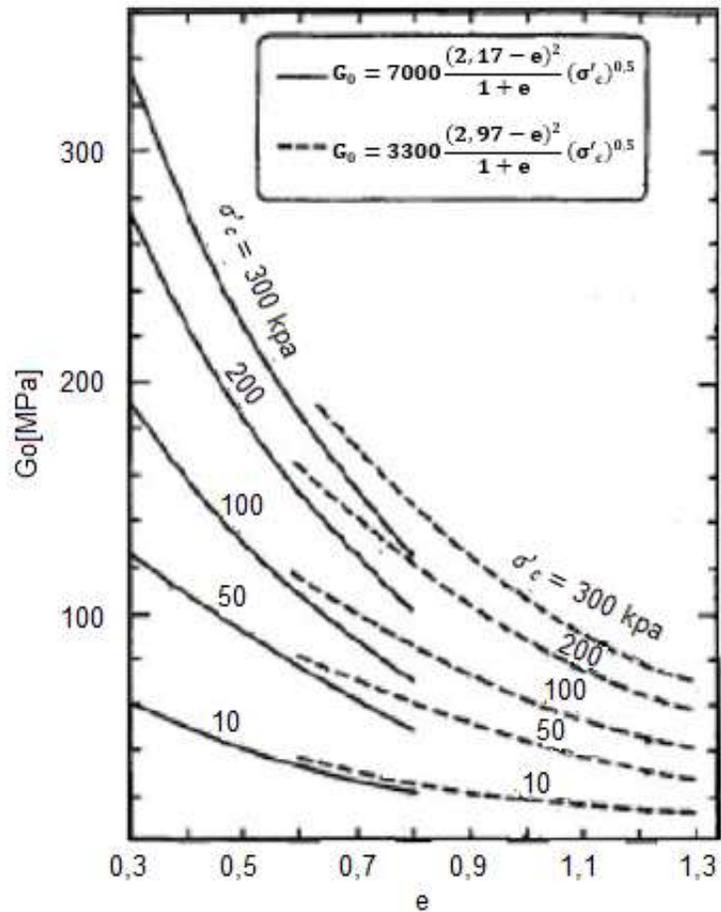


Figura 2. 8.- " G_{max} " o " G_0 " con respecto a " e " y " σ'_c " para arenas secas redondeadas (líneas continuas) y angulares (líneas discontinuas) (Hardin & Richart, (1963); adaptado).

Se observa que " G_{max} " aumenta con " σ'_c " y disminuye con el aumento " e ".

La degradación de rigidez y amortiguamiento dependen del tipo de suelo. Arenas y gravas tienen mayor degradación de rigidez y amortiguamiento respecto las arcillas.

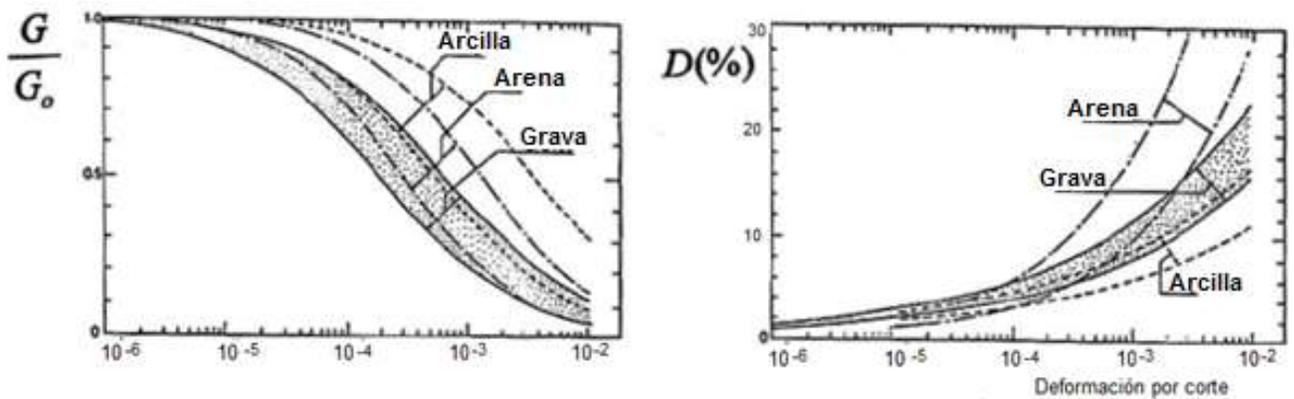


Figura 2. 9.-Degradación de rigidez y amortiguamiento respecto al tipo de suelo.(Seed, Wong, Idriss, & Tokimatsu, 1986)

Para arenas, a mayor confinamiento efectivo, “ G/G_{max} ” es mayor y “ D ” menor (Figura 2. 10). A altos índices de vacíos hay menor “ G/G_{max} ”, no obstante, en general este parámetro tiene poca influencia sobre la degradación de rigidez y ninguna sobre el amortiguamiento (Figura 2. 11).

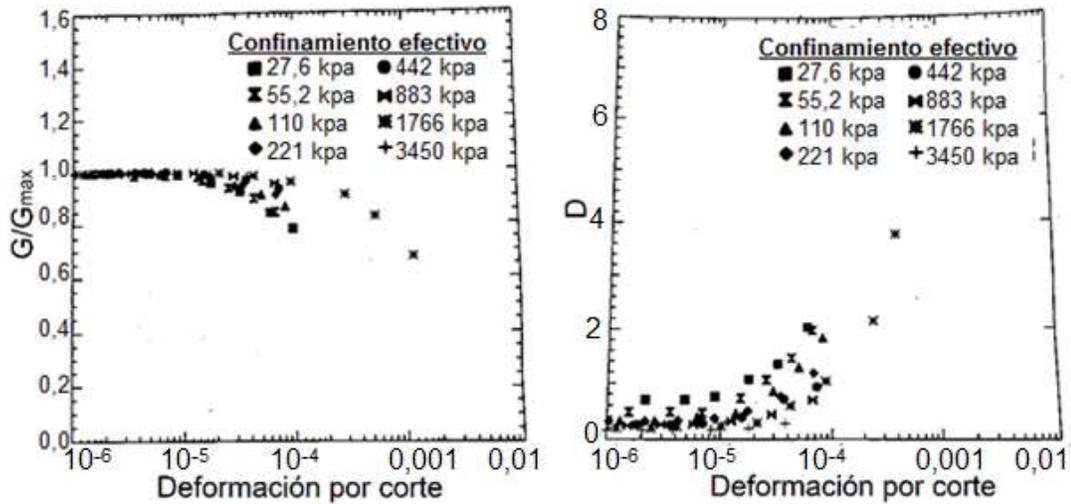


Figura 2. 10.-“ G/G_{max} ” y “ D ” respecto el confinamiento efectivo “ σ'_c ” para arena remoldeada (Stokoe, 1993).

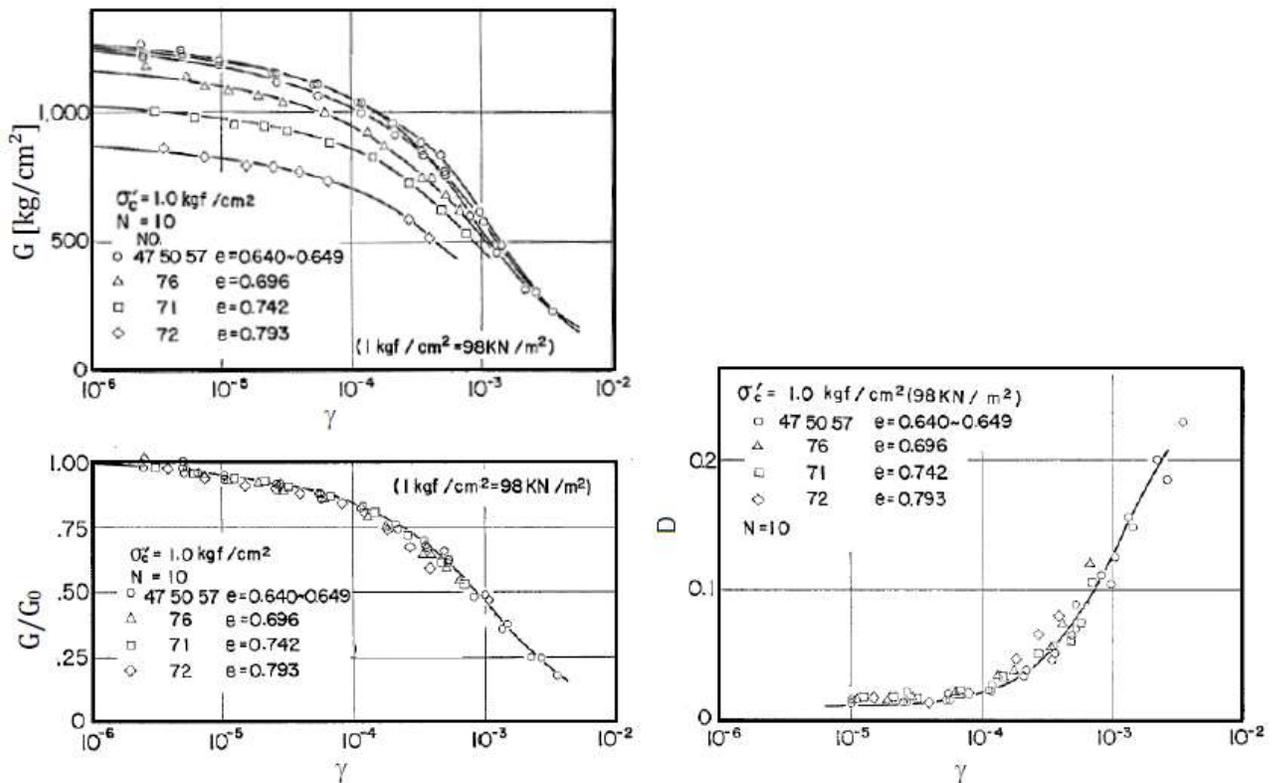


Figura 2. 11.- “ G/G_{max} ” y “ D ” con respecto al índice de vacíos para arena de Toyoura (Kokusho, 1980).

De la figura anterior se observa que los módulos de rigidez se encuentran en un punto a medida que aumentan las deformaciones.

Para arcillas, a mayor confinamiento efectivo, “ G/G_{max} ” aumenta y “ D ” disminuye, o se mantiene constante para altas plasticidades (Figura 2. 12). A mayor índice de vacíos y plasticidad, “ G/G_{max} ” aumenta y la amortiguación disminuye (Camacho-Tauta, 2011).

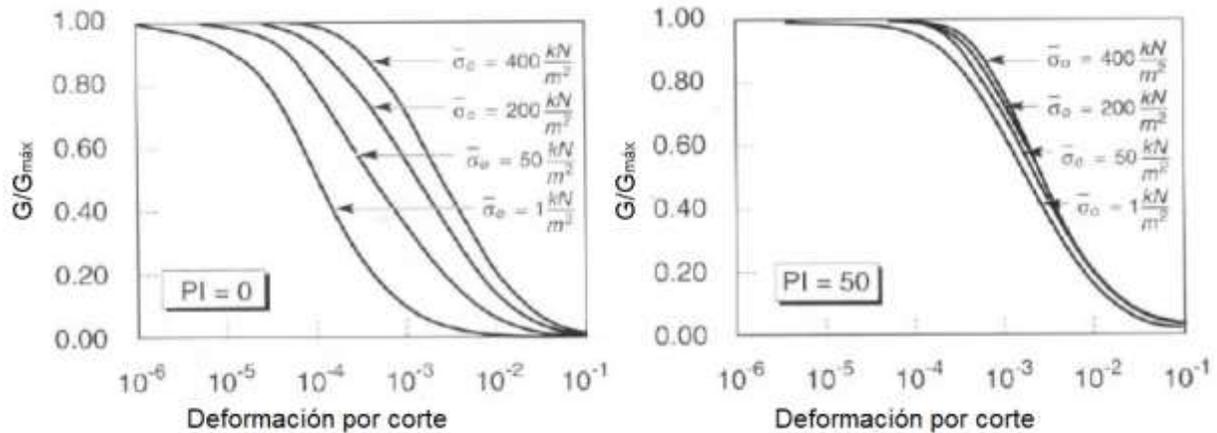


Figura 2. 12.-“ G/G_{max} ” con respecto a la deformación por corte, para distintos índices de plasticidad.

El comportamiento de las gravas es similar al de las arenas.

Para ensayos saturados, es importante diferenciar entre cargas dinámicas drenadas y no drenadas. Si el corte cíclico es aplicado lo suficientemente lento en una condición completamente drenada, sin presiones de poros producidas por la carga, entonces la saturación del material no afectará los parámetros dinámicos del suelo (Whitman & Dobry, 1997).

En ensayos cíclicos no drenados para suelo saturado, donde se generan presiones de poros, la respuesta del suelo depende de la deformación de corte “ γ ”. A pequeñas deformaciones de corte (“ $\gamma < 0,001\%$ ”), la frecuencia de carga “ f ” afecta los parámetros dinámicos del suelo, en especial al amortiguamiento “ D ”, que disminuye; a deformaciones de corte entre $0,001\%$ y $0,01\%$, el rol de “ f ” sobre “ D ” decrece, y los valores de “ G ” y “ G/G_{max} ” no se ven afectados; a mayores deformaciones el efecto de “ f ” es despreciable y el valor de “ G ” disminuye con el número de ciclos “ N ”(Whitman & Dobry, 1997).

En ensayos de columna resonante, que se comportan de forma no drenada, donde hay una alta frecuencia de carga cíclica y pequeñas deformaciones, el amortiguamiento es mayor para arenas saturadas (Whitman & Dobry, 1997).

2.2 ENSAYOS DINÁMICOS DE LOS SUELOS

Existen mecanismos in situ y en laboratorio para medir las propiedades dinámicas de los suelos. Las ventajas y desventajas de estas técnicas han sido discutidas por un gran número de investigadores (Richard et al., 1970; Stokoe, Darendeli, Andrus, & Brown, 1999; Luna & Jaid, 2000; entre otros).

La principal ventaja de los métodos in situ (prueba de campo) es la ausencia de cualquier alteración del material estudiado, sin embargo, es imposible controlar las condiciones externas y el estado de tensión, por lo cual no se puede separar el efecto de estos factores ni estudiar su influencia de manera individual. También la interpretación de estos métodos es habitualmente compleja, debido a la heterogeneidad de los suelos en terreno.

Los métodos de laboratorio permiten pruebas bajo condiciones controladas, lo que es útil para realizar estudios paramétricos. Las desventajas de estos métodos son: el tamaño de la muestra puede no ser lo suficientemente representativa para el depósito de suelo; las condiciones del lugar no están siempre bien reproducidas por los equipos de laboratorio; el grado de alteración de la muestra de suelo durante su perforación y extracción podría ser irreversible (Camacho Tauta, 2011).

En general, hay tres maneras de medir las propiedades dinámicas del suelo. La primera es medir la velocidad de propagación de la onda de corte " V_s " del suelo mediante métodos geofísicos in situ a bajas deformaciones (rango de 10^{-7} a 10^{-6}) y luego convertirla a módulo de corte usando la ecuación (2.2). La segunda técnica es medir la fuerza y deformación del suelo para obtener el módulo de Young y usar la ecuación (2.1) para obtener el módulo de corte (suponiendo conocido el módulo de Poisson " ν "). El tercer enfoque es medir la resistencia al corte y deformación de corte para determinar directamente módulo de corte (Kramer, 1996).

Se requiere de mediciones de laboratorio para determinar la degradación del módulo de corte con respecto a la deformación al corte. Para medir las propiedades dinámicas del suelo de pequeñas a medianas deformaciones las técnicas más populares son los métodos de Columna Resonante y *Bender Element* (ensayos dinámicos de laboratorio). Para grandes niveles de deformación se usan pruebas como el equipo triaxial cíclico y el corte directo cíclico (ensayos cíclicos de laboratorio).

2.2.1 Métodos Geofísicos

Las propiedades elásticas de los materiales que componen el suelo son fundamentales para la caracterización geotécnica sísmica de un sitio, pues permiten evaluar el comportamiento dinámico del suelo para perturbaciones que generen pequeñas deformaciones.

El perfil de velocidades de ondas de corte " V_s " es clave, pues permite conocer la respuesta del esqueleto sólido del suelo independiente de la presencia de agua intersticial. Aunque el perfil V_s no describe completamente un sitio por sí solo, sugiere características muy importantes como el tipo de suelo en relación a su rigidez, estratigrafía, etc. Si bien en el caso de licuación se inducen grandes deformaciones, su ocurrencia depende entre otras cosas del estado inicial de los materiales, que pueden ser evaluados por medio de sus propiedades elásticas.

Estos ensayos geofísicos se clasifican como activos o pasivos, dependiendo del tipo de fuente que se use. Los más usados en ingeniería geotécnica son los ensayos activos, en que la fuente activa genera una vibración que se transmite a través del medio. Los ensayos pasivos se usan cuando el ruido es utilizado como fuente. Los métodos sísmicos también se pueden clasificar como no intrusivos, si todos los instrumentos se instalan sobre la superficie del terreno; o como intrusivos, si los geófonos y/o las fuentes se instalan dentro de los sondajes. Los ensayos sísmicos intrusivos más comunes son el *Downhole* y *Crosshole*. Entre los ensayos sísmicos no intrusivos de fuente activa están el de reflexión y refracción sísmica; entre ensayos intrusivos de fuente no activa (vibraciones) están el *Steady-State Rayleigh Method (SSRM)*, *Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)*, *Frequency Wave Number Spectrum (f-k)*, *Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW)* y el *Continuous Surface Waves (CSW)* (López & Cruz, 2012).

2.2.2 Bender Element

El ensayo *Bender Element* mide la velocidad de onda de corte en la muestra de suelo a pequeñas deformaciones. El equipo consta de un emisor y un transmisor, los cuales se construyen mediante la unión de dos materiales piezoeléctricos, de tal manera que la tensión eléctrica aplicada a través éstos causa que uno se expanda y el otro se contraiga, forzando a la probeta a corte mediante voltaje alterno (Shirley & Anderson, 1975). La onda de corte es producida por el transmisor y recibida por el receptor. La diferencia de tiempo entre las dos señales es calculable y la distancia recorrida por la onda es conocida, entregando así la velocidad de la onda de corte " V_s " de la muestra de suelo. A pesar de su aparente simplicidad, aún no existe una norma para este ensayo.

Debido a que este equipo se usará durante la memoria, hay una explicación más detallada de éste en el capítulo 3.

2.2.3 Columna Resonante

El ensayo de columna resonante es ocupado para determinar las propiedades dinámicas de los suelos a pequeñas y medianas deformaciones. El equipo somete cilindros sólidos o huecos, en condiciones alteradas o inalteradas, a cargas torsionales o de flexión mediante un sistema electromagnético. La frecuencia y amplitud de las cargas pueden ser controladas, la carga puede ser armónica, aleatoria o de impulso (Kramer, 1996). El ensayo está normalizado bajo la designación D4015-15, (2016).

Con el ensayo de columna resonante se puede obtener la frecuencia fundamental del suelo ensayado, a partir de la cual se consiguen parámetros de degradación de rigidez y amortiguamiento.

Debido a que este equipo se usará durante la memoria, hay una explicación más detallada de éste en el capítulo 3.

2.2.4 Ensayo Triaxial Cíclico

El equipo triaxial cíclico (Figura 2. 13) es el más usado para la medición de las propiedades dinámicas del suelo a altos niveles de deformación. Este ensayo fue el primero de tipo cíclico (Seed & Lee, 1966), en el cual, un esfuerzo axial varía cíclicamente produciendo compresión y extensión sobre la probeta. Durante las pruebas se registran el desplazamiento axial, presión de poros y fuerza axial en función del tiempo. Los resultados de laboratorio se obtienen a partir de la curva histerética (Camacho Tauta, 2011).

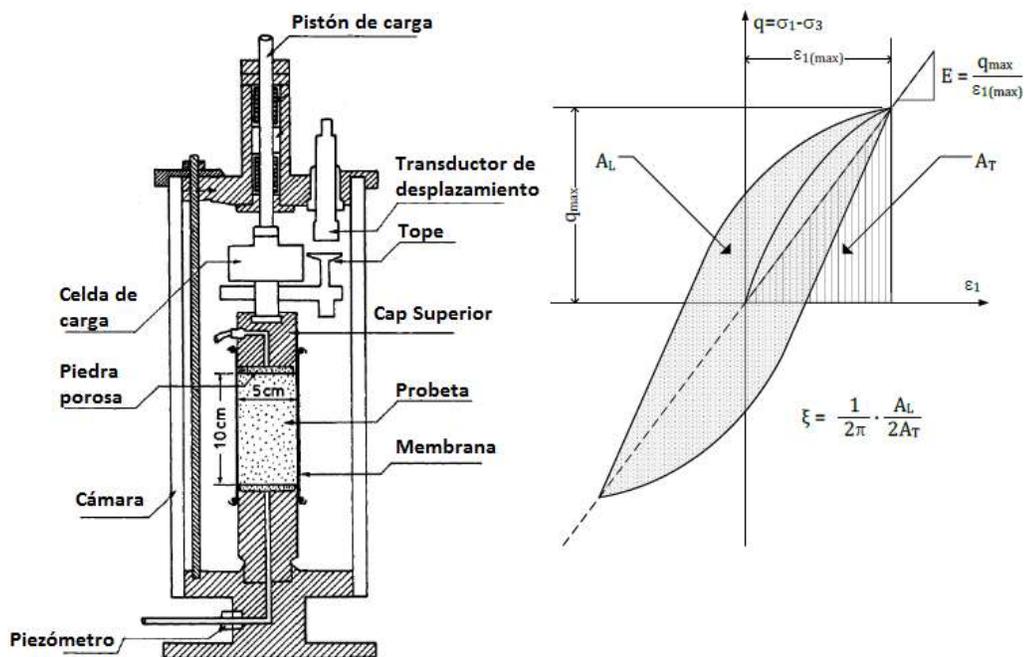


Figura 2. 13.- a) Esquema del ensayo triaxial cíclico. b) Curva histerética y obtención de resultados (Ishihara, 1996).

2.2.5 Corte simple cíclico

El ensayo de corte simple cíclico (Figura 2. 14) es muy utilizado para la caracterización del comportamiento de licuefacción de los suelos (Kovacs & Leo, 1981). Este tipo de prueba reproduce con mayor precisión las condiciones de carga producidas por un terremoto en comparación con el ensayo triaxial cíclico. En esta prueba, las muestras de suelo cilíndricas son restringidas por límites horizontales rígidos (anillos) para evitar su expansión lateral. Las fuerzas de corte horizontales son aplicadas por el *cap* superior o inferior, donde la muestra de suelo se deforma bajo deformación volumétrica constante de una manera similar a la de un suelo sometido a ondas de corte propagadas verticalmente. (Z. Wu, 2014)

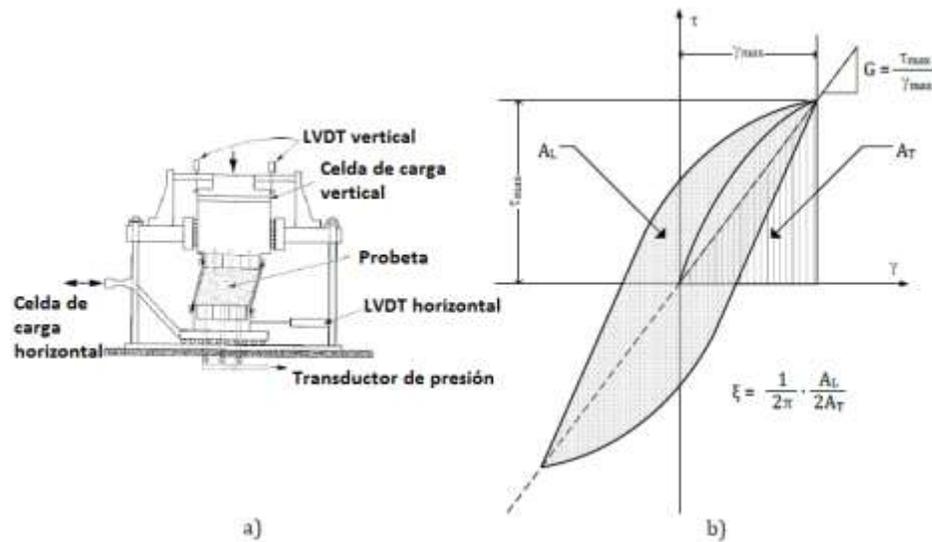


Figura 2. 14.-a) Esquema del ensayo de corte simple cíclico. b) Curva histerética y obtención de resultados. (Ishihara, 1996)

2.3 RESUMEN

La respuesta del suelo a ante cargas cíclicas se caracteriza principalmente por sus diferentes niveles de deformación. El módulo de corte disminuye con el aumento de la deformación de corte ejercida sobre el suelo, mientras que su amortiguación aumenta.

Hay una serie de factores que afectan el módulo de corte inicial “ G_{max} ”. Los principales factores son el confinamiento efectivo y la relación de vacíos. Otros factores que pueden influir en “ G_{max} ” son la saturación, contenido de finos, índice de sobreconsolidación, entre otros.

Hay un conjunto de pruebas que permiten obtener las propiedades dinámicas del suelo, en este capítulo se dio una breve introducción a los ensayos más comúnmente usado en campo y en laboratorio.

3 SUELO ENSAYADO, EQUIPOS Y METODOLOGÍA

3.1 SUELO ENSAYADO

El material usado es la arena del muro del tranque de relaves El Torito, de a la mina de cobre El Soldado. Esta arena constituye la fracción gruesa del relave producido a partir del material de desecho producto de la extracción del mineral.

El tranque El Torito está en la V región, comuna de Nogales, a 132 kilómetros al norte de Santiago. El sector de extracción del material llevado a laboratorio se presenta en la Figura 3. 1. Este material fue recogido y utilizado inicialmente por Marcelo Vargas para su tesis de magister “Efecto acoplado de la presión de confinamiento y el corte estático inicial en la resistencia cíclica de arena de relaves” en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (Vargas, 2015).



Figura 3. 1.-Sector de extracción de la arena de relaves estudiada.

3.1.1 Clasificación geotécnica del suelo ensayado

La clasificación geotécnica del material a estudiar considera: granulometría, hidrometría, gravedad específica “ G_s ”, límites de Atterberg, densidad máxima y mínima, y proctor modificado. También se incluye una fotografía al microscopio del material ensayado.

La Figura 3. 2 muestra la distribución granulométrica de la arena estudiada, para lo cual se hicieron cinco granulometrías y dos hidrometrías. Las mediciones no tenían gran dispersión, por lo que se representaron por una línea. La distribución granulométrica se comparó con la obtenida por Marcelo Vargas en su tesis (Vargas, 2015) dándole consistencia a los resultados obtenidos. Esta figura también muestra una foto al microscopio del material estudiado, donde se observa angulosidad de los granos.

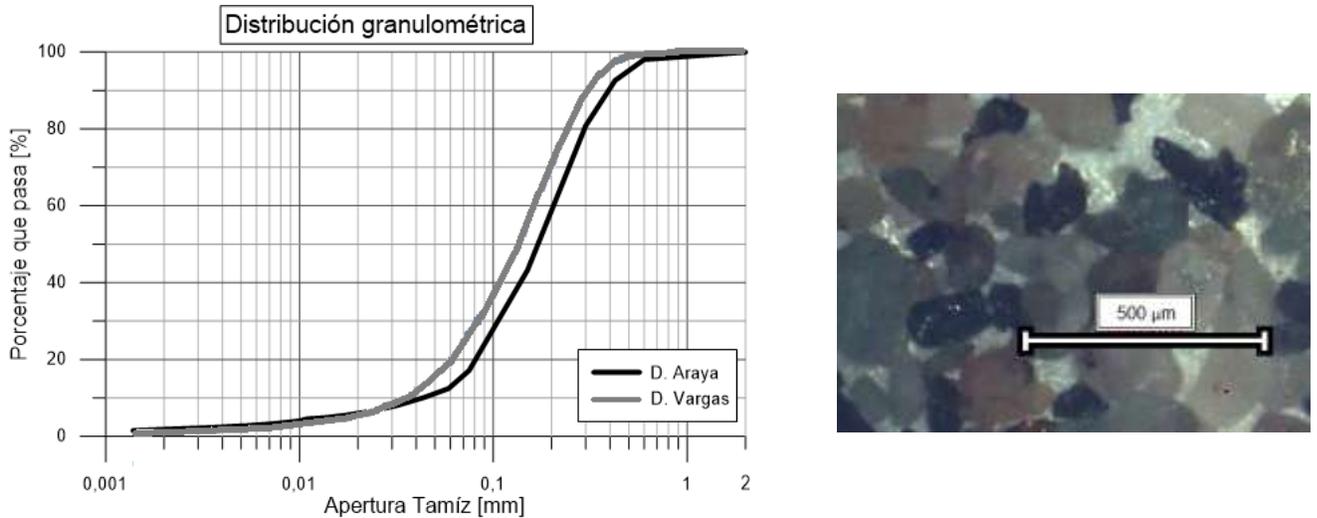


Figura 3. 2.-Distribución granulométrica y foto al microscopio del material estudiado.

La arena de relaves tiene 18% de contenido de finos, tamaño medio " D_{50} " =0,177 mm, coeficiente de uniformidad " C_u " =4,95 y coeficiente de curvatura " C_c " =1,32. Los límites de Atterberg de la fracción fina indican que el material es no plástico (NP). Así, los finos son clasificados como limo (ASTM D 4318). La clasificación USCS del material (ASTM D2487) corresponde a una arena limosa (SM).

La determinación de densidades máximas y mínimas consideró diferentes métodos. La densidad máxima comparó los resultados determinados a través del método japonés (JSSMFE) con los del proctor modificado (molde de 6 pulgadas, 5 capas, 25 golpes por capa, ASTM D 698), escogiéndose el mayor. La densidad mínima se obtuvo depositando lentamente el material seco dentro un molde de dimensiones conocidas (ASTM D 4254). El índice de vacíos máximo obtenido es " e_{max} " =1,074 y el índice de vacíos mínimo es " e_{min} " =0,512. La gravedad específica es " G_s " = 2,77 (ASTM D 854). La Tabla 3. 1 resume la caracterización geotécnica.

Tabla 3. 1.- Caracterización geotécnica de arena de relaves.

Característica	Resultado
Porcentaje Finos [%]	18
D_{50} [mm]	0,177
C_u	4,95
C_c	1,32
IP Finos	NP
Clasificación USCS	Arena Limosa (SM)
e_{max}	1,074
e_{min}	0,524
G_s	2,77

3.2 METODOLOGÍA DE ENSAYOS

Los ensayos se hicieron en probetas remoldeadas cilíndricas (5 [cm] de diámetro y 10 [m] de alto) de arena del muro del tranque del usando columna resonante y *Bender Element*, en el IDIEM.

3.2.1 Programa de Ensayos

Tabla 3. 2.-Programa de ensayos.

	"DR _o " [%]	"e"	Saturación	"γ _d " [gr/cm ³]	"σ' _c " [kg/cm ²]
Ensayos de columna resonante y <i>Bender Element</i>	85	0,874	Saturada	1,738	1
					2
					3
					4
	70	0,789	Saturada	1,651	1
					2
					3
					4
	50	0,678	Saturada	1,548	1
					2
					3
					4
	35	0,641	Saturada	1,478	1
					2
					3
					4
Ensayos de Columna Resonante	70	0,789	5% de saturación	1,651	1
					2
					3
					4

Todos los ensayos se hacen en confinamientos isotrópicamente drenados, con las válvulas de la probeta están abiertas. La densidad "γ_d" es la necesaria para obtener "DR_o".

Todos los ensayos saturados se hacen con una contrapresión "BP" de 2 a 3 [kg/cm²] y un grado de saturación "B" esperado mayor o igual al 95%.

Para la obtención de resultados confiables, los ensayos se repiten de 2 a 4 veces. Para evitar montar el equipo muchas veces, se realizan 4 ensayos sobre cada probeta (variando los confinamientos efectivos "σ'_c", con la misma densidad relativa inicial "DR_o"). La norma de columna resonante (D4015-15, 2016) permite repetitividad de ensayos, debido a que estos se consideran no destructivos para el rango de confinamientos usados (para deformaciones de corte menores a 0,01%).

3.2.2 Preparación de Probetas

Se realizan probetas remoldeadas para los ensayos de columna resonante y *Bender Element*, procediendo según se indica:

3.2.2.1 Confección de probetas:

Materiales (Figura 3. 3):

- Molde metálico de 5 [cm] de diámetro y 10 [cm] de alto.
- Membrana de látex.
- Montador de membrana de látex.
- Mica plástica para poner dentro del molde.
- Mica plástica superior.
- Apisonador.
- Material al 5 % de humedad (para generar una cohesión aparente, que ayuda a que no se desarme la muestra al confeccionarla).

Procedimiento:

- En el molde con la mica plástica en su interior, se apisonan 5 capas del mismo peso de material (dependiendo de la densidad relativa requerida), para obtener una densidad homogénea.
- Se pone la mica plástica superior sobre el molde, para dejar lisa la parte superior de la probeta.
- Se retira cuidadosamente el molde dejando la probeta libre.
- Se cubre la probeta con la membrana de látex impermeable.
 1. **Montaje de probetas:** este montaje varía dependiendo del ensayo y se explica con mayor detalle en los capítulos 3.3.1.4 para el equipo *Bender Element* y 3.3.2.4. para la columna resonante. Se deben poner las piedras porosas de cada equipo y afirmar el látex con los orrines (Figura 3. 3).
 2. **Aplicación de CO₂:** La norma ASTM D7181, (2011) exige que el parámetro de saturación "B" (Ecuación 3.1) sea mayor o igual a un 95%, para lograr esto, se debe introducir CO₂ a la muestra con tal de reemplazar las burbujas de aire existentes.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \geq 0,95 \quad (3.1)$$

3. **Saturación:** Se procede a saturar la probeta con agua destilada. Para el ensayo *Bender Element* se pasan al menos 200 ml por la probeta. Para la columna resonante se deja pasando agua de un día para otro, debido a que su saturación es más lenta.
4. **Consolidación:** Cada muestra se consolida a diferentes presiones de confinamiento (10 a 20 minutos aproximadamente). Se registra el cambio volumétrico en función del tiempo hasta terminar el proceso (volumen de la probeta constante, presión de poros nula).



Figura 3. 3.- Materiales de confección de probetas.

3.3 EQUIPOS UTILIZADOS, MONTAJE Y ENSAYO

Se describen los equipos utilizados durante la memoria y la metodología de ensayos en laboratorio.

3.3.1 *Bender Element*

3.3.1.1 Introducción

El ensayo *Bender Element* sirve para obtener el módulo de corte a pequeñas deformaciones (Shirley & Hampton, 1978). En este ensayo se aplica una señal de voltaje a un transmisor, que transmite un pequeño movimiento de corte sobre el extremo de una muestra de suelo cilíndrica. Esta perturbación viaja a lo largo de dicha muestra hasta el otro extremo de condiciones similares, el cual recibe una perturbación mecánica y genera un voltaje (Dyvik & Madshus, 1985). La señal viaja una distancia “ L_{TT} ” entre los elementos piezoeléctricos y la diferencia de tiempo entre las señales emitidas y recibidas representa el tiempo de propagación de la señal “ tt ”. Estas mediciones permiten calcular la velocidad de la onda de corte “ V_s ” y el módulo de corte inicial “ G_{max} ” de una muestra con una densidad conocida de suelo “ ρ ”.(Camacho-Tauta, David, & Álvarez, 2012).

$$V_s = \frac{L_{TT}}{tt} \quad (3.2)$$

$$G_{max} = \rho * V_s^2; \rho = \gamma_d + \delta n \gamma_w \quad (3.3)$$

Donde “ γ_d ” es la densidad seca del suelo, “ n ” es la porosidad del material, “ γ_w ” es la densidad del agua y “ δ ” es un factor entre 0 y 1 que representa el porcentaje de agua que siente la onda al corte.

3.3.1.2 Historia

El uso de elementos piezoeléctricos en aplicaciones geotécnicas se remonta al año 1963, en la obra de Lawrence, quien usó cristales piezoeléctricos para generar una onda unidimensional de compresión a través de granos de arena y vidrio. Más tarde, Shirley (1978) fue el primero en usar piezoeléctricos *Bender Element* para generar y recibir ondas de corte en ensayos de laboratorio. A través de los años, tales dispositivos han sido empleados en una serie de equipos de ensayo geotécnicos. Se han reportado diversos trabajos donde se midieron la velocidad de onda de corte en muestras triaxiales usando los mismos piezoeléctricos (Bates (1989), Brignoli et al. (1996) y Pennington et al. (2001)). (Dyvik & Madshus, 1985) los utilizaron para medir “ G_{max} ” para muestras de suelo en columna resonante, odómetros y corte simple. Kawaguchi et al. (2001) midió “ G_{max} ” en un odómetro con la misma tecnología. Agarwal & Ishibashi (1991) usaron el equipo en una cámara triaxial cúbica. Blewett et al. (2000) midió velocidad de onda de corte en arenas saturadas utilizando el piezoeléctricos en un contenedor largo.

Sin embargo, hasta la fecha el ensayo *Bender Element* todavía no ha sido estandarizado y surgen diferencias con respecto al método de interpretación. (Leong, Yeo, & Raharjo, 2015)

3.3.1.3 Equipo *Bender Element*

El equipo (Figura 3. 4) consta de las siguientes componentes:

- **Cámara triaxial:** La presión de la celda máxima es 700 [kPa] y tiene precisión de 10 [kPa].
- **Probeta:** es de 10 [cm] de altura y 5 [cm] de diámetro.
- **Piedras porosas:** permiten paso de agua, pero no de material (Figura 3. 5).
- **Transmisor y receptor:** formados por elementos piezoeléctricos ubicados en los *cap* superior e inferior de la muestra.
- **Generador de funciones:** genera la señal de entrada.
- **Osciloscopio digital:** recoge señales de entrada y de salida.

El generador de funciones envía una señal al transmisor, la cual es recibida por el receptor y transmitida al osciloscopio digital. A su vez, el generador de funciones está conectado con el osciloscopio digital. (Figura 3. 4)

Para evitar perturbaciones ambientales, el osciloscopio digital, el equipo y el cable de recepción están conectados a tierra.

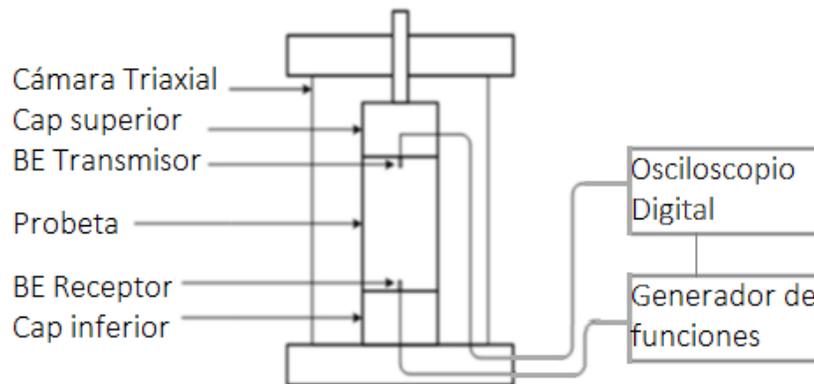


Figura 3. 4.-Equipo *Bender Element* (Camacho-Tauta et al., 2012)



Figura 3. 5.-Elemento piezoeléctrico y *Bender Element*

3.3.1.4 Montaje de Ensayo de *Bender Element*

Una vez armada la probeta (envuelta en látex) se deben seguir los siguientes pasos:

1. Hacer una hendidura en la probeta que permita la entrada del elemento piezoeléctrico justo al centro de ella.
2. Marcar el látex en la misma dirección de la hendidura, lo cual sirve de guía para hacer la entrada del otro elemento. Cubrir probeta con el látex.
3. Poner plasticina blanda dentro del agujero para asegurar en contacto del elemento piezoeléctrico con la probeta.
4. Montar la probeta en el equipo, introduciendo los piezoeléctricos en las hendiduras.
5. Poner orrines sobre el látex en el *cap* superior e inferior. Al montar la cámara triaxial es importante que la base y ésta se encuentren correctamente limpias.

Es importante que los elementos piezoeléctricos se encuentren en forma paralela para una correcta medición.

3.3.1.5 Ensayo *Bender Element*

Después del montaje de la probeta, de su saturación y consolidación, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Enviar una señal desde el generador de señales (ver su manejo detallado en anexo 7.2.1). En la memoria se usó una onda cuadrada de 20 [Hz] y 20 [Vpp] porque es más fácil de leer.
2. En el osciloscopio digital (ver su manejo detallado en anexo 7.2.2), fijar con un cursor el tiempo en cero para el salto de la señal cuadrada (amarilla) y con otro cursor medir el tiempo de llegada de onda "tt" que corresponde al primer *peak* de la señal recibida (celeste).
3. Calcular " V_s " con la ecuación (3.2) con " L_{TT} " = 0,09 [m] (largo de la probeta menos la mitad de ambos piezoeléctricos).



Figura 3. 6.-Pantalla osciloscopio digital. Obtención de tiempo de llegada de onda "tt".

3.3.2 Columna Resonante

3.3.2.1 Introducción

Se usa el equipo de columna resonante marca GDS *Instrument* del IDIEM (GDS Instruments., 2010). Este equipo permite ensayar muestras de suelo a cargas sinusoidales de torsión o flexión (Figura 3. 7) en una combinación extremo fijo libre (parte inferior fija y superior móvil, donde se toman mediciones). Los ensayos de la memoria son a cargas torsionales.

El ensayo de columna resonante a torsión se lleva a cabo mediante la aplicación de una carga de torsión sinusoidal a través de un sistema de accionamiento electromagnético. El sistema electromagnético consta de un rotor de cuatro brazos, cada cual tiene un imán montado dentro de una bobina de alambre. Un acelerómetro registra la respuesta de la muestra. El módulo de corte se calcula a partir del registro de la excitación sobre la base de la teoría de propagación de ondas. La amortiguación también se estima a partir las curvas de respuesta del suelo.

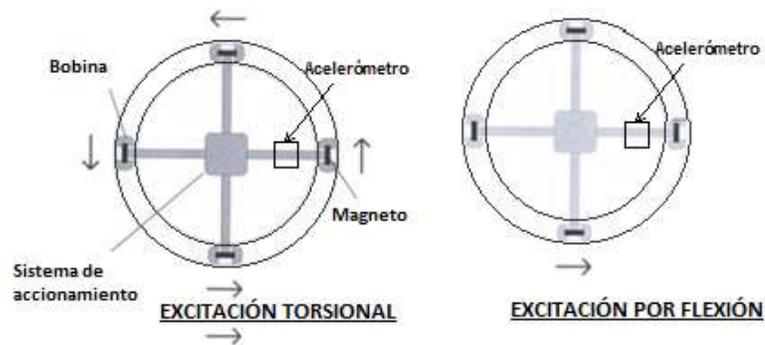


Figura 3. 7.-Sistema electromagnético. Ensayo a torsión (Izquierda); Ensayo a flexión (Derecha).(GDS Instruments., 2010)

3.3.2.2 Historia

La columna resonante se utiliza para registrar y analizar la respuesta dinámica de los suelos. El equipo fue desarrollado inicialmente por los ingenieros japoneses Ishimoto & Lida (1937), y se hizo popular en la década de 1960 por obras de autores como Hall & Richart (1963), Drnevich, Hall & Richart (1967) y Hardin & Black (1968).

En los últimos 40 años, muchos autores han hecho mejoras y modificaciones en el diseño de la columna resonante. Estos han incluido la aplicación de tensiones anisotrópicas por Hardin & Music (1965) y Allen & Stokoe (1982); modificaciones en el aparato para permitir probetas huecas por Drnevich (1967); la capacidad para ensayar a grandes deformaciones por Anderson & Stokoe (1978) y altas presiones de confinamiento por Hardin (1994) y Laird, (1993). Las modificaciones también se han hecho para ampliar las pruebas realizadas para permitir cizalladura torsional por Isenhower (1980) y Porovic (1995). (Drnevich, 1978) ha contribuido a este tema extensamente y ha ayudado a estandarizar el procedimiento de prueba por lo que las suposiciones hechas en el modelo

matemático son válidas durante las pruebas. También ha ayudado en el desarrollo de la matemática más compleja cuando los supuestos básicos no son válidos (Min et al., 1990 y Umu, Okur, Tuncan, & Tuncan, 2012).

3.3.2.3 Equipo de la columna resonante

El equipo (Figura 3. 8) consta de las siguientes componentes:

- **Columna resonante:** es donde se ubica la probeta, la cual está fija en la base y conectada al sistema electromagnético en su parte superior (sujeto por un marco interno). Tiene una cámara de agua para contener la probeta y una de aire donde se aplica la presión de confinamiento. Tiene un LVDT que permite conocer el desplazamiento vertical de la probeta y tiene un proxímetro.
- **Generador de señales:** envía una señal sinusoidal al sistema electromagnético de la columna, que mueve la probeta en torsión o flexión, dependiendo de lo que se requiera.
- **Amplificador de aceleración:** es capaz de acondicionar el voltaje entregado por el acelerómetro desde una señal de alta impedancia a una de baja impedancia para que se pueda leer.
- **Osciloscopio digital:** recibe la señal de aceleración en volts.
- **Sistema de adquisición de datos:** transfiere los datos al computador.
- **Computador (Software):** permite analizar mediante un programa los datos medidos.
- **Control Neumático, medidor de presión de poros y controlador de presión de fluido:** son reemplazados con un panel de control de presión para la realización de la memoria.
- **3 barras y 3 pesos de calibración de diferente rigidez:** permiten obtener parámetros " β " (Anexo 7.3.3) para la obtención de los módulos de corte "G".

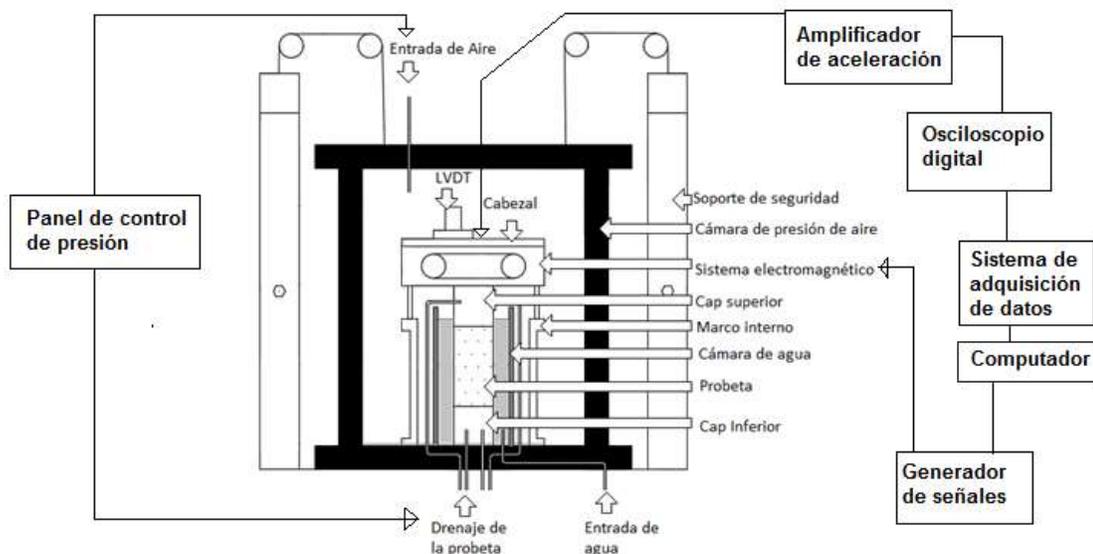


Figura 3. 8.-Equipo de columna resonante.

3.3.2.4 Montaje del ensayo de columna resonante

Se describe el montaje del ensayo (Figura 3. 10) de columna resonante a partir del manual de dicho equipo (GDS Instruments., 2010). Se procede siguiendo los siguientes pasos:

1. **Montaje de la probeta:** la cubierta en látex se pone entre los *cap* superior e inferior, usando papel filtro y piedra porosa a ambos lados (Figura 3. 9). Se ponen orrines sobre el látex en el *cap* superior e inferior.
2. **Colocación de la cámara de agua:** se pone a presión con un poco de vaselina. Después, se instala la manguera de agua para llenar la cámara cubriendo la probeta.
3. **Colocación de marco interno:** se instala con 6 pernos. Este sostiene el sistema electromagnético.
4. **Colocación de los tubos de drenaje:** se deben conectar a ambos lados de la placa base.
5. **Colocación de sistema electromagnético:** debe ser cuidadosamente alineado para asegurar la libre circulación de cada imán dentro de las bobinas. La altura del sistema electromagnético se puede ajustar usando 4 tornillos de nivelación. Tiene otros 4 pernos que lo unen al marco interno, los que se aprietan cuidadosamente para no alterar la probeta.
6. **Conexión de las bobinas:** sus cables se conectan respecto al color que tengan.
7. **Conexión del acelerómetro:** este se conecta a uno de los brazos del sistema electromagnético.
8. **Conexión del cabezal:** se debe realizar una conexión rígida entre la placa de accionamiento y el cabezal. Se usan 8 pernos.
9. **Conexión del transductor de desplazamiento LVDT:** se conecta a la tapa superior mediante dos pernos.
10. **Chequeo final:** comprobar la correcta alineación de los imanes en las bobinas, además, que todos los cables se mantengan en forma segura.
11. **Poner la cámara de presión de aire:** Se sacan los soportes de seguridad que sujetan la cámara. La cámara se atornilla mediante el uso de 6 pernos. Luego se conecta la manguera de presión de aire en su parte superior.

Es importante que las cámaras triaxiales y la base se encuentren correctamente limpias.



Figura 3. 9.-Forma correcta de poner papel filtro y piedras porosas sobre los cap superior e inferior.

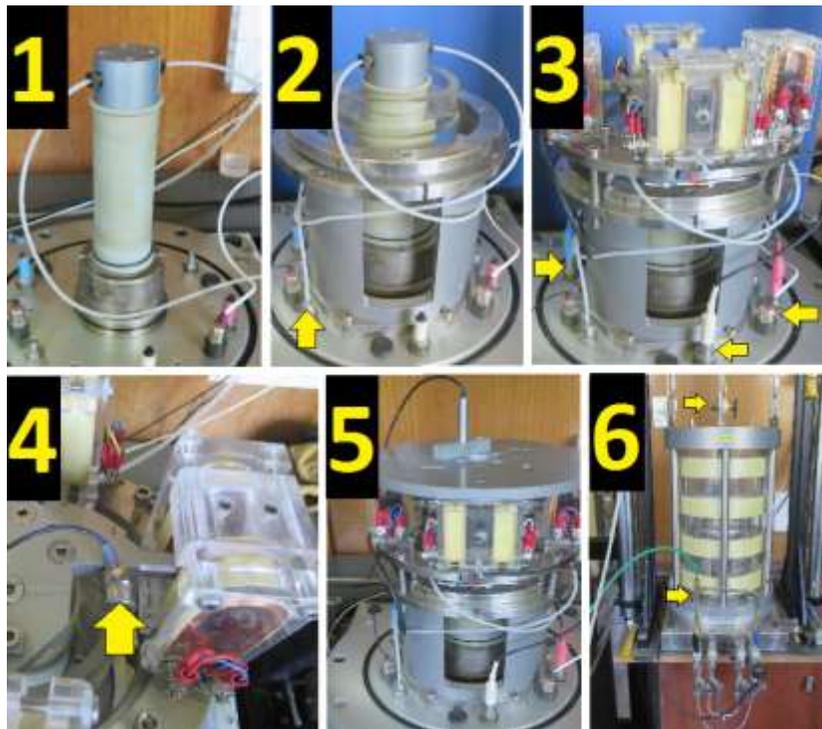


Figura 3. 10.-Montaje de Columna Resonante. N°1: Paso 1. N° 2: Pasos 2 a 4, donde la flecha indica la conexión de un tubo de drenaje. N°3: Pasos 5 a 6, donde las flechas indican las conexiones de bobinas. N°4: Paso 7, donde la flecha indica la conexión del acelerómetro. N° 5: Pasos 8 a 10. N° 6: Paso 11.

3.3.2.5 Fórmulas del ensayo a torsión de la columna resonante

- **Parámetro de Rigidez “G”:** se obtiene a partir a la velocidad de onda de corte “ V_s ”, la cual se consigue de la función de propagación de ondas a través de un cilindro en un medio elástico (Cepeda & Lopez, 2010). La obtención del parámetro de detalla en el anexo 7.3.1.

$$V_s = \frac{w_n L}{\beta} = 2\pi f_r L / \beta \quad (3.4)$$

$$G = \rho * V_s^2; \rho = \gamma_d + \delta n \gamma_w \quad (3.5)$$

Donde “ f_r ” es la frecuencia de resonancia de la muestra obtenida en el ensayo a un voltaje dado, “ L ” es la longitud de la probeta, el parámetro de calibración “ β ” se obtiene en función “ I/I_o ” (siendo I la inercia de la probeta cilíndrica e “ I_o ” el momento de inercia de la sección superior del equipo, (Tabla 7. 18, (GDS Instruments., 2010)) y “ ρ ” es la densidad de la muestra. Esta densidad se compone de “ γ_d ” que es la densidad seca del suelo, “ n ”; la porosidad, “ γ_w ”; la densidad del agua y “ δ ”; un factor entre 0 y 1 que representa el porcentaje de agua que mueve con la onda al corte (puede ser menor a 0,5 para arenas gruesas y cercano a 1 para arenas finas y limos(Whitman & Dobry, 1997)).

El momento de inercia “ I_o ” es 0,0037 y se obtiene a partir de la calibración del equipo (ver en anexo 7.3.3).

El ensayo de columna resonante se debe repetir varias veces para distintos voltajes, con lo cual se podrá obtener la curva de degradación de rigidez.

- **Deformación Torsional “ γ ”:** La obtención este parámetro se detalla en el anexo 7.3.2.(GDS Instruments., 2010)

$$\gamma = 4,596 \frac{V * R}{f r^2 * L} \quad (3.6)$$

- **Coefficiente de amortiguación “D”:** para obtener este parámetro mediante columna resonante, el ensayo se deja vibrar libremente tras aplicarse una onda sinusoidal sobre la probeta. Se debe obtener la curva de amortiguación de la muestra para obtener el decremento logarítmico, “ δ ” (promedio de los logaritmos de la relación de amplitudes sucesivas “ θ_i ”). Este término permite obtener el coeficiente de amortiguación “D”.

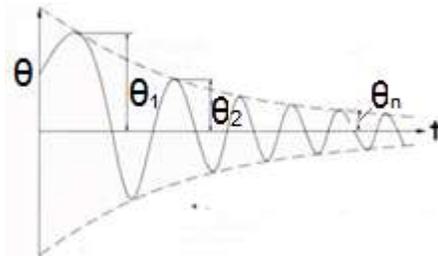


Figura 3. 11.-Curva de amortiguación (GDS Instruments., 2010).

$$\delta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{\theta_i}{\theta_{i+1}}\right) \quad (3.7)$$

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (3.8)$$

3.3.2.6 Ensayo Columna Resonante

Después del montaje de la muestra, se le aplica torsión a la muestra mediante la aplicación de un voltaje sinusoidal a las bobinas. Esto produce un movimiento oscilatorio en la placa de accionamiento, debido a que el campo magnético resultante. Mediante el control de la frecuencia y amplitud de la tensión aplicada, se puede encontrar la frecuencia de resonancia de la muestra. La amplitud de la vibración se controla por la salida de un acelerómetro.

Trazando la salida de valores máximos del acelerómetro en contra de la frecuencia de la tensión aplicada, se puede identificar la frecuencia de resonancia fácilmente.

REALIZANDO EL ENSAYO

Una vez montada la probeta, se deben seguir los siguientes pasos usando el software GDS RCA:

- **Barrido amplio:** permite al usuario introducir una frecuencia inicial, una frecuencia final y un incremento de frecuencia (recomendado cada 5 [V]). Se debe partir de un voltaje bajo, por ejemplo, 0,001[V]. Realizar el ensayo y encontrar la frecuencia de resonancia gruesa.
- **Barrido fino:** se hace sobre la frecuencia de resonancia gruesa encontrada, pero con un incremento de frecuencia más pequeño (por ejemplo, 0,1 [V]). Sirve para encontrar la frecuencia de resonancia con más precisión
- **Hacer *Damping Test*:** se deja vibrar el equipo, se miden 100 oscilaciones con el voltaje de la frecuencia de resonancia obtenida.
- **Repetir pasos iniciales:** se hace esto varias veces aumentando el voltaje de entrada para obtener los puntos requeridos

IMPORTANTE: -poner amplificador de ganancia en 1000 [mV/G], lo cual permite leer la aceleración convirtiendo la salida de voltaje en la potencia máxima de "g" en [m/s²] (multiplicando el voltaje por 9,81).

-voltaje máximo de entrada: 1 [V] (no poner más voltaje para no dañar el equipo ni alterar la muestra).

4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 MÓDULO DE RIGIDEZ AL CORTE INICIAL

El módulo de rigidez al corte inicial “ G_o ” o “ G_{max} ” se obtiene mediante los ensayos de *Bender Element* y columna resonante, éste se parametriza con la ecuación (2.5). Para obtener la densidad “ ρ ” del suelo (Ecuación 3.3), se usa “ δ ” igual al parámetro de saturación “ B ” (Ecuación 3.1).

4.1.1 Ensayos de *Bender Element*

Los ensayos de *Bender Element* (Figura 4. 1 a Figura 4. 4) permiten calcular los tiempos de llegada de onda “ tt ”, por consiguiente, la velocidad de onda de corte “ V_s ” (Ecuación 3.2) y “ G_{max} ” (Ecuación 3.3).

El tiempo cero de cada gráfico indica el momento en que la señal de entrada cuadrática genera un salto. El primer *peak* de la señal recibida indica el tiempo “ tt ” que demora la onda en atravesar la probeta.

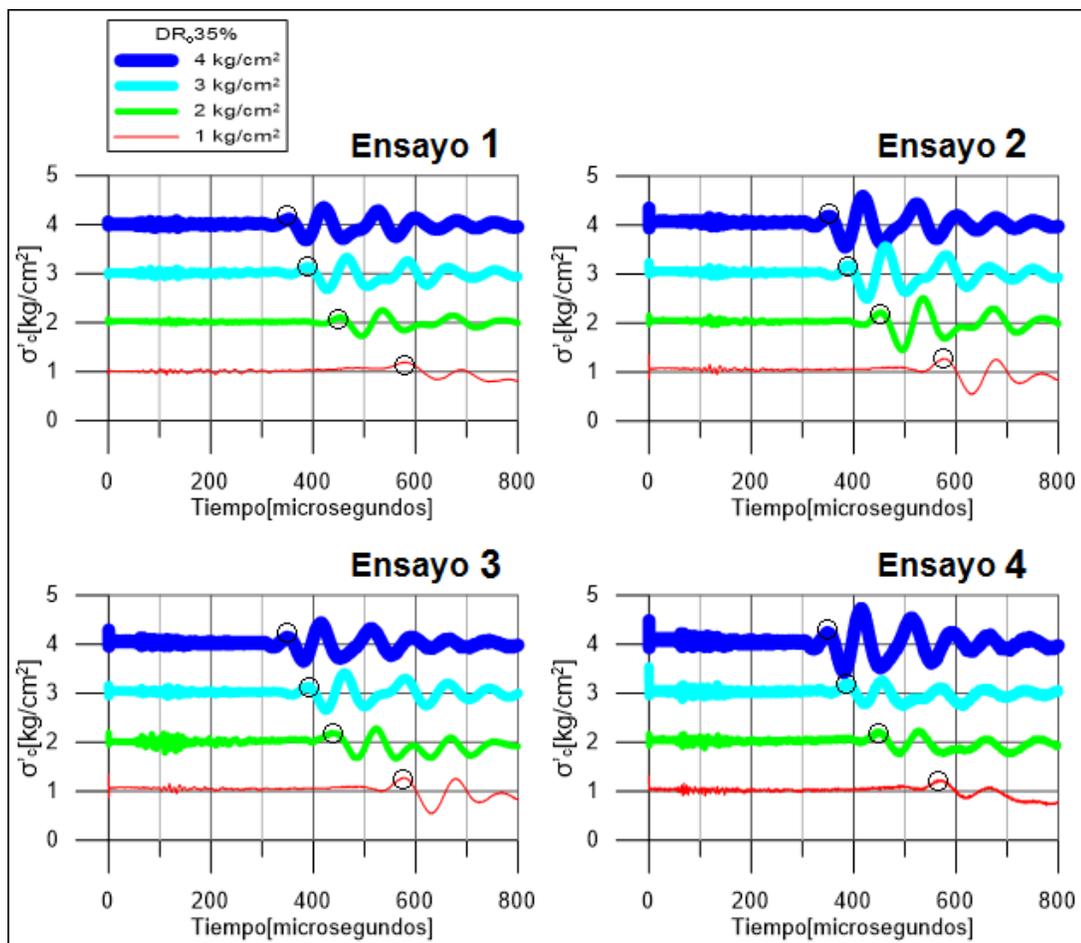


Figura 4. 1.-Ensayos de *Bender Element* para “ DR_c ” 35%. Tiempo de llegada de onda “ tt ”.

Los *peak* de los tiempos de llegada se observan claramente y están marcados con una circunferencia.

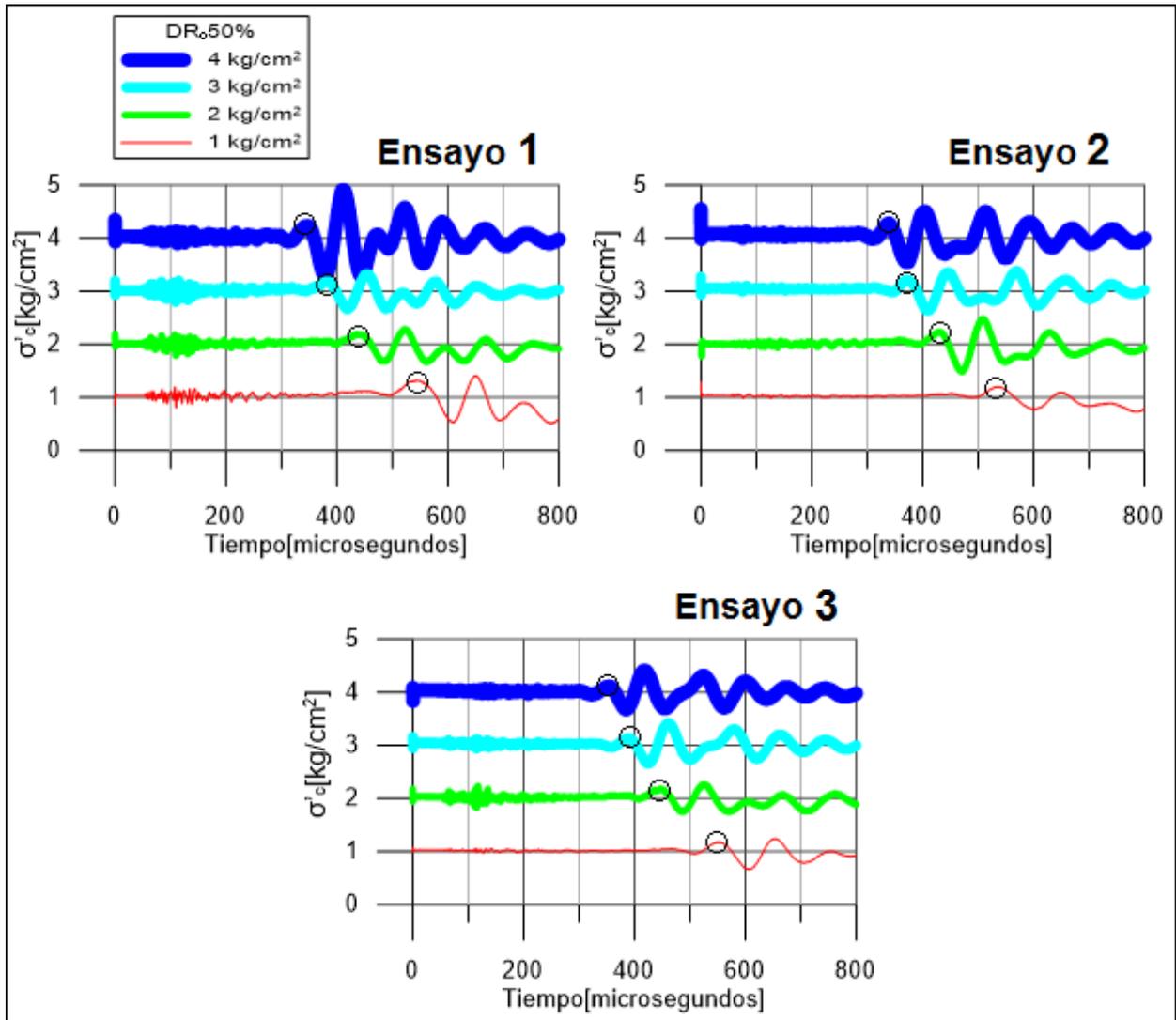


Figura 4. 2.- Ensayos Bender Element para "DR_o" 50%. Tiempo de llegada de onda "tt".

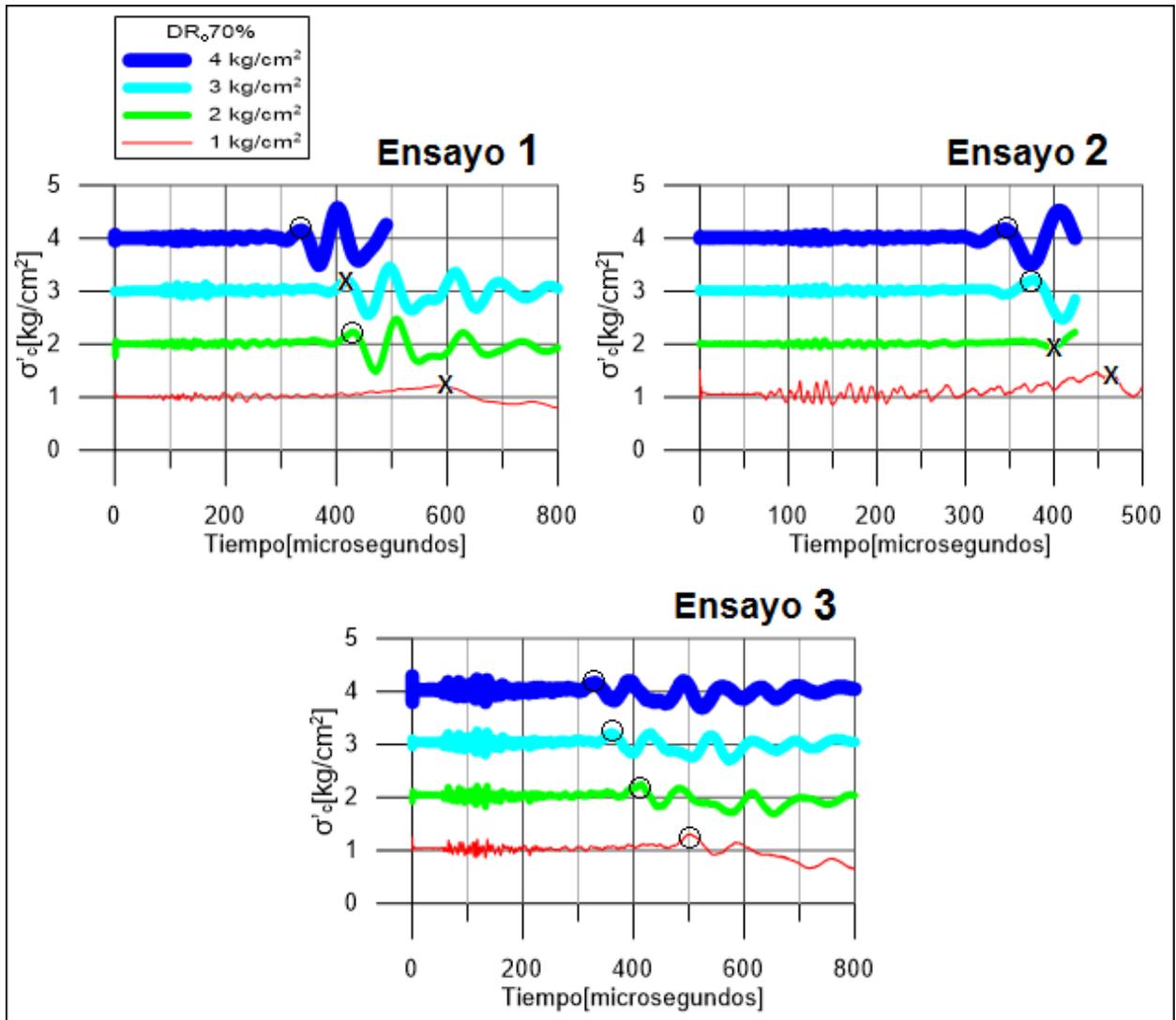


Figura 4. 3.- Ensayos de Bender Element para “DR₀” 70%. Tiempo de llegada de onda “tt”.

Los tiempos “tt” que se consideraron mal medidos se encuentran marcados por cruces. Esto pudo haber ocurrido porque se hizo una lectura errática de la señal de llegada o porque las mediciones no siguen la tendencia de los otros gráficos.

Los confinamientos efectivos “σ’_c” menores de los ensayos 1 y 2 (Figura 4. 3) muestran una señal de llegada difusa, donde no se indica claramente el *peak* esperado.

Los confinamientos 2 y 3 del ensayo 1, para la densidad relativa inicial del 70% entregaron lecturas de la señal de llegada muy parecidas; se escogió el tiempo “tt” que se ajustó más a la tendencia de los otros gráficos.

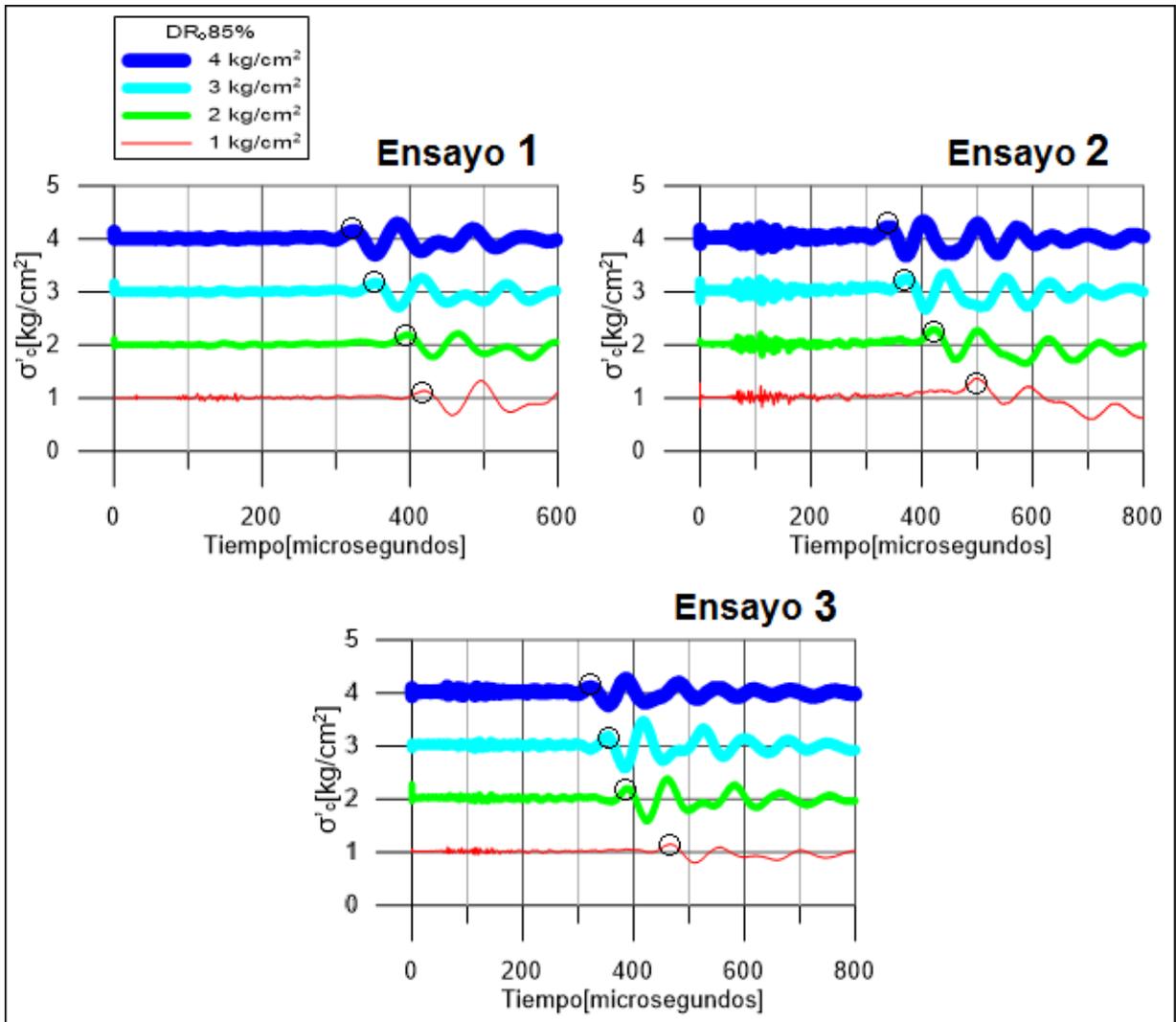


Figura 4. 4.- Ensayos de Bender Element para “DR_o” 85%. Tiempo de llegada de onda “tt”.

Tabla 4. 1.- Resumen de las condiciones iniciales de los ensayos de Bender Element.

“DR _o ” [%]	“γ _{do} ” [g/cm ³]	Ensayo	“BP” [kg/cm ²]	“B”
35%	1,478	1	2	0,95
		2	2	0,95
		3	2	0,96
		4	2	0,99
50%	1,548	1	2	0,95
		2	2	0,95
		3	2	0,96
70%	1,651	1	2	0,97
		2	2	0,99
		3	3	0,96
85%	1,738	1	2	0,94
		2	3	0,98
		3	3	0,95

Tabla 4. 2.-Resumen de resultados de ensayos de Bender Element.

DR _o [%]	σ'_c [kg/cm ²]	Ensayo	Tiempo[μ s]	ΔV_{CON} [cm ³]	γ_d [g/cm ³]	ρ [g/cm ³]	V _s [m/s]	G[MPa]	E	DR[%]
35	1	1	576	4,7	1,514	1,945	156,3	47,5	0,83	43,0
		2	576	4	1,509	1,941	156,3	47,4	0,84	41,8
		3	576	3	1,501	1,941	156,3	47,4	0,85	40,1
		4	568	3	1,501	1,955	158,5	49,1	0,85	40,1
	2	1	448	2,7	1,536	1,973	200,9	79,6	0,80	47,6
		2	448	2,2	1,526	1,964	200,9	79,3	0,81	45,6
		3	456	2,6	1,522	1,967	197,4	76,7	0,82	44,5
		4	448	2,3	1,519	1,969	200,9	79,5	0,82	44,0
	3	1	388	2	1,553	2,013	232	108,3	0,78	51,0
		2	388	1,7	1,540	1,986	232	106,9	0,80	48,5
		3	384	1,8	1,536	1,977	234,4	108,6	0,80	47,6
		4	388	1,6	1,532	1,990	232	107,1	0,81	46,8
	4	1	352	1,5	1,565	2,010	255,7	131,4	0,77	53,6
		2	348	1,4	1,552	1,996	258,6	133,5	0,79	50,8
		3	348	1,5	1,548	2,002	258,6	133,9	0,79	50,2
		4	348	1,3	1,543	2,009	258,6	134,3	0,80	49,0
50	1	1	534	2,1	1,564	1,978	168,5	56,2	0,77	53,4
		2	534	1,8	1,562	1,976	168,5	56,1	0,77	52,9
		3	552	2,2	1,565	1,983	163	52,7	0,77	53,6
	2	1	432	2,2	1,582	1,990	208,3	86,3	0,75	57,0
		2	432	2	1,578	1,987	208,3	86,2	0,76	56,2
		3	444	2	1,581	1,993	202,7	81,9	0,75	56,8
	3	1	375	1,7	1,596	1,999	240	115,1	0,74	59,8
		2	370	1,4	1,590	1,995	243,2	118,0	0,74	58,5
		3	384	1,6	1,595	2,002	234,4	110,0	0,74	59,4
	4	1	338	1,3	1,607	2,006	266,3	142,3	0,72	61,9
		2	338	1,2	1,600	2,001	266,3	141,9	0,73	60,4
		3	348	1,2	1,605	2,009	258,6	134,3	0,73	61,4
70	1	3	500	1,4	1,663	2,051	180	66,4	0,67	72,1
	2	1	428	1,5	1,676	2,059	210,3	91,1	0,65	74,4
		3	412	1,4	1,675	2,055	218,4	98,0	0,65	74,3
	3	2	376	1,2	1,686	2,074	239,4	118,8	0,64	76,3
		3	356	0,9	1,684	2,060	252,8	131,7	0,65	75,8
	4	1	336	0,9	1,694	2,059	267,9	147,8	0,63	77,6
		2	314	0,9	1,691	2,073	286,6	170,2	0,64	77,0
		3	328	0,8	1,690	2,060	274,4	155,1	0,64	76,9
	85	1	1	426	1,3	1,750	2,096	211,3	93,6	0,58
2			492	1,7	1,753	2,113	182,9	70,7	0,58	87,5
3			464	1	1,747	2,098	194	79,0	0,59	86,5
2		1	384	1	1,759	2,102	234,4	115,5	0,57	88,3
		2	416	1,1	1,763	2,120	216,3	99,2	0,57	89,1
		3	388	1,1	1,757	2,104	232	113,3	0,58	88,0
3		1	352	0,8	1,766	2,107	255,7	137,7	0,57	89,5
		2	372	1	1,773	2,125	241,9	124,4	0,56	90,5
		3	352	1	1,766	2,110	255,7	138,0	0,57	89,5
4		1	330	0,7	1,773	2,111	272,7	157,0	0,56	90,5
		2	336	0,7	1,779	2,130	267,9	152,8	0,56	91,5
		3	316	0,9	1,774	2,116	284,8	171,6	0,56	90,8

La Tabla 4. 1 resume las condiciones iniciales de los ensayos de *Bender Element*. Siendo “DR_o” y “DR” la densidad relativa de confección y ensayo de la muestra respectivamente, “γ_{do}” su densidad seca inicial, “BP” su contrapresión y “B” el parámetro de saturación (Ecuación 3.1).

La Tabla 4. 2 resume los resultados de los ensayos de *Bender Element*. Siendo “σ’_c” el confinamiento efectivo de la probeta, “ΔV_{CON}” la variación de volumen por confinamiento, que provoca una variación de la densidad de la muestra “ρ” e índice de vacíos “e”. Se observa que, a mayor “σ’_c” y “DR_o”, el tiempo de llegada de la onda “tt” disminuye, aumentando la velocidad de onda de corte “V_s” (con “L_{TT}” =0,09[m]) y el módulo de rigidez al corte “G_{max}”.

A continuación, se muestran los módulos de rigidez máximo “G_{max}” para cada confinamiento efectivo a partir de la Tabla 4. 2.

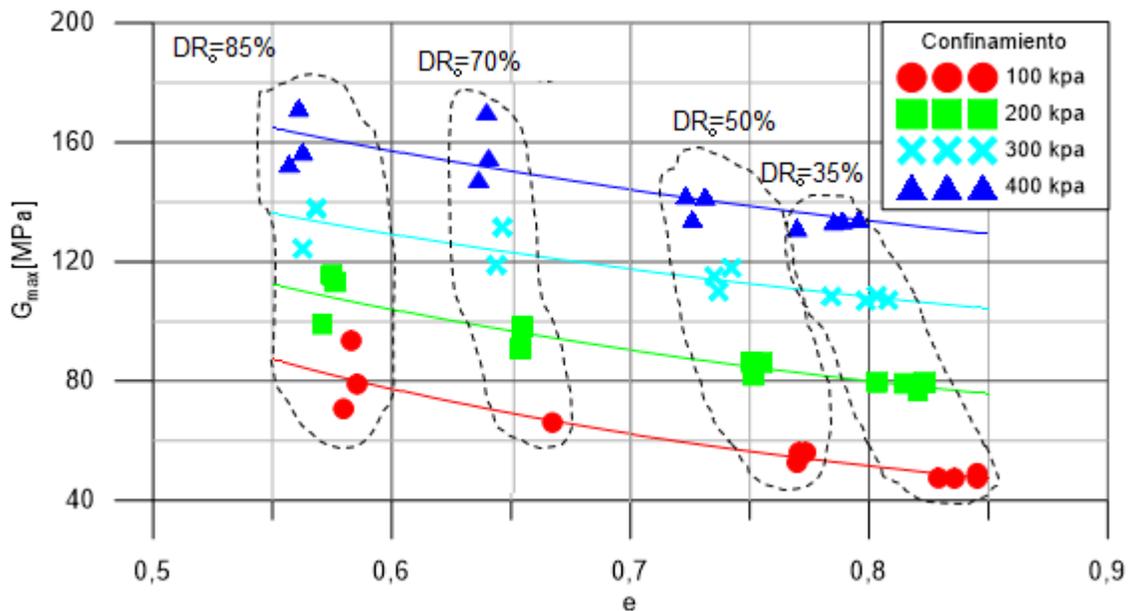


Figura 4. 5.-Módulo de rigidez máxima “G_{max}” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. *Bender Element*.

Se observa que a mayor confinamiento efectivo “σ’_c” aumenta “G_{max}”. También se ve que a mayor “e” disminuye “G_{max}” formando una curva descendente.

Se busca parametrizar “G_{max}” con respecto “e” y “σ’_c” con la ecuación (3.3):

$$G_{max} = A * \frac{(B - e)^2}{1 + e} * (\sigma'_c)^n$$

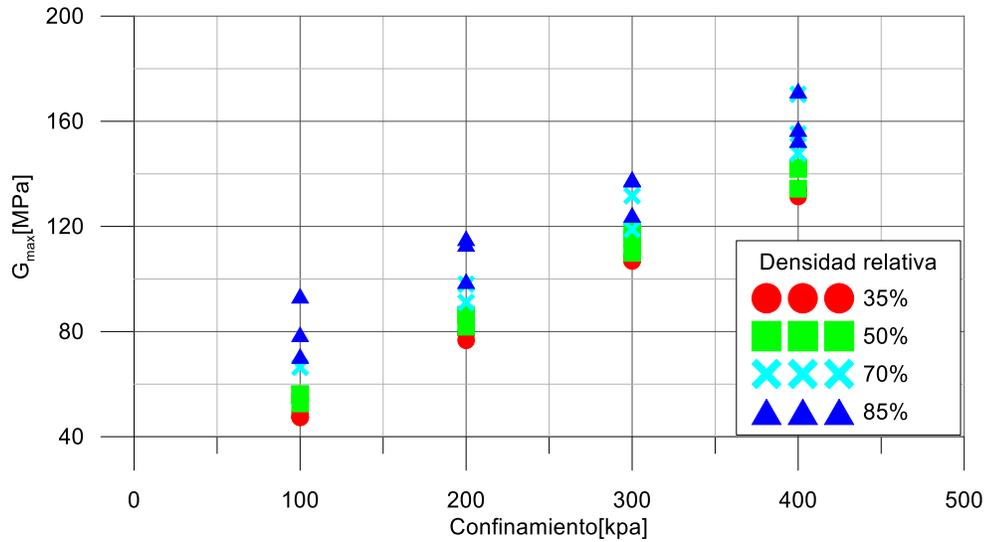


Figura 4. 6.- Módulo de rigidez máxima “ G_{max} ” versus confinamiento por densidad relativa. Bender Element.

El parámetro “n” se obtiene de la relación de potencia del gráfico de “ G_{max} ” con respecto a “e” (Figura 4. 6); éste es igual a 0,63.

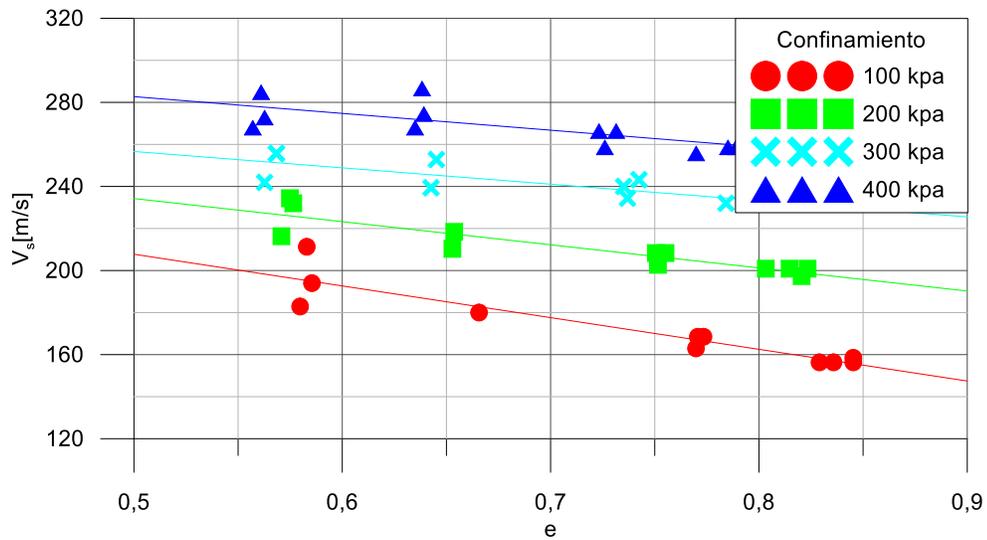


Figura 4. 7.- Velocidad de onda de corte “ V_s ” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. Bender Element.

El parámetro “B” se obtiene de la relación lineal del gráfico de “ V_s ” con respecto a “e” (Figura 4. 7); éste es igual a 2,25.

La parametrización de “ G_{max} ” de los ensayos de *Bender Element* es la siguiente:

$$G_{max}[Mpa] = 2900 \frac{(2,25-e)^2}{(1+e)} (\sigma'_c[kpa])^{0,63} \quad (4.1)$$

El parámetro “A” es 2900 y el que mejor se ajusta a las curvas de la Figura 4. 5.

4.1.2 Ensayo de columna resonante

La Tabla 4. 3 resume las condiciones iniciales de los ensayos de columna resonante seleccionados para el análisis. Siendo “DR_o” la densidad relativa inicial de la muestra, “γ_{do}” la densidad seca, “β” un parámetro de calibración en función de “I/I_o” (Anexo 7.3; Tabla 7. 18), “BP” la contrapresión y “B” el parámetro de saturación (Ecuación 3.1).

Se observa que, a pesar de usar la máxima contrapresión posible (“BP” =3[kg/cm²]) y dejar saturando las muestras de un día para otro, no se obtuvo el parámetro “B” deseado (≥0,95). No obstante, se decidió seguir con los ensayos, mientras de saturación “B” fuese mayor o igual a 0,75 para ensayos drenados (permiten compresión de burbujas de aire de la probeta). También se puede añadir que después del 75% saturación no hay mayores variaciones del módulo “G_{max}”(S. Wu et al., 1984).

Tabla 4. 3.-Resumen de condiciones iniciales de los ensayos de columna resonante.

“DR _o ” [%]	“γ _{do} ” [g/cm ³]	“β”	Ensayo	“BP” [kg/cm ²]	“B”
35%	1,478	0,1556	1	3	0,96
			2	3	0,95
50%	1,548	0,1595	1	3	0,86
			2	3	0,86
70%	1,651	0,1646	1	3	0,84
			2	3	0,88
85%	1,738	0,1692	1	3	0,75
			2	3	0,76
70% NS	1,651	0,1646	1	0	-
			2	0	-

La Tabla 4. 4 resume los resultados de “G_{max}” de los ensayos de columna resonante (Figura 4. 12 a Figura 4. 15 y Figura 4. 17). El módulo “G_{max}” se obtiene a partir de “V_{so}” y “ρ” (Tabla 4. 4) con la ecuación (3.5). “V_{so}” se calcula con la ecuación (3.4) usando la frecuencia de resonancia inicial “Fz_o” (Tabla 4. 4), el parámetro de calibración “β” (Tabla 4. 3) y el largo de probeta “L” de 10 [cm].

Se observa que, a mayor confinamiento efectivo y densidad relativa, “V_{so}” y “G_{max}” aumentan. También se ve que “V_{so}” es mayor para las muestras al 5% de saturación respecto a los ensayos saturados.

Al comparar los resultados de la Tabla 4. 2 y Tabla 4. 4 se tienen las siguientes observaciones:

- Los resultados obtenidos de “G_{max}” variaron entre 40 y 180 [Mpa] en ambos ensayos. Los resultados de columna resonante fueron moderadamente mayores a los obtenidos con el ensayo *Bender Element*.
- Los resultados obtenidos de “V_s” variaron entre 140 y 300 [m/s] para ambos ensayos.

Tabla 4. 4.- Resumen de resultado de ensayos de columna resonante.

DR _o [%]	σ_c' [kg/cm ²]	Ensayo	Fz _o [Hz]	ΔV_{CONS} [cm ³]	γ_d [g/cm ³]	ρ [g/cm ³]	V _s [m/s]	G[Mpa]	e	DR
35	1	1	41,9	2,06	1,509	1,946	169,2	55,7	0,84	41,9
		2	39,4	2,12	1,510	1,942	159,1	49,1	0,84	42,0
	2	1	50,1	1,02	1,517	1,951	202,3	79,8	0,83	43,6
		2	48,3	1,14	1,519	1,948	195,0	74,1	0,82	43,9
	3	1	58,7	0,4	1,520	1,953	237,0	109,7	0,82	44,3
		2	57,4	0,18	1,520	1,949	231,8	104,7	0,82	44,2
	4	1	64,4	0,46	1,524	1,956	260,0	132,2	0,82	45,1
		2	63,4	0,68	1,525	1,952	256,0	127,9	0,82	45,4
50	1	1	46	1,2	1,573	1,945	181,2	63,8	0,76	55,1
		2	46,3	1,2	1,573	1,945	182,4	64,7	0,76	55,1
	2	1	55,5	0,74	1,579	1,949	218,6	93,1	0,75	56,3
		2	54,3	0,76	1,579	1,949	213,9	89,2	0,75	56,4
	3	1	60,8	0,44	1,583	1,951	239,5	111,9	0,75	57,1
		2	59,9	0,44	1,583	1,951	235,9	108,6	0,75	57,1
	4	1	68,2	0,34	1,585	1,953	268,6	141,0	0,75	57,6
		2	65,8	0,32	1,585	1,953	259,2	131,2	0,75	57,6
70	1	1	51,2	4,17	1,704	2,028	195,3	77,3	0,63	79,4
		2	51,3	1,18	1,678	2,025	195,6	77,5	0,65	74,8
	2	1	62,6	1,78	1,720	2,039	238,7	116,2	0,61	82,1
		2	61,3	0,26	1,680	2,026	233,8	110,7	0,65	75,2
	3	1	73,1	2,04	1,739	2,052	278,8	159,5	0,59	85,2
		2	72,2	0,22	1,682	2,028	275,3	153,7	0,65	75,5
	4	1	77,7	0,1	1,740	2,052	296,3	180,2	0,59	85,3
		2	74,6	0,5	1,687	2,031	284,5	164,4	0,64	76,3
85	1	1	53,1	2,06	1,775	2,044	197,4	79,7	0,56	90,8
		2	57	1,74	1,772	2,046	211,9	91,8	0,56	90,4
	2	1	62,4	1,02	1,784	2,051	232,0	110,4	0,55	92,3
		2	63,5	0,82	1,779	2,051	236,1	114,3	0,56	91,6
	3	1	70	0,4	1,788	2,054	260,2	139,1	0,55	92,9
		2	72	0,56	1,784	2,055	267,7	147,2	0,55	92,4
	4	1	75,1	0,46	1,792	2,057	279,2	160,3	0,55	93,5
		2	79	0,2	1,786	2,056	293,7	177,3	0,55	92,6
70 NS	1	1	54,8	2,53	1,690	1,709	209,0	74,7	0,64	76,9
		2	54,5	2,57	1,690	1,710	207,8	73,9	0,64	76,9
	2	1	66,1	3,28	1,719	1,738	252,1	110,4	0,61	81,9
		2	66,5	3,24	1,719	1,738	253,6	111,8	0,61	81,9
	3	1	76	0,98	1,728	1,747	289,8	146,7	0,60	83,3
		2	75,7	0,98	1,728	1,747	288,7	145,6	0,60	83,3
	4	1	80	2,06	1,747	1,766	305,1	164,4	0,59	86,5
		2	80,1	2,06	1,747	1,766	305,5	164,8	0,59	86,5

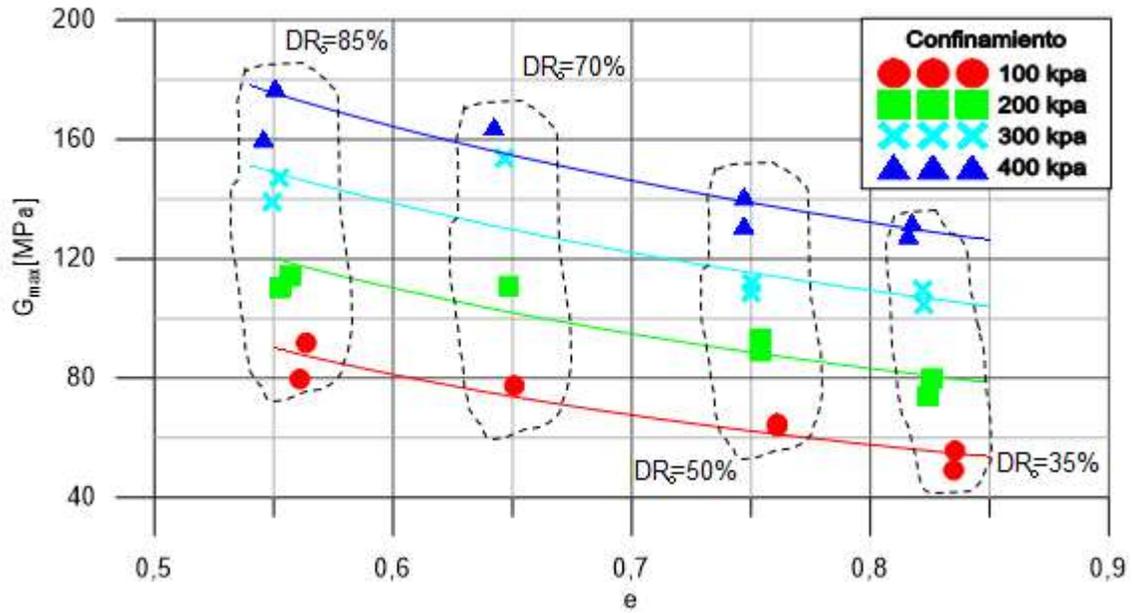


Figura 4. 8.- Módulo de rigidez máxima “G_{max}” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. Columna resonante.

Se observa que, a mayor confinamiento efectivo, aumenta “G_{max}”. También se ve que a mayor “e”, disminuye “G_{max}” formando una curva descendente. A mayor densidad relativa aumenta el módulo de corte inicial.

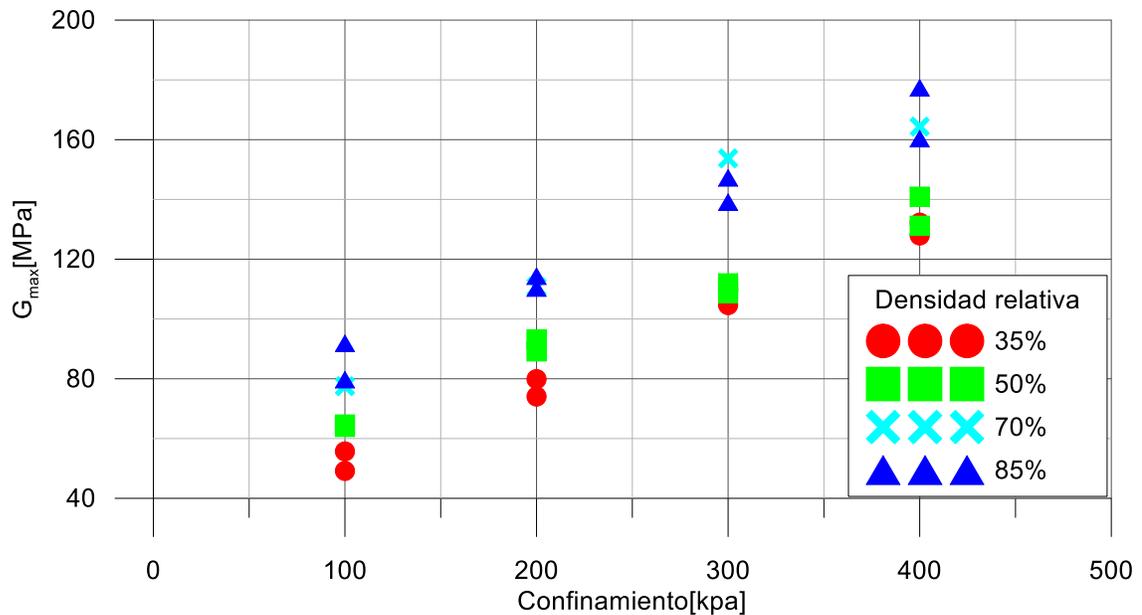


Figura 4. 9.- Módulo de rigidez máxima “G_{max}” versus confinamiento por densidad relativa. Columna resonante.

El parámetro “n” se obtiene de la relación de potencia del gráfico de “G_{max}” con respecto a “e” (Figura 4. 9); éste es igual a 0,56.

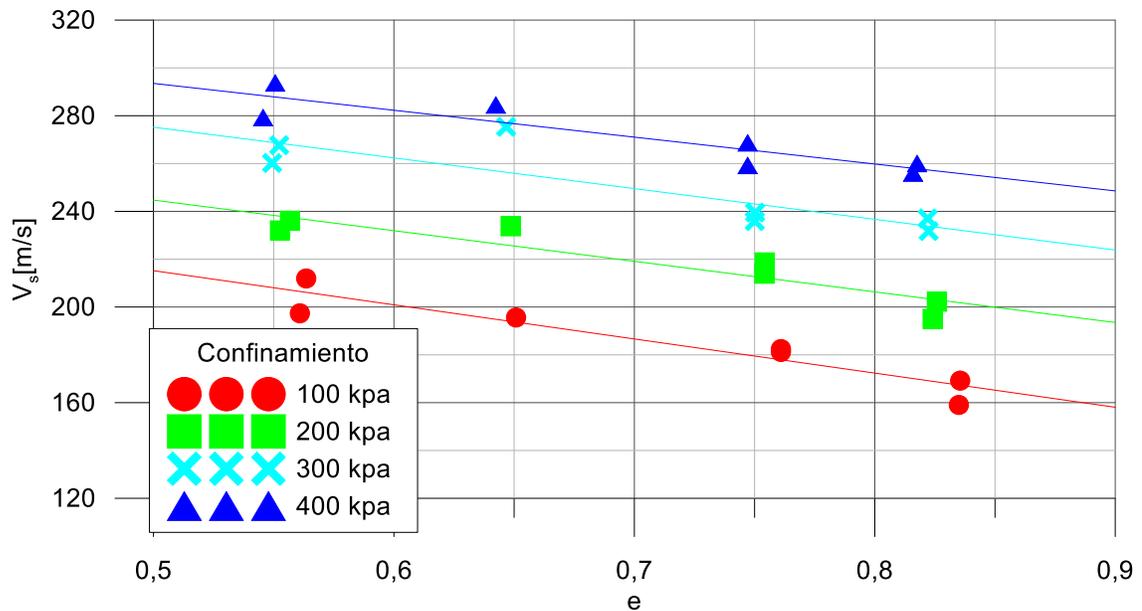


Figura 4. 10.- Velocidad de onda de corte “Vs” versus índice de vacíos “e” por confinamiento. Columna resonante.

El parámetro “B” se obtiene de la relación lineal del gráfico de “Vs” con respecto “e” (Figura 4. 10); éste es igual a 2,35.

La parametrización de los “G_{max}” de los ensayos de columna resonante es la siguiente:

$$G_{\max} [Mpa] = 2900 \frac{(2,35-e)^2}{(1+e)} (\sigma'_c [kpa])^{0,56} \quad (4.2)$$

El parámetro “A” es 2900 y el que mejor se ajusta a las curvas de la Figura 4. 10.

Del análisis del módulo de rigidez al corte inicial para ambos ensayos se puede agregar lo siguiente.

- Se observa que la tendencia entre el confinamiento efectivo “σ’_c” y el módulo “G_{max}” no pasa por cero en este eje. Esto debido posiblemente a que el peso o la trabazón de partículas del suelo (Figura 3. 2), el confinamiento provocado por la membrana, entre otros factores, generan una rigidez al corte independiente del confinamiento.
- Los parámetros “A” (~2900), “B” (~2,3) y “n” (~0,6) obtenidos están dentro de los rangos esperados, de acuerdo a la recopilación de datos de Ishihara, (1996) y Kokusho, (1980).

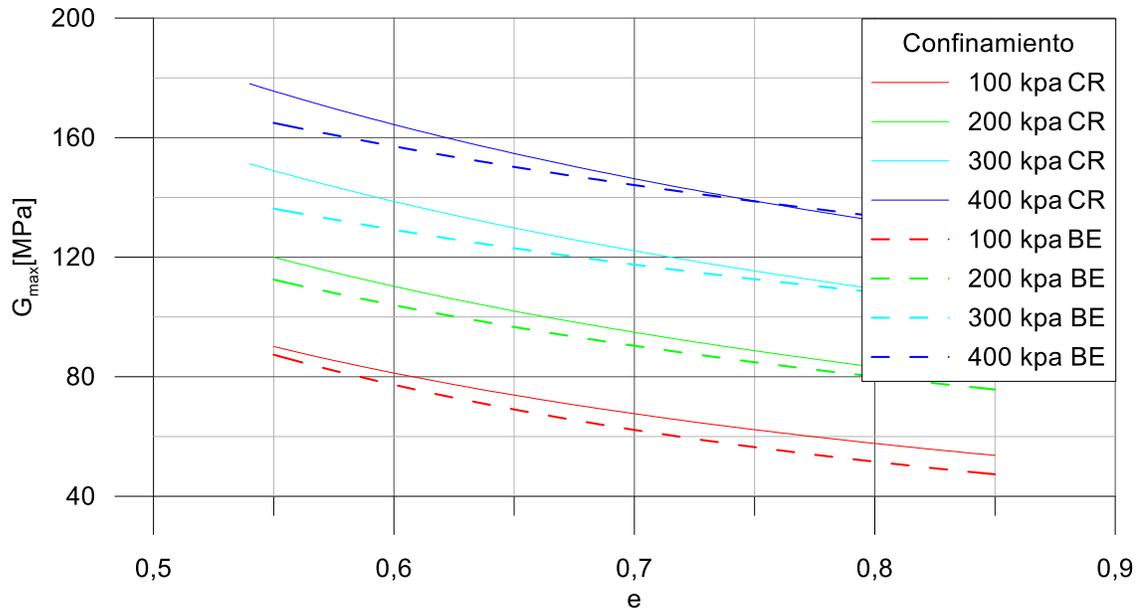


Figura 4. 11.-Comparación de “ G_{max} ” de ensayos de columna resonante CR y Bender Element BE.

Los resultados de “ G_{max} ” de columna resonante fueron mayores a los de *Bender Element* en un valor aproximado del 5%. Esto debido posiblemente a que las probetas se vieron menos alteradas en su confección o porque la distancia “ L_{TT} ” entre los piezoeléctricos del *Bender Element* se subestimó. Ambos ensayos entregaron curvas de forma similar, siendo más parecidas para menores confinamientos.

4.1.3 Módulo de rigidez al corte “ G_{max} ” y del amortiguamiento “D” a pequeñas y medianas deformaciones.

La obtención de estos parámetros se hizo con columna resonante.

Los distintos ensayos se marcaron con puntos, una línea continua marcó la curva mejor adaptada a ellos. Con cruces se marcaron los resultados considerados mal medidos, es decir, fuera de la tendencia esperada de acuerdo a la Figura 2. 4.

Los resultados obtenidos con los ensayos saturados van de la Figura 4. 12 a la Figura 4. 15. Inicialmente los ensayos se comparan por confinamiento efectivo.

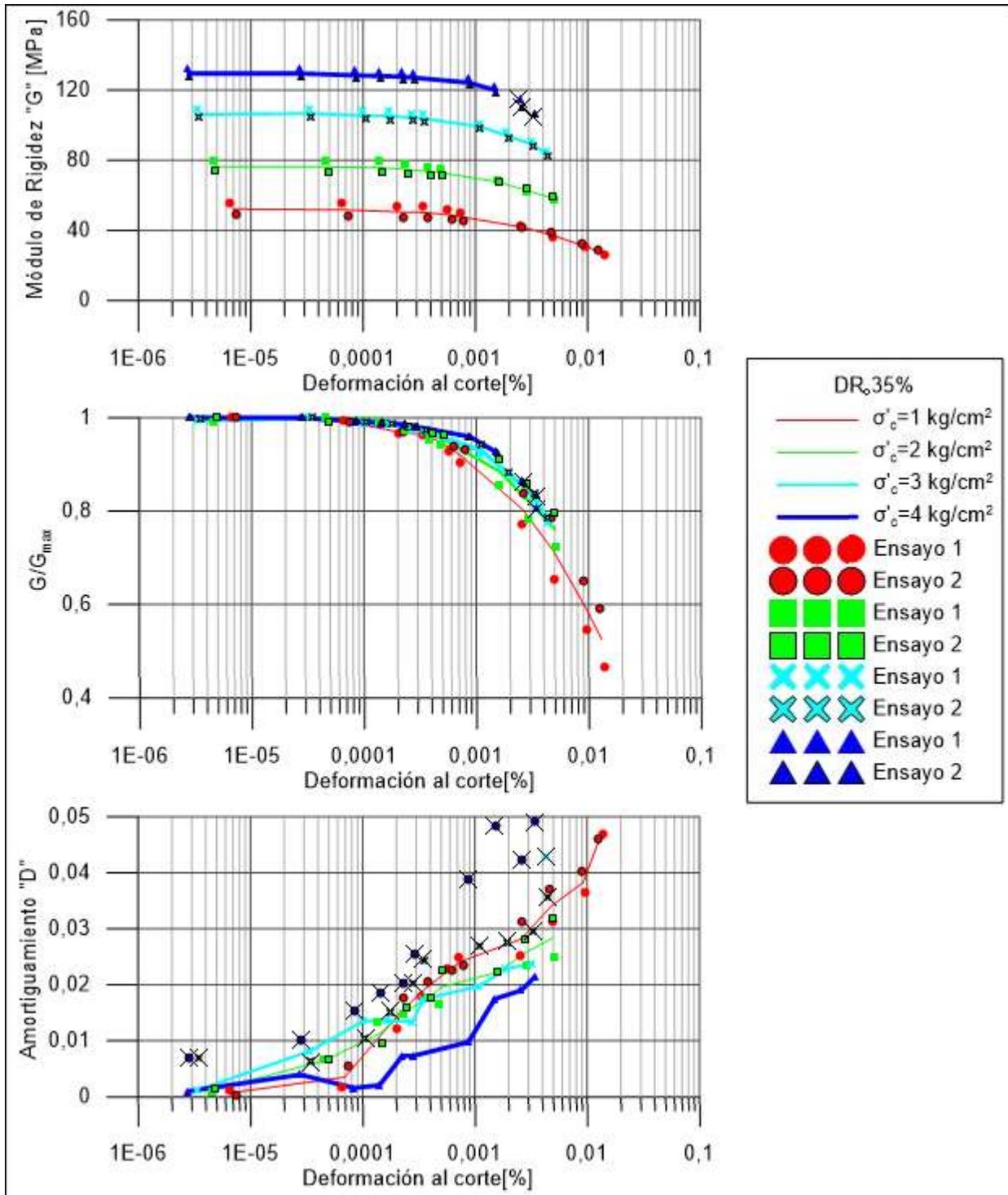


Figura 4. 12.-Ensayo columna resonante para "DR_o" del 35% por confinamiento para material saturado.

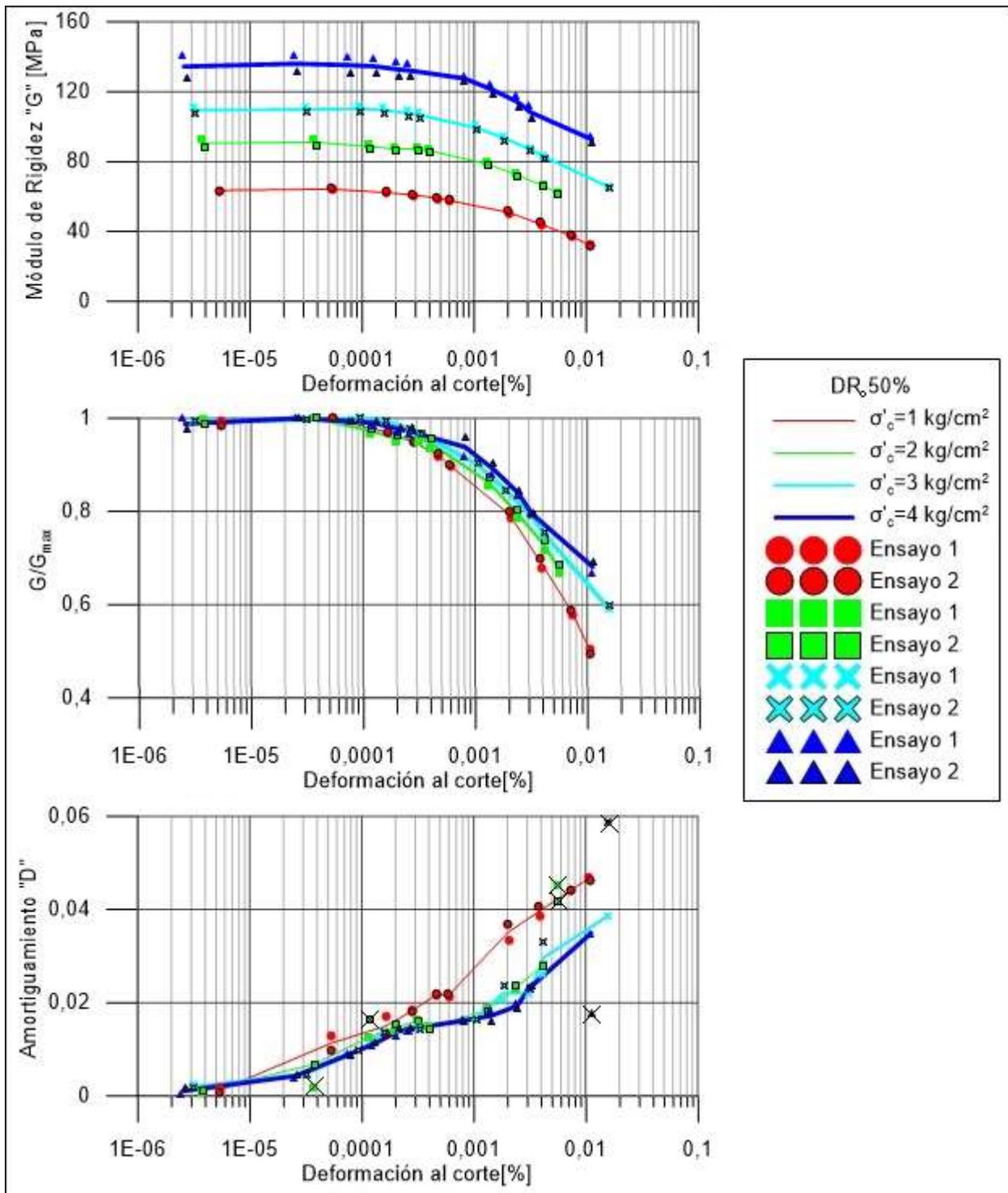


Figura 4. 13.- Ensayo columna resonante para "DR₀" del 50% por confinamiento para material saturado.

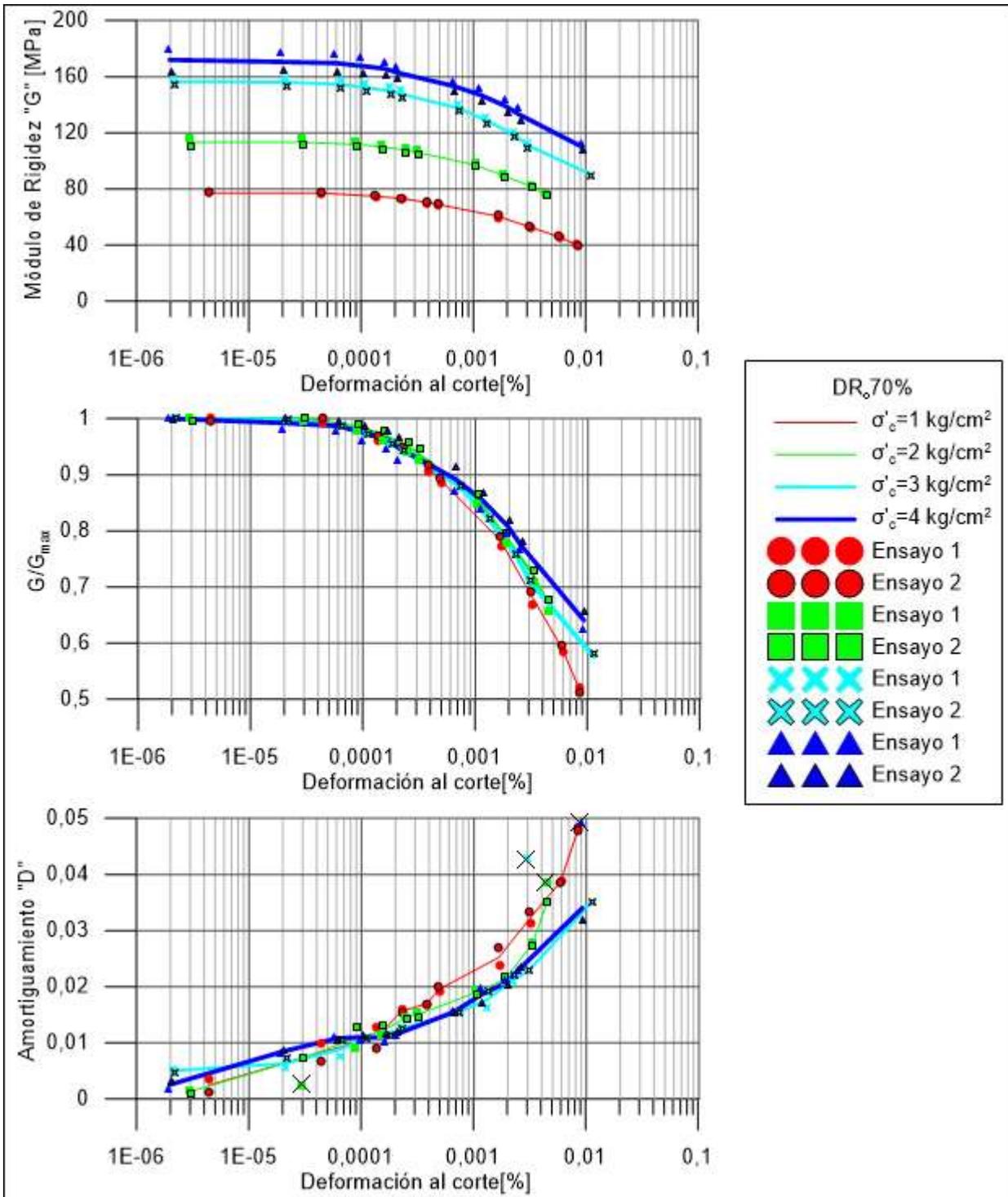


Figura 4. 14.- Ensayo columna resonante para "DR₀" del 70% por confinamiento para material saturado.

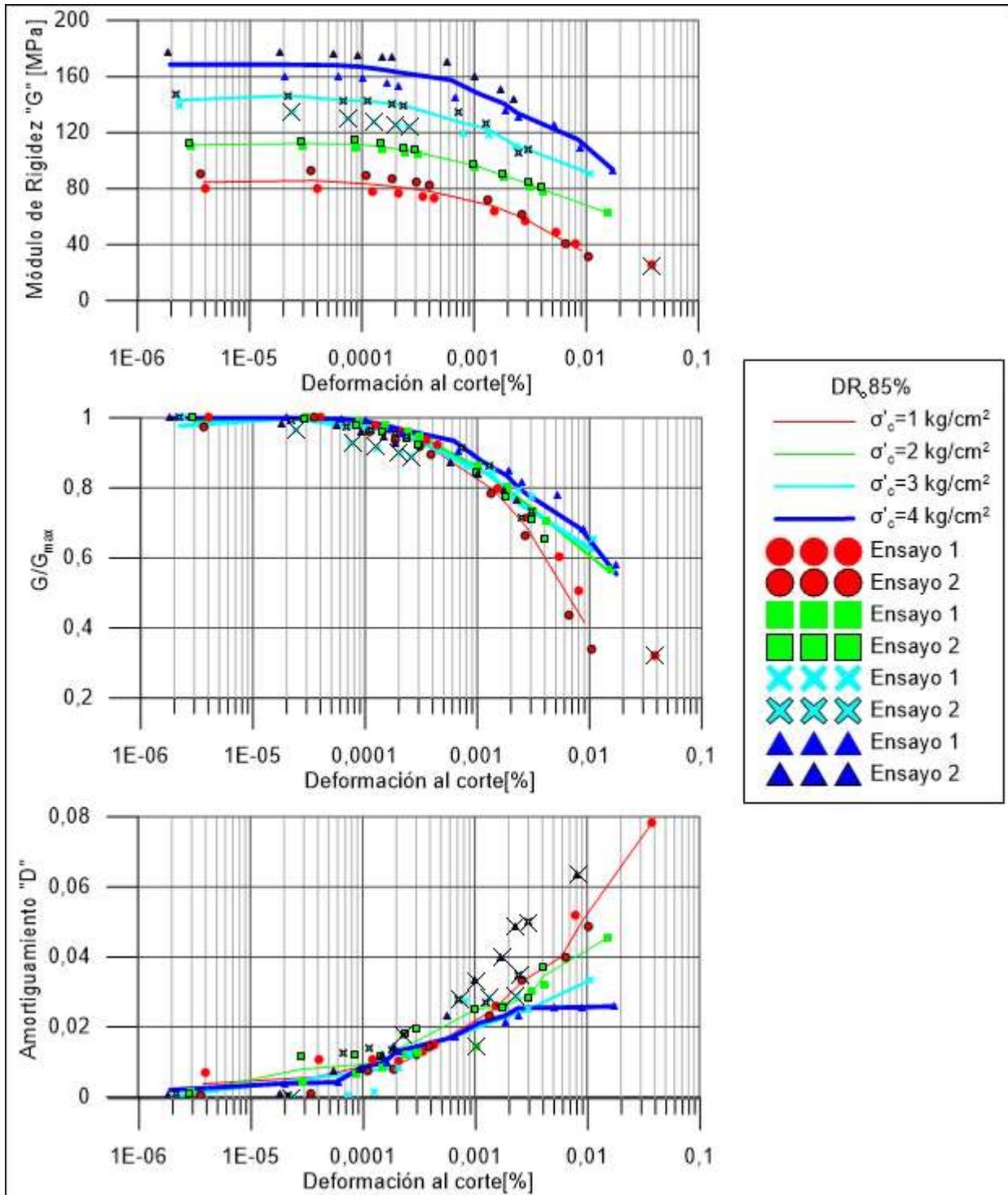


Figura 4. 15.- Ensayo columna resonante para "DR_{85%}" por confinamiento para material saturado.

En todos los ensayos se observa comportamiento elástico hasta deformaciones de corte unitarias de 10^{-6} (0,0001%). También se ve en los gráficos “ G/G_{max} ” de todos los ensayos que, a mayor confinamiento y deformación, menor es este parámetro. El parámetro “ G/G_{max} ” alcanzó valores de 0,5 (a DR menores) a 0,4 (a DR~85%) para deformaciones de corte unitarias cercanas a 10^{-4} (0,01%).

Para el ensayo a “DR_o” del 35%(Figura 4. 12) se puede señalar lo siguiente:

- Se eliminaron los últimos dos módulos de rigidez para el confinamiento de 4 [kg/cm²] porque en el gráfico “ G/G_{max} ” su curva asociada se cruzaba con las otras.
- Se eliminaron los amortiguamientos asociados a los confinamientos de 3 y 4 [kg/cm²] (ensayo 2) porque difieren con los otros resultados.
- Los resultados de amortiguamiento no son tan precisos como los de módulo de rigidez. Aun así, se puede observar que, a menor confinamiento mayor es la amortiguación.

Para el ensayo a “DR_o” del 50%(Figura 4. 13), se puede señalar lo siguiente:

- En el gráfico de amortiguamiento se eliminaron las mediciones que no seguían la tendencia esperada (por ejemplo, algunas asociadas al confinamiento de 2 [kg/cm²]).
- Se observa que el amortiguamiento asociado a un 1 [kg/cm²] es mayor que el de los otros confinamientos. A mayores confinamientos, los amortiguamientos no se diferencian tanto.

Para el ensayo a “DR_o” del 70%(Figura 4. 14) se puede señalar lo siguiente:

- En el gráfico de amortiguamiento, se eliminaron mediciones para evitar que las curvas se crucen con las asociadas a 1 [kg/cm²] de confinamiento.
- El comportamiento de los amortiguamientos es similar al ensayo de “DR_o” del 50%.

Para el ensayo a “DR_o” del 85%(Figura 4. 15) se puede agregar lo siguiente:

- Se eliminó el último módulo de rigidez para el confinamiento de 1 [kg/cm²] porque no sigue la tendencia de las otras curvas.
- Se eliminaron algunas mediciones de “G” para el confinamiento de 3 [kg/cm²], porque su degradación asociada era muy abrupta en comparación a las otras.
- Se eliminaron algunas mediciones de los amortiguamientos asociados a los confinamientos de 2 y 3 [kg/cm²] porque dieron mucho más grandes de lo esperado o porque dificultaban la lectura de las curvas.
- Las amortiguaciones dan muy parecidas a deformaciones de corte unitarias hasta el 10^{-5} (0,001%), después se separan y se cumple que, a mayor confinamiento menor es el amortiguamiento.

De lo anteriormente expuesto se puede deducir que, a mayor confinamiento efectivo, menor es la amortiguación.

A continuación, se toman los resultados anteriores de los ensayos de columna resonante para muestras saturadas a $1[\text{kg}/\text{cm}^2]$ de confinamiento y se comparan en función de la densidad relativa. Estos resultados se resumen en la siguiente figura:

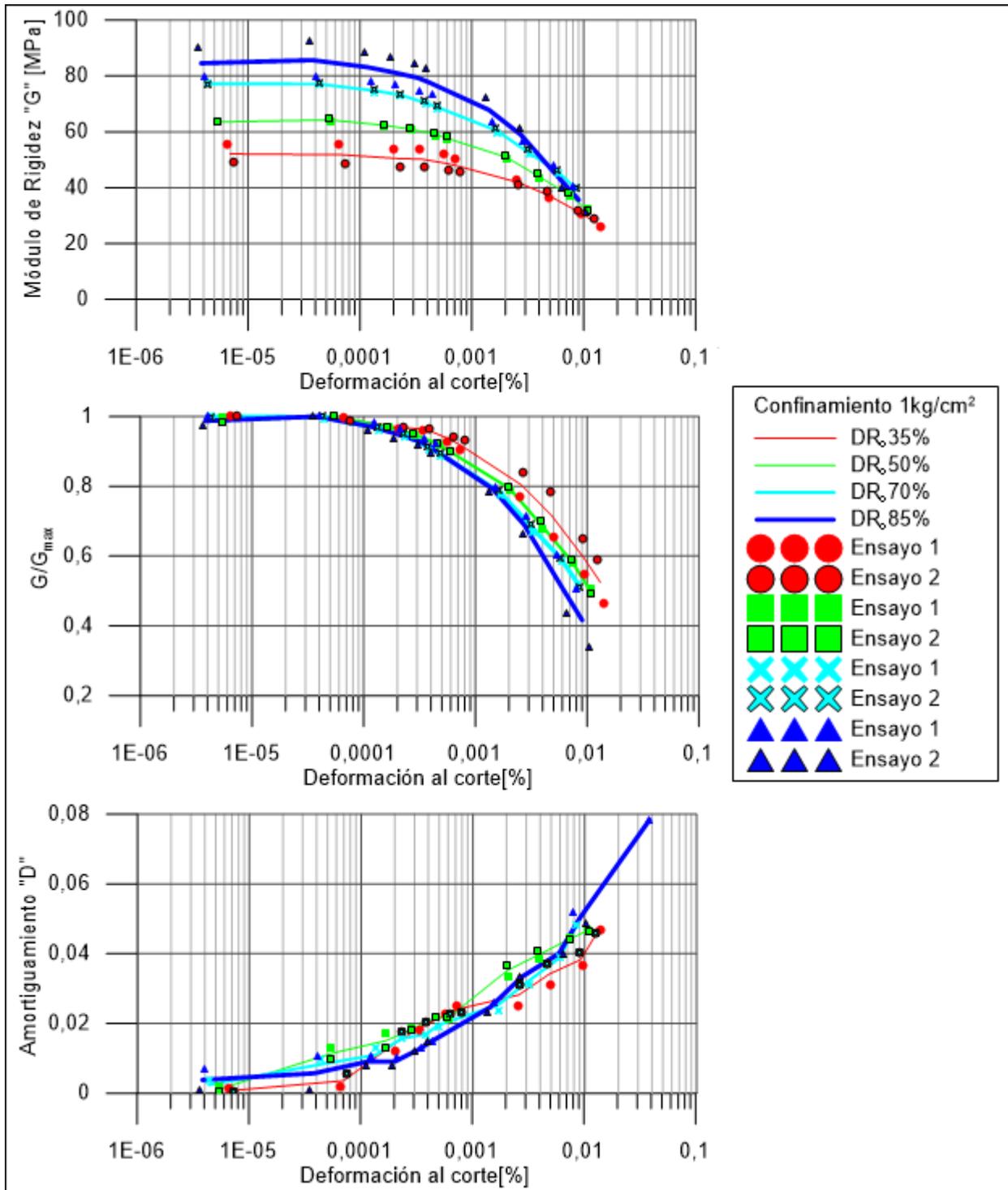


Figura 4. 16.- Ensayo columna resonante $1[\text{kg}/\text{cm}^2]$ de confinamiento por distintas "DR". Material saturado.

A continuación, se presentan los ensayos para las muestras con un 5% de humedad a una densidad relativa inicial del 70% (Figura 4. 17).

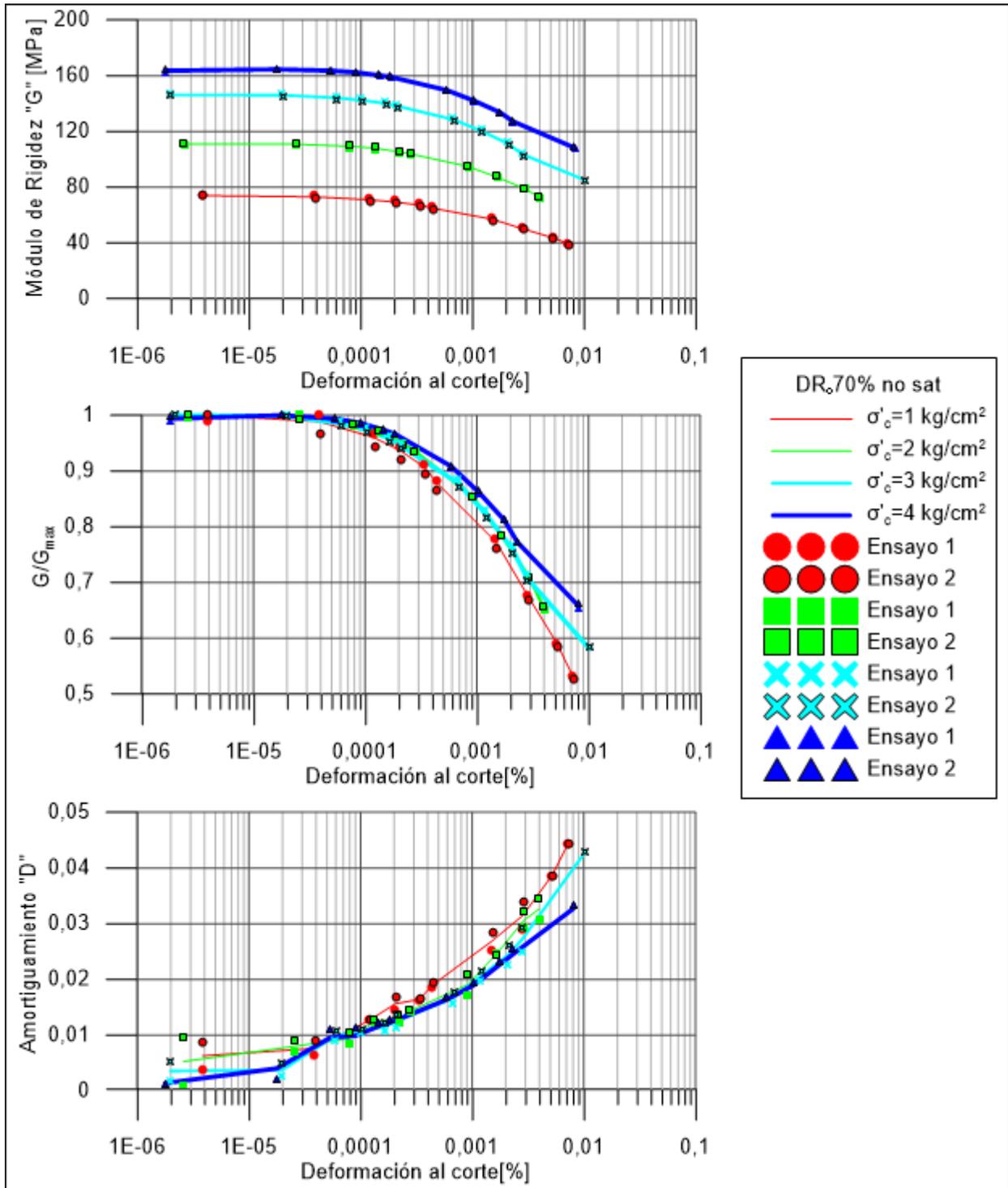


Figura 4. 17.- Ensayo columna resonante para "DR_o" del 70% por confinamiento para muestra al 5% de saturación.

En el caso de los resultados encontrados para 1 [kg/cm²] de confinamiento efectivo, para distintas densidades relativas (Figura 4. 16), se observa:

- A mayor deformación al corte, menor es el módulo de rigidez y mayor el amortiguamiento.
- Los módulos de rigidez “G” para las distintas densidades relativas se juntan en un punto a la deformación al corte de 0,01%.
- “G/G_{max}” aumenta a menor densidad relativa.
- El amortiguamiento no presenta mayor variación respecto a la densidad relativa.

Para los ensayos de muestras con un 5% de humedad al 70% de densidad relativa inicial (Figura 4. 17) se puede observar lo siguiente:

- Se observa comportamiento elástico hasta deformaciones de corte unitarias de 10⁻⁶(0,0001%).
- “G/G_{max}” alcanzó valores entre 0,5 y 0,7 dependiendo del confinamiento a deformaciones de corte unitarias cercanas a 10⁻⁴(0,01%).
- Los resultados de ambos ensayos dan más precisos en comparación a los de arena saturada.
- No se eliminó ninguna medición para la interpretación.
- Del gráfico “G/G_{max}” se observa que, a mayor confinamiento, menor es degradación de rigidez.
- Se puede ver que, a menor confinamiento mayor es la amortiguación.

Estos ensayos se comparan con los ensayos de arena saturada para “DR_o” del 70% (Figura 4. 18). Se puede observar lo siguiente:

- Los módulos de rigidez máximos del ensayo saturado fueron moderadamente mayores que los del ensayo no saturado. Esto debido al mayor porcentaje de humedad del material saturado, que aumenta su densidad.
- Los gráficos “G/G_{max}” y “D”, entregan resultados similares para ambos ensayos.

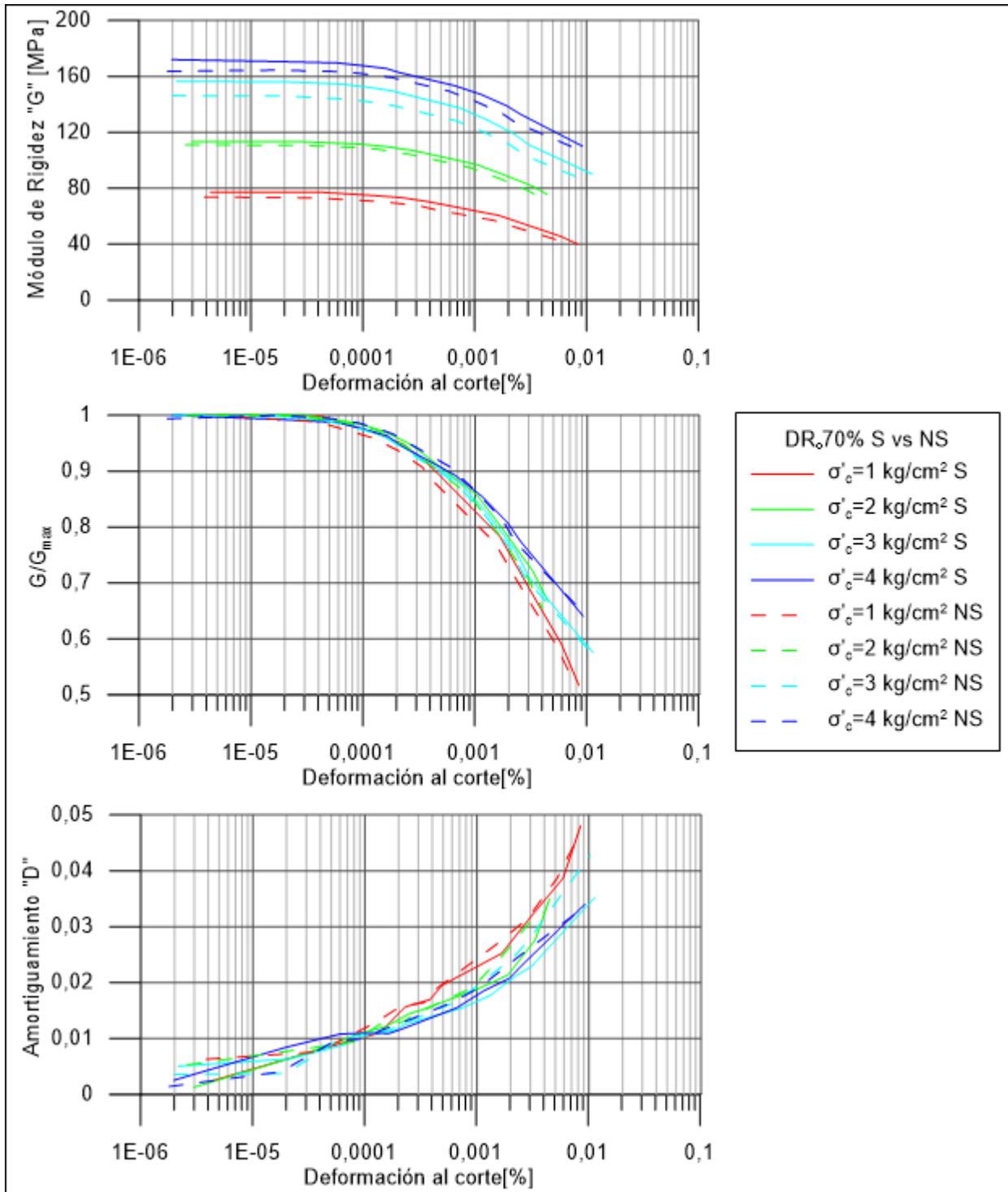


Figura 4. 18.-Ensayos de arena saturada respecto a muestras al 5% de S_r para "DR_o" del 70%.

5 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

El conocimiento de los parámetros dinámicos del suelo, como el módulo de rigidez y el amortiguamiento es necesario para poder estimar el comportamiento dinámico del suelo. Estas propiedades, determinadas con el ensayo de columna resonante, entregan información valiosa en el campo de la ingeniería sísmica.

Considerando que los ensayos de columna resonante presentan algunas dificultades en su desarrollo, es conveniente tomar en cuenta lo siguiente para su ejecución:

- Al momento de realizar el montaje, es necesario que los imanes queden lo más centrados y horizontales que sea posible dentro de las bobinas; de no ser así, los resultados no serán correctos. Es necesario, además, tener particular cuidado al usar llaves *Allen*, pues, si son imantadas podrían alterar la posición de los imanes del equipo.
- Para obtener resultados satisfactorios en la saturación del instrumento, siempre se deben revisar las mangueras, que deben estar limpias y sin zonas estranguladas. También se necesita usar papel filtro en ambos lados de la probeta para evitar que el material se filtre y tape los conductos del equipo. Para asegurar mejores resultados, las probetas se deben dejar saturando de un día para otro, pasando agua con un diferencial de presión equivalente a 2 metros. Además, el equipo consta de conductos muy delgados, por lo que se sugiere hacerlos más gruesos, facilitando así el proceso de saturación. A pesar de todos estos cuidados no se obtuvo el parámetro de saturación “B” deseado ($B \geq 0,95$) para todas las probetas. No obstante, se decidió proseguir con los ensayos, mientras “B” fuese mayor a 0,75, mientras el ensayo sea drenado (permite compresión de burbujas de aire de la probeta). También se puede añadir que después del 75% saturación no hay mayores variaciones del módulo “ G_{max} ” (S. Wu et al., (1984), Figura 2. 7).
- La aplicación de presión de cámara y contrapresión se debe hacer lentamente, para evitar alteraciones en el montaje de la muestra, considerando el interfaz agua/aire dentro de la cámara.
- Al momento de aplicar el voltaje, evitar que sea superior a 0,3 V, pues podrían producir deformaciones más allá del comportamiento elástico de la probeta (lo que impide repetitividad de ensayos (D4015-15, 2016)). Como consecuencia, se podría llegar a la licuación de material en muestras húmedas de baja densidad relativa.

El análisis de los resultados de la campaña experimental desarrollada en la presente tesis, para investigar el comportamiento dinámico frente a pequeñas deformaciones para arenas de relave del muro del tranque El Torito (Mina de cobre El Soldado) en probetas de arena entre 35% y 85% de densidad relativa, y confinamientos entre 1 [kg/cm^2] y 4 [kg/cm^2], permite concluir lo siguiente:

Para la obtención del módulo de corte máximo o inicial “G_{max}”:

- En los ensayos de *Bender Element* y columna resonante, el valor de “G_{max}” se comporta de acuerdo a la literatura ((Hardin & Richart, 1963); Figura 2. 8), donde este aumenta con el crecimiento del confinamiento efectivo “σ’_c” y disminuye a mayor índice de vacíos “e”, formando una curva descendente.
- Los ensayos de *Bender Element* y columna resonante entregaron resultados similares, en especial a bajos confinamientos (Figura 4. 11), lo que les da consistencia a los resultados.
- Los “G_{max}” de columna resonante fueron moderadamente mayores (5%) a los de *Bender Element*, debido a que las probetas del primer tipo de ensayo se vieron menos alteradas en su confección o porque la distancia “L_{TT}” entre los piezoeléctricos del *Bender Element* se subestimó
- La velocidad “V_s” a pequeñas deformaciones (10⁻⁶ a 10⁻⁵ %), asociada al material estudiado fluctuó entre 140 y 300 [m/s]. Cabe mencionar que dichos valores de “V_s” son consistentes para una arena de relaves, considerando los rangos de confinamiento efectivo y densidades relativas utilizadas. Por otro lado, el módulo de corte máximo “G_{max}” fluctuó entre 40 y 180 [MPa]. Dichos valores son bajos considerando que se trata de arena (de acuerdo a la Tabla 2. 2), lo cual puede ser por el explicado alto contenido de finos del material (Iwasaki & Tatsuoka, 1977).
- Los parámetros “A” (~2900), “B”(~2,3) y “n”(~0,6), obtenidos de la parametrización de Hardin & Richart, (1963), están dentro de los rangos esperados, de acuerdo a lo obtenido en literatura (Ishihara, (1996) y Kokusho, (1980)). La parametrización de “G_{max}” es la siguiente:

$$G_{\max}[Mpa] = 2900 \frac{(2,3 - e)^2}{(1 + e)} (\sigma'_c[kpa])^{0,6}$$

- El parámetro “n” (indicador de contacto entre partículas) es alto considerando que el suelo ensayado es una arena, donde éste varía normalmente entre 0,3 y 0,5 (Whitman & Dobry, 1997). Esto se puede argumentar pues el material, al tener suelo fino, tiene mayor contacto entre sus granos (Cascante & Santamarina, 1996).

El ensayo de columna resonante es muy costoso para la obtención de “G_{max}”, por lo cual es conveniente hacer ensayos de *Bender Element* laboratorio, o bien ensayos geofísicos en terreno.

Para la obtención del módulo de rigidez al corte “G” y del amortiguamiento “D” a pequeñas y medianas deformaciones:

- Todas las curvas de degradación del módulo de corte y amortiguamiento varían respecto a su deformación de corte con una tendencia que concuerda con lo presentado en el marco teórico (Figura 2. 4). En general, los valores obtenidos para el módulo de rigidez resultaron ser más precisos (con menor fluctuación) que aquellos obtenidos para el amortiguamiento.

- Al comparar resultados de “ G/G_{max} ” obtenidos en esta memoria con resultados históricos (Figura 5. 1), estos están dentro del rango esperado (Khouri, 1984).
- En todos los ensayos de columna resonante se ve un comportamiento elástico hasta deformaciones de corte “ γ_t^{ep} ” de 10^{-6} (0,0001%). Estas deformaciones son bajas, pero se pueden explicar por la no plasticidad del material (Vucetic, (1994); Figura 2. 5). Este parámetro disminuye a mayor confinamiento y/o densidad relativa.
- Las curvas de degradación de rigidez disminuyen bastante con la deformación, llegando a valores de “ G/G_{max} ” entre 0,4 y 0,5 para las distintas densidades relativas a deformaciones de corte cercanas a 10^{-4} (0,01%). Se sabe que el límite de deformación viscosa “ γ_t^v ” se encuentra para “ G/G_{max} ” entre 0,6 y 0,85 (Vucetic, 1994), lo que hace pensar que las muestras se iban degradando a medida que se proseguía con los ensayos.
- Se observa que, a mayor confinamiento para la misma densidad relativa, mayor es la relación “ G/G_{max} ” y menor el amortiguamiento, lo cual concuerda con la bibliografía (Stokoe et al., 1999, Figura 2. 10).
- Se observa que, a mayor confinamiento, mientras mayor es la densidad relativa, menor es la relación “ G/G_{max} ” de acuerdo a lo esperado en arenas con alto índice de vacíos (Camacho-Tauta, 2011). Por otro lado, el amortiguamiento no presenta mayor variación respecto a la densidad relativa de acuerdo a lo esperado en bibliografía (Kokusho, 1980; Figura 2. 11).

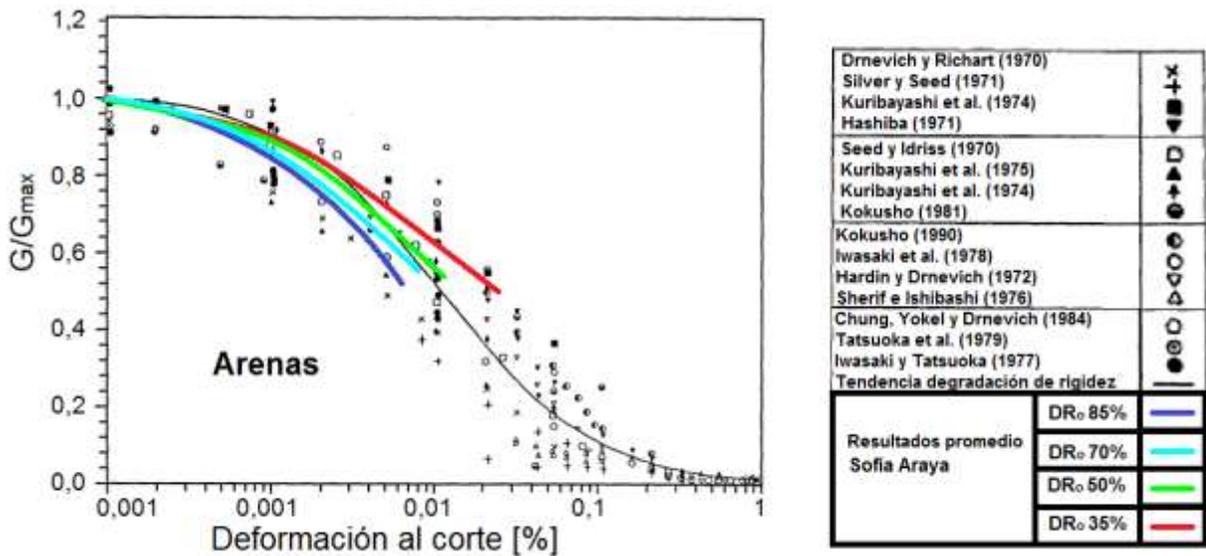


Figura 5. 1.-Resultados de memoria comparados con resultados históricos, para “ σ'_c ” = 1kg/cm².(Khouri, 1984)

De la comparación entre muestras saturadas y las con un 5% de humedad, se puede observar lo siguiente:

- Los valores " V_s " a pequeñas deformaciones (10^{-6} a 10^{-5} %), son mayores en las muestras con un 5% de humedad respecto a las que son saturadas. Esto debido a la capilaridad generada en los ensayos al 5% de humedad, que genera succión entre los granos del material, juntándolos y facilitando el paso de la onda cortante.
- Los valores de " G_{max} " fueron moderadamente mayores en las muestras saturadas que en con un 5% de humedad. Esto sería debido al mayor porcentaje de humedad del material saturado, que genera mayores densidades " ρ " del material (" G_{max} " depende de densidad húmeda del material ensayado).
- El grado de saturación de la muestra no saturada ($S_r=5\%$) no es el óptimo, porque no se asocia a una rigidez inicial máxima (observar Figura 2. 7, S. Wu et al., 1984).
- Los gráficos " G/G_{max} " y " D ", entregan resultados similares para ambas muestras.

El ensayo de columna resonante es aquel que mejor representa la degradación de rigidez y amortiguamiento a pequeñas y medianas deformaciones, pues cubre un mayor rango de deformación respecto a otros ensayos dinámicos. Esta curva también se puede obtener combinando ensayos triaxiales cíclicos a bajas deformaciones con ensayos *Bender Element*.

Se sugiere realizar ensayos variando el contenido de finos y/o porcentaje de saturación en próximas investigaciones, con el fin de entender mejor el comportamiento del material a pequeñas deformaciones. También se propone hacer ensayos de columna resonante para a suelo seco y comparar los resultados con los del material saturado, para observar si hay variaciones entre las curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Camacho-Tauta, J. F. (2011). *Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods*. Technical University of Lisbon.
- Camacho-Tauta, J. F., David, J., & Álvarez, J. (2012). A procedure to calibrate and perform the Bender Element test., *176*, 10–18.
- Camacho Tauta, J. F. (2011). *Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods*. Universidad técnica de Lisboa.
- Cascante, G., & Santamarina, C. (1996). Interparticle contact behavior and wave propagation. *Journal of Geotechnical Engineering*.
- Cepeda, D., & Lopez, L. (2010). *Caracterización dinámica de suelos; estado del arte e implementación del laboratorio*. Universidad Industrial de Santander.
- D4015-15, A. (2016). *Modulus and damping of soils by fixed-base resonant column devices ASTM D4015-15*. <http://doi.org/10.1520/D4015-15>.
- D7181, A. (2011). *Standard test drained triaxial compression test for soils*.
- Das, B. M. (1993). Principles of soil dynamics. *Boston: PWS-KENT Publishing Company*.
- Díaz, J. (2005). *Dinámica de suelos*. Limusa, México.
- Drnevich, V. P. (1978). *MP S-78-6 Resonant column test*. Lexington, Kentucky.
- Dyvik, R., & Madshus, C. (1985). Lab measurements of Gmax using bender elements. In *Proc, ASCE Annual Convention on Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions*. (pp. 186–196). Detroit, Michigan.
- GDS Instruments. (2010). GDS Resonant column., 1–35.
- Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972). Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter Effects. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division.*, 98(September 10, 1970), 603–624.
- Hardin, B. O., & Richart, F. E. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of Soil Mechanics & Foundations.*, 89(3407).
- Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake engineering*. Tokio.
- Iwasaki, T., & Tatsuoka, F. (1977). Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands. *Soils and Foundations*, 17(3).
- Khoury, N. (1984). *Dynamic properties of soils*. Syracuse University.

- Kokusho. (1981). In situ dynamic properties and their evaluation. In *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering*.
- Kokusho, T. (1980). Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. *Soils and Foundations.*, 20(2).
- Kovacs, W. D., & Leo, E. (1981). Cyclic simple shear of large-scale sand samples: Effects of diameter to height ratio. In *Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. (3rd ed., pp. 599–620). St Louis.
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering.
- Leong, E., Yeo, S., & Raharjo, H. (2015). Measuring shear wave velocity using bender elements. *Geotechnical Testing Journal*, 28(5), 1–11.
- López, D. A. M., & Cruz, L. M. P. (2012). *Implementación del ensayo de columna resonante*. Universidad Militar de Nueva Granada.
- Love, A. E. H. (1911). *Some Problems of Geodynamics*. Cambridge University Press.
- Luna, R., & Jaid, H. (2000). Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods. In *Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure*. (pp. 1–15). St. Louis.
- Rayleigh, L. (1985). No Ton Waves Propagated Along the Plane Surface of an Elastic Solid. *Proceedings of the London Mathematical Society.*, 17(1), 4–11.
- Richard, F. E., Woods, R. E., & Hall Jr, J. R. (1970). Vibration of soils and foundations. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs*.
- Santibañez, D. H. (2006). Determinación del Potencial de Licuefacción de Suelos no Cohesivos Saturados Bajo Cargas Sísmicas Usando el Ensayo de Penetración Estándar.
- Seed, H. B., & Lee, K. L. (1966). Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92(6), 105–134.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., & Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering.*, 112(11).
- Shirley, D. J., & Anderson, A. L. (1975). *Acoustic and Engineering propertie of sediments*.
- Shirley, D. J., & Hampton, L. D. (1978). Shear-wave measurement in laboratory sediments. *J Acoust Soc Am.*, 63, 607–613.

- Stokoe, K. H., Darendeli, M. B., Andrus, R. D., & Brown, L. T. (1999). Dynamic Soil Properties: Laboratory, Field and Correlation Studies, Theme Lecture. In *Proceedings of the Second International Conference Earthquake Geotechnical Engineering*. (pp. 811–845). Lisbon, Portugal.
- Umu, S. U., Okur, D. V., Tuncan, M., & Tuncan, A. (2012). An Experimental Comparison between the Shear and the Plane Waves by Using Resonant Column Test. In *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. (Vol. 4, p. 865).
- Vargas, M. (2015). *Efecto Acoplado de la Presión de Confinamiento y el Corte Estático Inicial en la Resistencia Cíclica de Arena de Relaves*. Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas.
- Vucetic, M. V. (1994). Cyclic threshold shear strain in soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 120(12).
- Whitman, R., & Dobry, R. (1997). *Soil Dynamics*.
- Wu, S., Gray, D. H., & Richart Jr, F. E. (1984). Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts. *Journal of Geotechnical Engineering.*, 110(9).
- Wu, Z. (2014). *Measuring dynamic properties of wind turbine foundation soil in resonant column - Issues and challenges*. Universidad de Wisconsin-Madison.

7 ANEXOS

7.1 CARACTERIZACIÓN DE ARENA DE RELAVE EL TORITO.

7.1.1 Granulometría

A continuación, están las fórmulas que sirven para el cálculo de la granulometría.

- Coeficiente de Uniformidad, “ C_u ”:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (7.1)$$

Coeficiente de Curvatura, “ C_c ”:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (7.2)$$

Donde “ D_{10} ” y “ D_{30} ” y “ D_{60} ” son los diámetros del suelo por donde pasa el 10 %, el 30 % y el 60 % del material respectivamente.

- Porcentaje de suelo retenido “ R_i ” [%]:

$$R_i = \frac{P_r}{P_t} * 100 \quad (7.3)$$

Donde “ P_r ” corresponde al peso retenido por la malla y “ P_t ” es el peso total.

- Porcentaje de suelo acumulado retenido “ R_{ai} ” [%]:

$$R_{ai} = \sum R_i \quad (7.4)$$

Tabla 7. 1.-Granulometría 1.

Tamiz N°	Diámetro[mm]	Pesos[g]	R_{ai} [%]	% que pasa
10	2	0,03	0,01	99,99
30	0,6	5,81	1,95	98,05
40	0,425	16,37	7,40	92,60
50	0,3	35,12	19,11	80,89
100	0,15	112,95	56,76	43,24
200	0,075	78,34	82,87	17,13
Lavado	0,001	51,38	100,00	0,00
Total		300		

Tabla 7. 2.-Granulometría 2.

Tamiz N°	Diámetro[mm]	Pesos[g]	R _{ai} [%]	% que pasa
10	2	0,1	0,03	99,97
30	0,6	5,54	1,91	98,09
40	0,425	14,62	6,84	93,16
50	0,3	34,59	18,53	81,47
100	0,15	111,13	56,08	43,92
200	0,075	78,44	82,58	17,42
Lavado	0,001	51,57	100,00	0,00
Total		295,99		
Pérdida	4,01			

Tabla 7. 3.-Granulometría 3.

Tamiz N°	Diámetro[mm]	Pesos[g]	R _{ai} [%]	% que pasa
10	2	0,08	0,03	99,97
30	0,6	6,32	2,13	97,87
40	0,425	17,39	7,93	92,07
50	0,3	35,41	19,73	80,27
100	0,15	109,65	56,29	43,71
200	0,075	77,59	82,15	17,85
Lavado	0,001	53,56	100,00	0,00
Total		300		

Tabla 7. 4.-Granulometría 4.

Tamiz N°	Diámetro[mm]	Pesos[g]	R _{ai} [%]	% que pasa
10	2	0,04	0,01	99,99
30	0,6	6,06	2,03	97,97
40	0,425	16,04	7,38	92,62
50	0,3	35,98	19,38	80,62
100	0,15	110,83	56,32	43,68
200	0,075	76,85	81,94	18,06
Lavado	0,001	54,16	100,00	0,00
Total		300		

Tabla 7. 5.-Granulometría 5.

Tamiz N°	Diámetro[mm]	Pesos[g]	R _{ai} [%]	% que pasa
10	2	0,08	0,03	99,97
30	0,6	5,67	1,92	98,08
40	0,425	14,89	6,89	93,11
50	0,3	35,27	18,65	81,35
100	0,15	109,44	55,17	44,83
200	0,075	79,21	81,61	18,39
Lavado	0,001	55,12	100,00	0,00
Total		300		

7.1.2 Hidrometría

A continuación, están las fórmulas que sirven para el cálculo de la hidrometría.

- Corrección por temperatura, “FT”:

$$FT = -4,85 + 0,25 * T \quad (7.5)$$

Donde “T” representa la temperatura del líquido del hidrómetro.

- Lectura corregida del hidrómetro, “Rcp”:

$$Rcp = R + FT - FZ \quad (7.6)$$

Donde “R” es la lectura del hidrómetro, “FT” la corrección por temperatura y “FZ” la corrección por cero.

- Porcentaje que pasa, “P” [%]:

$$P = \frac{a * Rcp * 100}{W_s} \quad (7.7)$$

Donde “a” es un factor y “W_s” es el peso seco del material depositado en el hidrómetro.

- Factor “a”:

$$a = 1,65G_s / (2,65 * (G_s - 1)) \quad (7.8)$$

Donde “G_s” es el peso específico del suelo.

- Corrección por menisco, “Rcl”:

$$Rcl = R + FM \quad (7.9)$$

Donde “FM” es la corrección por menisco.

- Factor “L” [cm]:

$$L = -0,164 * Rcl + 16,3 \quad (7.10)$$

- Diámetro de la partícula, “D” [mm]:

$$D = A * \sqrt{L/t} \quad (7.11)$$

Donde “A” es un factor y “t” [min] el tiempo de deposición del material.

Tabla 7. 6.-Parámetro A. Norma ASTM D422.

G _s	Temperatura [°C]						
	17	18	19	20	21	22	23
2,5	0,0149	0,0147	0,0145	0,0143	0,0141	0,014	0,0138
2,55	0,0146	0,0144	0,0143	0,0141	0,0139	0,0137	0,0136
2,6	0,0144	0,0142	0,014	0,0139	0,0137	0,0135	0,0134
2,65	0,0142	0,014	0,0138	0,0137	0,0135	0,0133	0,0132
2,7	0,014	0,0138	0,0136	0,0134	0,0133	0,0131	0,013
2,75	0,0138	0,0136	0,0134	0,0133	0,0131	0,0129	0,0128
2,8	0,0136	0,0134	0,0132	0,0131	0,0129	0,0128	0,0126

Tabla 7. 7.-Hidrometría 1.

Hidrometría 1	FZ		6	FM		1			
Tiempo[min]	Lectura H.	Temperatura [°C]	FT	Rcp	%que pasa	Rcl	L[cm]	A	D[mm]
0,5	43	20,6	0,3	37,3	72,7	44	9,1	0,013	0,055
1	37	20,6	0,3	31,3	61,0	38	10,1	0,013	0,041
2	30	20,6	0,3	24,3	47,4	31	11,2	0,013	0,031
4	25,5	20,6	0,3	19,8	38,6	26,5	12,0	0,013	0,022
6	23,8	20,6	0,3	18,1	35,3	24,8	12,2	0,013	0,019
8	22	20,6	0,3	16,3	31,8	23	12,5	0,013	0,016
10	21,5	20,6	0,3	15,8	30,8	22,5	12,6	0,013	0,015
12	20,8	20,6	0,3	15,1	29,4	21,8	12,7	0,013	0,013
15	20,5	20,6	0,3	14,8	28,8	21,5	12,8	0,013	0,012
20	19,4	20,6	0,3	13,7	26,7	20,4	13,0	0,013	0,010
25	17,5	20,6	0,3	11,8	23,0	18,5	13,3	0,013	0,009
30	17	20,6	0,3	11,3	22,0	18	13,3	0,013	0,0087
45	15,8	20,5	0,275	10,075	19,6	16,8	13,5	0,0132	0,0072
60	14,9	20,5	0,275	9,175	17,9	15,9	13,7	0,0132	0,0063
90	13,9	20,5	0,275	8,175	15,9	14,9	13,9	0,0132	0,0052
120	13,5	20,5	0,275	7,775	15,2	14,5	13,9	0,0132	0,0045
180	12,8	20,4	0,25	7,05	13,7	13,8	14,0	0,0132	0,0037
240	12,5	20,4	0,25	6,75	13,2	13,5	14,1	0,0132	0,0032
300	12,1	20,4	0,25	6,35	12,4	13,1	14,2	0,0132	0,0029
360	12	20,4	0,25	6,25	12,2	13	14,2	0,0132	0,0026
1440	10,5	19,2	-0,05	4,45	8,7	11,5	14,4	0,0133	0,0013

Tabla 7. 8.-Hidrometría 2.

Hidrometría 2		FZ	6		FM	1			
Tiempo[min]	Lectura H.	Temperatura [°C]	FT	Rcp	%que pasa	Rcl	L[cm]	A	D[mm]
0,5	43	20,6	0,3	37,3	72,7	44	9,1	0,013	0,055
1	35	20,6	0,3	29,3	57,1	36	10,4	0,013	0,042
2	30	20,6	0,3	24,3	47,4	31	11,2	0,013	0,031
4	25	20,6	0,3	19,3	37,6	26	12,0	0,013	0,023
6	23	20,6	0,3	17,3	33,7	24	12,4	0,013	0,019
8	22	20,6	0,3	16,3	31,8	23	12,5	0,013	0,016
10	21	20,5	0,275	15,275	29,8	22	12,7	0,0132	0,015
12	20,2	20,5	0,275	14,475	28,2	21,2	12,8	0,0132	0,014
15	19,5	20,5	0,275	13,775	26,8	20,5	12,9	0,0132	0,012
20	19,3	20,5	0,275	13,575	26,5	20,3	13,0	0,0132	0,011
25	17,8	20,5	0,275	12,075	23,5	18,8	13,2	0,0132	0,010
30	17,1	20,5	0,275	11,375	22,2	18,1	13,3	0,0132	0,0088
45	15,9	20,5	0,275	10,175	19,8	16,9	13,5	0,0132	0,0072
60	15,2	20,5	0,275	9,475	18,5	16,2	13,6	0,0132	0,0063
90	14,3	20,5	0,275	8,575	16,7	15,3	13,8	0,0132	0,0052
120	13,9	20,5	0,275	8,175	15,9	14,9	13,9	0,0132	0,0045
180	13	20,4	0,25	7,25	14,1	14	14,0	0,0132	0,0037
240	12,6	20,4	0,25	6,85	13,3	13,6	14,1	0,0132	0,0032
300	12,3	20,4	0,25	6,55	12,8	13,3	14,1	0,0132	0,0029
360	12	20,4	0,25	6,25	12,2	13	14,2	0,0132	0,0026
1440	10,6	19,3	0,025	4,575	8,9	11,6	14,4	0,0133	0,0013

A continuación, se muestra el resultado combinado de los ensayos de granulometría e hidrometría. Donde “C_u” y “C_c” son 4,95 y 1,32 respectivamente.

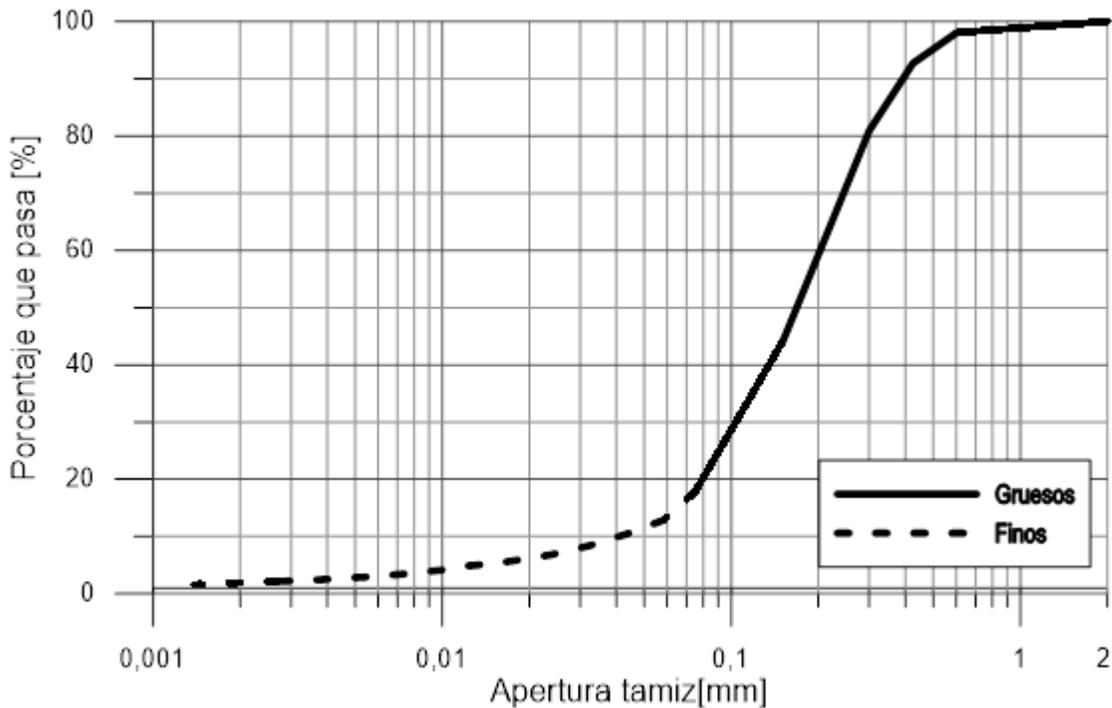


Figura 7. 1.-Distribución granulométrica de arena del muro del tranque de relaves "El torito"

7.1.3 Peso específico

A continuación, se muestran las fórmulas que sirven para el cálculo de peso específico:

- Peso específico, “G_s”:

$$G_s = \frac{W_s}{W_{\rho w,t} - (W_{\rho w s,t} - W_s)} \quad (7.12)$$

Donde “W_s” es el peso del suelo seco; “W_{ρws,t}” es el peso del suelo, agua y picnómetro a la temperatura “t” y “W_{ρw,t}” es el peso del picnómetro y el agua.

- Peso del picnómetro y del agua, “W_{ρw,t}”:

$$W_{\rho w,t} = W_p + V_p * \gamma_{w,t} \quad (7.13)$$

Donde “W_p” es el peso del picnómetro, “V_p” es el volumen del picnómetro, “γ_{w,t}” es la densidad del agua, medida a la temperatura “t”.

Tabla 7. 9.-Peso específico 1.

G _{s1}	Valor	Unidad
Densidad de Agua a 4°C	1	[g/cm ³]
Peso Picnómetro + agua + suelo, W _{pws,t}	363,67	[g]
Peso Picnómetro + agua, W _{pw,t}	344,5	[g]
Peso suelo seco, W _s	30	[g]
Temperatura del agua	22,8	[°C]
Volumen del Sólido	10,86	[cm ³]
Densidad Seca del Sólido	2,76	[g/cm ³]
Gravedad Específica de los Sólidos, G _s	2,76	

Tabla 7. 10.- Peso específico 2.

G _{s2}	Valor	Unidad
Densidad de Agua a 4°C	1	[g/cm ³]
Peso Picnómetro + agua + suelo, W _{pws,t}	364,63	[g]
Peso Picnómetro + agua, W _{pw,t}	345,4	[g]
Peso suelo seco, W _s	30	[g]
Temperatura del agua	23,2	[°C]
Volumen del Sólido	10,80	[cm ³]
Densidad Seca del Sólido	2,78	[g/cm ³]
Gravedad Específica de los Sólidos, G _s	2,78	

Tabla 7. 11.- Peso específico 3.

G _{s3}	Valor	Unidad
Densidad de Agua a 4°C	1	[g/cm ³]
Peso Picnómetro + agua + suelo, W _{pws,t}	363,79	[g]
Peso Picnómetro + agua, W _{pw,t}	344,48	[g]
Peso suelo seco, W _s	30	[g]
Temperatura del agua	23	[°C]
Volumen del Sólido	10,72	[cm ³]
Densidad Seca del Sólido	2,80	[g/cm ³]
Gravedad Específica de los Sólidos, G _s	2,80	

Tabla 7. 12.- Peso específico 4.

G _{s4}	Valor	Unidad
Densidad de Agua a 4°C	1	[g/cm ³]
Peso Picnómetro + agua + suelo, W _{pws,t}	361,33	[g]
Peso Picnómetro + agua, W _{pw,t}	342,24	[g]
Peso suelo seco, W _s	30	[g]
Temperatura del agua	23,3	[°C]
Volumen del Sólido	10,94	[cm ³]
Densidad Seca del Sólido	2,74	[g/cm ³]
Gravedad Específica de los Sólidos, G _s	2,74	

Tabla 7. 13.- Peso específico 5.

G _{s5}	Valor	Unidad
Densidad de Agua a 4°C	1	[g/cm ³]
Peso Picnómetro + agua + suelo, W _{pw,t}	364,66	[g]
Peso Picnómetro + agua, W _{pw,t}	345,39	[g]
Peso suelo seco, W _s	30	[g]
Temperatura del agua	23,2	[°C]
Volumen del Sólido	10,76	[cm ³]
Densidad Seca del Sólido	2,79	[g/cm ³]
Gravedad Específica de los Sólidos, G _s	2,79	

Finalmente, el promedio de todos los ensayos de peso específico entrega un valor de G_s igual a 2,77.

7.1.4 Densidades mínima y máxima.

A continuación, se muestran las fórmulas que sirven para el cálculo las densidades mínima y máxima:

- Índice de vacíos, “e”:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (7.14)$$

Donde “V_v” es el volumen de vacíos y “V_s” el volumen de sólidos del material.

- Densidad del suelo, “γ_d”:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} \quad (7.15)$$

Donde “W_s” es el peso seco del material y “V_t” su volumen total.

Tabla 7. 14.-Densidad mínima del material usando método por deposición lenta.

Densidad mínima con método por deposición lenta.			
Altura Molde	h_1	4	[cm]
	h_2	4	[cm]
	h	4	[cm]
Diámetro Molde	d_1	5,98	[cm]
	d_2	5,99	[cm]
	D	5,985	[cm]
Área Molde	A	28,1	[cm ²]
Volumen Molde	V_t	112,5	[cm ³]
Peso suelo+Molde	W_{s1}	961,82	[g]
	W_{s2}	960,69	[g]
	W_{s3}	962,67	[g]
Peso Molde	PM	810,97	[g]
Densidad Natural	γ_{tmin}	1,34	[g/cm ³]
Humedad	ω_1	0,0015	[%]
Densidad Mínima	γ_{dmin}	1,338	[g/cm ³]
Índice de vacíos máximo	e_{max}	1,074	

Tabla 7. 15.-Densidad máxima del material usando método japonés.

Densidad máxima con método japonés			
Altura Molde	h_1	7,08	[cm]
	h_2	7,08	[cm]
	H	7,08	[cm]
Diámetro Molde	d_1	3,54	[cm]
	d_2	3,545	[cm]
	D	3,543	[cm]
Área Molde	A	9,856	[cm ²]
Volumen Molde	V_{min}	69,782	[cm ³]
Peso suelo + Molde	W_{s1}	754,67	[g]
	W_{s2}	755,88	[g]
	W_{s3}	758,07	[g]
Peso Molde	PM	629,1	[g]
Densidad Natural	γ_{tmax}	1,821	[g/cm ³]
Humedad	ω_1	0,047%	[%]
Densidad Mínima	γ_{dmax}	1,821	[g/cm ³]
Índice de vacíos mínimo	e_{min}	0,524	

7.1.5 Proctor Modificado.

A continuación, se muestran las fórmulas que sirven para el ensayo proctor modificado:

- Densidad total o húmeda, “ γ_t ”:

$$\gamma_t = \frac{W_h}{V_t} \quad (7.16)$$

Donde “ W_h ” es el peso húmedo del material y “ V_t ” el volumen del molde del proctor.

- Densidad seca, “ γ_d ” (Ecuación 7.15).
- Curva de saturación, “S”:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w S}{S + \omega G_s} \quad (7.17)$$

Donde “ G_s ” es el peso específico, “ γ_w ” la densidad del agua y “ ω ” es la humedad del agua.

Tabla 7. 16.-Ensayo proctor modificado. En amarillo está la densidad máxima.

Molde N°	Humedad		Pesos			V_t [cm ³]	Densidad	
	Aparente [%]	Real [%]	PM+W _t [g]	PM[g]	W _t [g]		γ_t [g/cm ³]	γ_d [g/cm ³]
1	6	6,19	3715	1921	1794	937,2	1,91	1,8
2	8	7,93	3740	1921	1819	937,2	1,94	1,8
3	10	10	3765	1921	1844	937,2	1,97	1,79
4	12	12,1	3815	1921	1894	937,2	2,02	1,8
5	14	13	3865	1921	1944	937,2	2,07	1,84
6	16	14,4	3855	1921	1934	937,2	2,06	1,8
7	18	15,1	3845	1922	1923	937,2	2,05	1,78

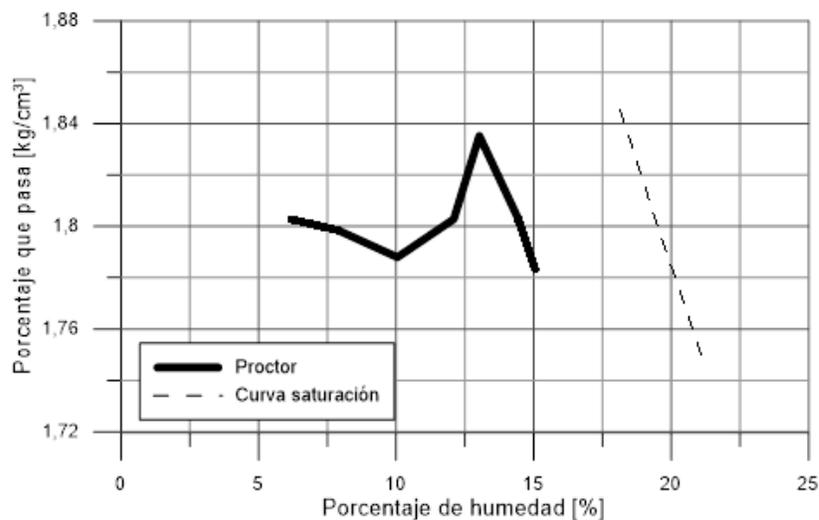


Figura 7. 2.-Ensayo proctor modificado.

7.1.6 Densidad Relativa DR [%].

$$DR = \frac{\gamma_{max}(\gamma_d - \gamma_{min})}{\gamma_d(\gamma_{max} - \gamma_{min})} \quad (7.18)$$

Tabla 7. 17.-Tabla de densidad relativa.

γ_{dmax}	1,835	[g/cm ³]
γ_{dmin}	1,338	[g/cm ³]
H	10	[cm]
D	5	[cm]

DR [%]	γ_d [g/cm ³]	$\gamma_{5\%h}$ [g/cm ³]	W_h [g]	Masa capa húmeda[g]	W_s [g]	W_w [g]
100	1,835	1,927	378,36	75,67	360,34	18,02
95	1,802	1,892	371,45	74,29	353,77	17,69
90	1,769	1,858	364,80	72,96	347,43	17,37
85	1,738	1,825	358,38	71,68	341,31	17,07
80	1,708	1,794	352,18	70,44	335,41	16,77
75	1,679	1,763	346,19	69,24	329,71	16,49
70	1,651	1,734	340,41	68,08	324,20	16,21
65	1,624	1,705	334,81	66,96	318,87	15,94
60	1,598	1,678	329,40	65,88	313,71	15,69
55	1,572	1,651	324,15	64,83	308,72	15,44
50	1,548	1,625	319,07	63,81	303,88	15,19
45	1,524	1,600	314,15	62,83	299,19	14,96
40	1,501	1,576	309,38	61,88	294,65	14,73
35	1,478	1,552	304,75	60,95	290,24	14,51
30	1,456	1,529	300,25	60,05	285,96	14,30
25	1,435	1,507	295,89	59,18	281,80	14,09
20	1,415	1,485	291,65	58,33	277,77	13,89
15	1,395	1,464	287,54	57,51	273,84	13,69
10	1,375	1,444	283,53	56,71	270,03	13,50
5	1,356	1,424	279,64	55,93	266,32	13,32
0	1,338	1,405	275,85	55,17	262,72	13,14

Donde “ γ_d ” y “ $\gamma_{5\%h}$ ” son las densidades del suelo secas y al 5% de humedad respectivamente, mientras que, “ $W_{5\%h}$ ”, “ W_s ” y “ W_w ” son los pesos del suelo al 5% de humedad, del suelo seco y del agua respectivamente.

7.2 BENDER ELEMENT

7.2.1 Generador de señales y su manejo

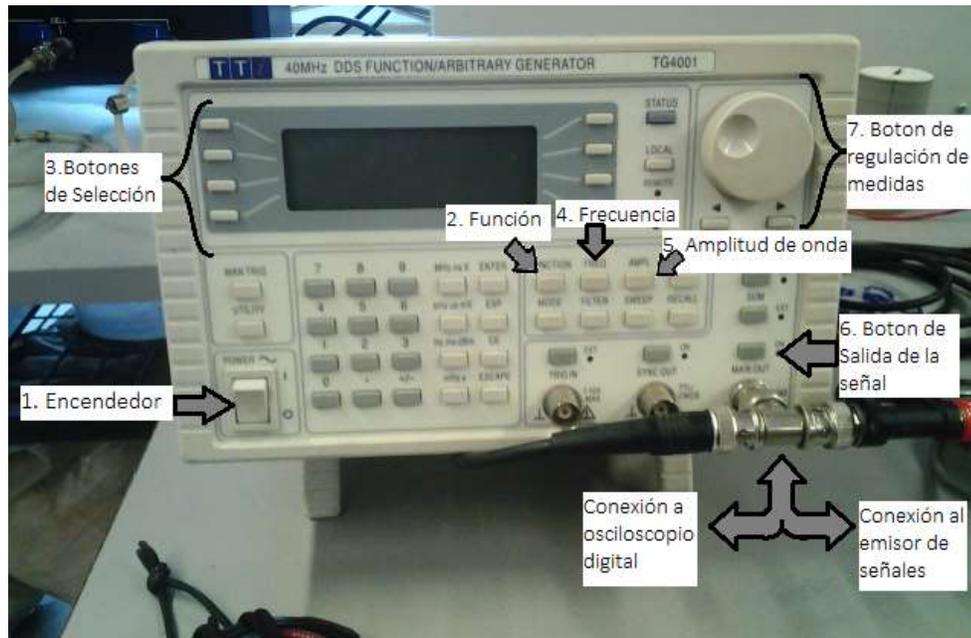


Figura 7. 3.-Generador de señales.

Se deben seguir los siguientes pasos:

- Prender el equipo de generación de señales.
- Apretar botón de función (2) y seleccionarla con el botón (3). Recomendación: usar señal cuadrada.
- Apretar botón de frecuencia (4) y regular su tamaño con los botones de regulación de medidas (7). Recomendación: 20 [Hz].
- Apretar botón de amplitud (5) y regular su tamaño con los botones de regulación de medidas (7). Recomendación: 20 [Vpp].
- Hacer partir la señal con el botón (6).

7.2.2 Osciloscopio digital y su manejo

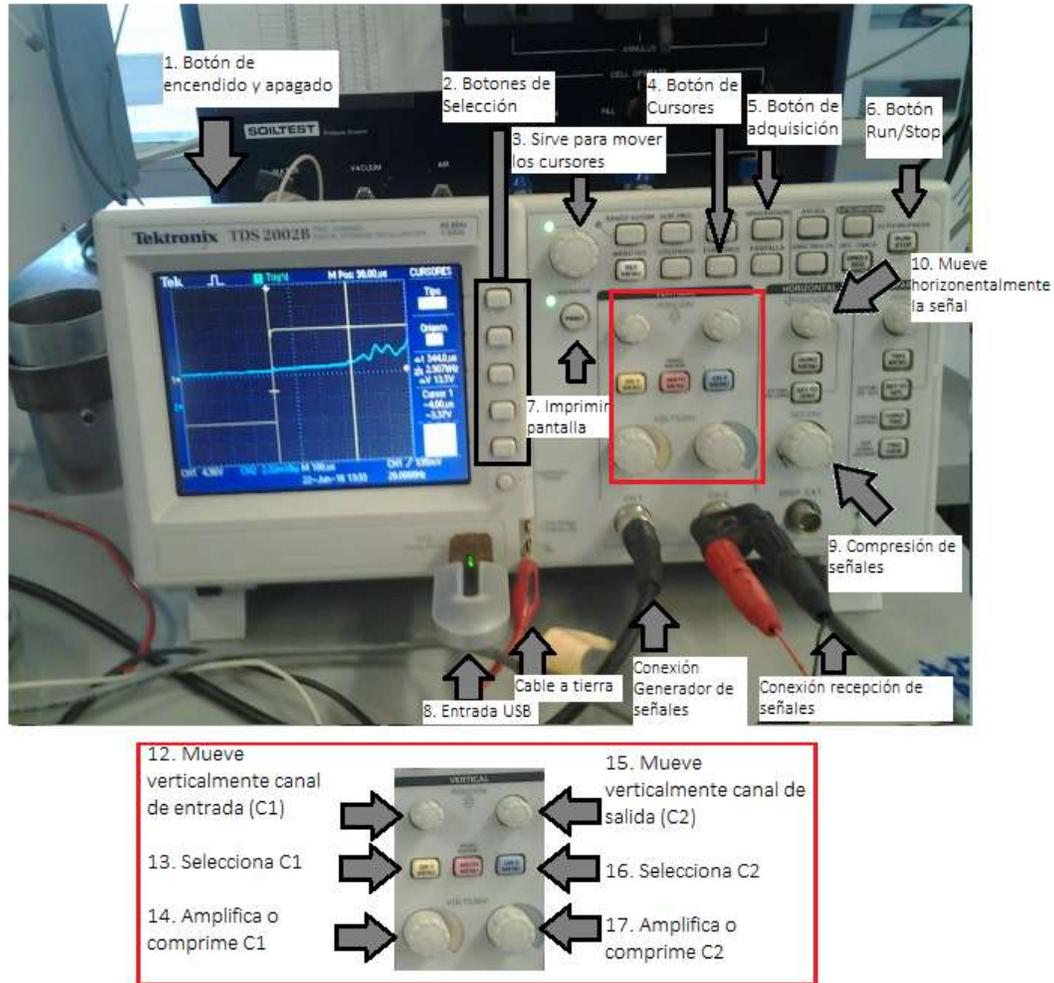


Figura 7. 4.-Osciloscopio digital.

Se deben seguir los siguientes pasos:

- Prender osciloscopio digital con el botón (1).
- Encontrar las señales. Seleccionando la que se requiera (perillas 13 o 16), moviéndola de arriba hacia abajo (perillas 12 o 15) y/o amplificándola (perillas 14 o 17).
- Comprimir las señales con el botón (9) de modo que se vea un solo salto de la señal cuadrada de entrada (amarilla) y el momento en que la señal de salida (celeste) pega un salto.
- Presionar botón de cursores (4), seleccionar el cursor 1 (2) y moverlo a $t=0$ donde salta la señal de entrada (perilla 3). Después seleccionar el cursor 2 (2) y moverlo al momento que salta la señal de salida (perilla 3). Anotar tiempo que se demora en recorrer la onda.
- Insertar pendrive de máximo 1 [Gb] de memoria.
- Detener la señal con el botón *run/stop* (6).
- Grabar con botón *print* (7). Hacer partir la señal con botón *run/stop* (6).

NOTAS:

- En el botón adquisición (5) usar una media de 128 lecturas para evitar que la señal de salida se vea muy difusa.
- Presionar el botón *set to zero* (11) para que el salto de señal cuadrática parta de cero.
- Las corrientes de los canales 1 y 2 deben ser del tipo continua.

7.3 COLUMNA RESONANTE

7.3.1 Obtención de Parámetro de Rigidez (G)

La siguiente figura muestra que, al aplicar una torsión “T” en un elemento de suelo a una distancia “x” del origen, este girará un ángulo “θ”, donde la torsión en la sección situada en “x + Δx” viene dada por la expresión “T+(∂T/∂x) *Δx”, mientras que el giro correspondiente es “θ+(∂θ/∂x) *Δx”.

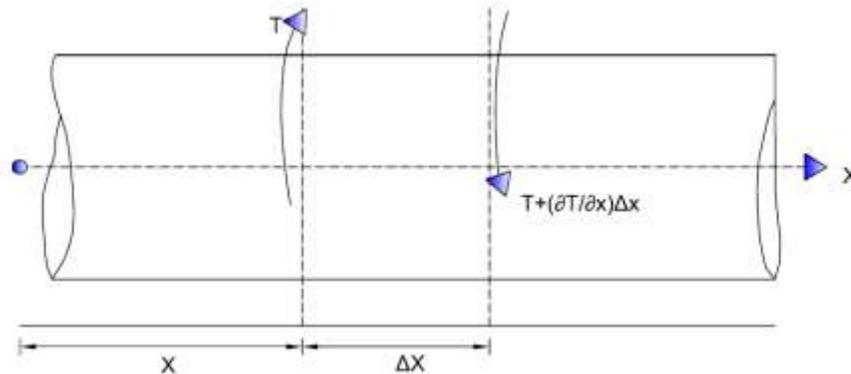


Figura 7. 5.-Ondas torsionales en un elemento diferencial de suelo.

Aplicando la segunda ley de Newton se tiene que:

$$-T + \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x \right) = \rho I \Delta x \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (7.19)$$

Siendo “I” momento polar de inercia de la columna del suelo y “ρ” la densidad.

$$I = \frac{m \cdot d^2}{8} \quad (7.20)$$

Donde “m” es la masa de la probeta y “d” su diámetro.

El momento torsor también puede ser expresado mediante la siguiente relación:

$$T = I * G * \partial \theta / \partial x \quad (7.21)$$

Reemplazando la ecuación (7.19) en la ecuación (7.21) se tiene la siguiente relación:

$$\frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad \leftrightarrow \quad V_s^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (7.22)$$

La solución de las ecuaciones de onda en su forma general es de la siguiente manera:

$$\theta(x, t) = \theta(x) (A_1 \text{sen}(w_n t) + A_2 \text{cos}(w_n t)) \quad (7.23)$$

Sustituyendo la ecuación (7.23) en la (7.22) se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\partial^2 \theta(x)}{\partial x^2} + \theta(x) \frac{w_n^2}{V_s^2} = 0 \quad (7.24)$$

Donde esta solución de “ θ ” se puede expresar de la siguiente forma:

$$\theta(x) = B_1 \text{sen}\left(\frac{w_n x}{V_s}\right) + B_2 \text{cos}\left(\frac{w_n x}{V_s}\right) \quad (7.25)$$

“ A_1 ”, “ A_2 ”, “ B_1 ” y “ B_2 ” son constantes, “ w_n ” es la frecuencia natural de la probeta y “ θ ” es la amplitud de distorsión angular a lo largo del cilindro a torsión.

Para obtener las constantes “ B_1 ” y “ B_2 ” se deben determinar las condiciones de contorno:

- Extremo fijo el extremo inferior:

$$X = 0 \Rightarrow \theta(x) = 0 \quad \Rightarrow \quad B_2 = 0$$

- Extremo superior libre con un cabezal de masa “ m ” donde se aplica un momento torsor “ T ”:

$$x = L \Rightarrow T = -\rho I_o L \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (7.26)$$

Siendo “ I_o ” el momento de inercia de la sección superior del equipo, y “ ρ ” la densidad del suelo.

El momento de inercia “ I_o ” es difícil de determinar matemáticamente, pero debido a la compleja geometría del sistema de accionamiento, su valor se obtiene mediante una calibración experimental.

Combinando las ecuaciones 7.19 y 7.23 se obtiene:

$$\frac{T}{IG} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = \left(\frac{B_1 w_n}{V_s}\right) \text{cos}\left(\frac{w_n x}{V_s}\right) (A_1 \text{sen}(w_n t) + A_2 \text{cos}(w_n t)) \quad (7.27)$$

Combinando las ecuaciones 7.26 y 7.23 se obtiene:

$$T = -\rho I_o L \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \rho I_o L B_1 w_n^2 \text{sen}\left(\frac{w_n x}{V_s}\right) (A_1 \text{sen}(w_n t) + A_2 \text{cos}(w_n t)) \quad (7.28)$$

Igualando las torsiones de las ecuaciones 7.27 y 7.28 para $x=L$ se tiene:

$$\frac{IG}{V_s} \cos\left(\frac{w_n L}{V_s}\right) = \rho I_o L w_n \text{sen}\left(\frac{w_n L}{V_s}\right) \quad (7.29)$$

Expresando "G" en función de la velocidad de onda de corte se tiene:

$$\frac{I}{I_o} = \left(\frac{w_n L}{V_s}\right) \tan\left(\frac{w_n L}{V_s}\right) = \beta \tan\beta \quad (7.30)$$

Donde la velocidad de onda de corte, " V_s " [m/s] se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{w_n L}{\beta} = 2\pi f_r L / \beta \quad (7.31)$$

Donde " f_r " corresponde a la frecuencia de resonancia de la probeta obtenida en el ensayo, " L " es la longitud de la muestra y " β " es un parámetro de calibración en función de " I/I_o " que se obtiene de la Tabla 7. 18.

El módulo de corte "G" se calcula a partir de la velocidad de onda de corte:

$$G = \rho * V_s^2 \quad (7.32)$$

Tabla 7. 18.- Valores de “ β ” comúnmente encontrados para “ l/l_0 ”

l/l_0	β	l/l_0	β	l/l_0	β	l/l_0	β
0.001	0.03162	0.064	0.25032	0.127	0.34900	0.190	0.42256
0.002	0.04471	0.065	0.25222	0.128	0.35031	0.191	0.42360
0.003	0.05474	0.066	0.25411	0.129	0.35162	0.192	0.42464
0.004	0.06320	0.067	0.25599	0.130	0.35293	0.193	0.42568
0.005	0.07065	0.068	0.25785	0.131	0.35422	0.194	0.42671
0.006	0.07738	0.069	0.25970	0.132	0.35552	0.195	0.42774
0.007	0.08357	0.070	0.26153	0.133	0.35680	0.196	0.42876
0.008	0.08932	0.071	0.26335	0.134	0.35808	0.197	0.42979
0.009	0.09473	0.072	0.26515	0.135	0.35936	0.198	0.43081
0.010	0.09983	0.073	0.26694	0.136	0.36063	0.199	0.43183
0.011	0.10469	0.074	0.26872	0.137	0.36189	0.200	0.43284
0.012	0.10933	0.075	0.27048	0.138	0.36315	0.201	0.43385
0.013	0.11377	0.076	0.27224	0.139	0.36441	0.202	0.43486
0.014	0.11805	0.077	0.27398	0.140	0.36566	0.203	0.43587
0.015	0.12217	0.078	0.27571	0.141	0.36690	0.204	0.43687
0.016	0.12615	0.079	0.27742	0.142	0.36814	0.205	0.43787
0.017	0.13002	0.080	0.27913	0.143	0.36937	0.206	0.43886
0.018	0.13376	0.081	0.28082	0.144	0.37060	0.207	0.43986
0.019	0.13741	0.082	0.28250	0.145	0.37183	0.208	0.44085
0.020	0.14095	0.083	0.28417	0.146	0.37305	0.209	0.44184
0.021	0.14441	0.084	0.28583	0.147	0.37426	0.210	0.44282
0.022	0.14778	0.085	0.28748	0.148	0.37547	0.211	0.44380
0.023	0.15108	0.086	0.28912	0.149	0.37668	0.212	0.44478
0.024	0.15430	0.087	0.29075	0.150	0.37788	0.213	0.44576
0.025	0.15746	0.088	0.29237	0.151	0.37907	0.214	0.44673
0.026	0.16055	0.089	0.29397	0.152	0.38027	0.215	0.44770
0.027	0.16358	0.090	0.29557	0.153	0.38145	0.216	0.44867
0.028	0.16656	0.091	0.29716	0.154	0.38264	0.217	0.44964
0.029	0.16948	0.092	0.29874	0.155	0.38381	0.218	0.45060
0.030	0.17234	0.093	0.30031	0.156	0.38499	0.219	0.45156
0.031	0.17516	0.094	0.30187	0.157	0.38616	0.220	0.45252
0.032	0.17794	0.095	0.30342	0.158	0.38732	0.221	0.45347
0.033	0.18067	0.096	0.30497	0.159	0.38848	0.222	0.45443
0.034	0.18335	0.097	0.30650	0.160	0.38964	0.223	0.45538
0.035	0.18600	0.098	0.30803	0.161	0.39079	0.224	0.45632
0.036	0.18861	0.099	0.30954	0.162	0.39194	0.225	0.45727
0.037	0.19118	0.100	0.31105	0.163	0.39309	0.226	0.45821
0.038	0.19371	0.101	0.31255	0.164	0.39423	0.227	0.45915
0.039	0.19621	0.102	0.31405	0.165	0.39536	0.228	0.46009
0.040	0.19868	0.103	0.31553	0.166	0.39650	0.229	0.46102
0.041	0.20111	0.104	0.31701	0.167	0.39762	0.230	0.46195
0.042	0.20352	0.105	0.31847	0.168	0.39875	0.231	0.46288
0.043	0.20589	0.106	0.31994	0.169	0.39987	0.232	0.46381
0.044	0.20824	0.107	0.32139	0.170	0.40099	0.233	0.46474
0.045	0.21055	0.108	0.32283	0.171	0.40210	0.234	0.46566
0.046	0.21285	0.109	0.32427	0.172	0.40321	0.235	0.46658
0.047	0.21511	0.110	0.32570	0.173	0.40431	0.236	0.46749
0.048	0.21735	0.111	0.32713	0.174	0.40541	0.237	0.46841
0.049	0.21957	0.112	0.32854	0.175	0.40651	0.238	0.46932
0.050	0.22176	0.113	0.32995	0.176	0.40761	0.239	0.47023
0.051	0.22393	0.114	0.33136	0.177	0.40870	0.240	0.47114
0.052	0.22608	0.115	0.33275	0.178	0.40978	0.241	0.47205
0.053	0.22820	0.116	0.33414	0.179	0.41087	0.242	0.47295
0.054	0.23031	0.117	0.33552	0.180	0.41195	0.243	0.47385

7.3.2 Obtención de Parámetro de Deformación Torsional

La deformación torsional se calcula a partir del ángulo de torsión (calculado con la aceleración del sistema de accionamiento), la frecuencia de resonancia y la geometría de la probeta.

La aceleración del sistema es la siguiente (para factor de ganancia igual a 1000):

$$a \left(\frac{m}{s^2} \right) = 9,81 * V \quad (7.33)$$

Donde "V" [Volt] es el voltaje del acelerómetro que recibe el *Software* del equipo.

El desplazamiento del acelerómetro "Y_{ac}", se relaciona con la aceleración angular "ω".

$$a = \omega^2 * Y_{ac} \quad (7.34)$$

Donde

$$\omega = 2 * \pi * f_r \quad (7.35)$$

Siendo "f_r" la frecuencia de resonancia en [Hz].

Por lo tanto, el desplazamiento máximo del acelerómetro en la resonancia es:

$$Y_{ac} = \frac{9,81V}{4\pi^2 f_r^2} = \frac{0,24849V}{f_r^2} \quad (7.36)$$

Por simple geometría se puede ver que el ángulo de torsión "θ" de la muestra está relacionado con el desplazamiento del acelerómetro "Y_{ac}" y la distancia del acelerómetro al eje de rotación "L_{ac}" (θ = Y_{ac}/L_{ac}; Figura 7. 6)

Entonces:

$$\theta = \frac{Y_{ac}}{L_{ac}} = \frac{0,24849V}{0,04325 f_r^2} = 5,7454V / f_r^2 \quad (7.37)$$

Por último, considerando la geometría de la muestra, la deformación por corte "γ" para un sólido cilíndrico se obtiene de la ecuación (3.19), la cual está de acuerdo con el estándar de la columna resonante (GDS Instruments., 2010) .

$$\gamma = 0,8 \frac{R\theta}{L} = 4,596 \frac{V * R}{f_r^2 * L} \quad (7.38)$$

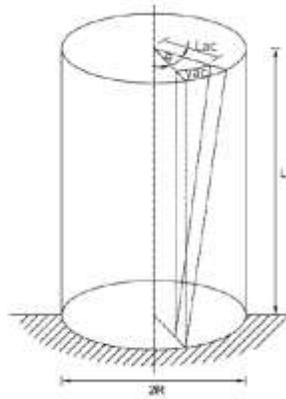


Figura 7. 6.- Obtención del parámetro "θ".

7.3.3 Calibración. Obtención de parámetro de inercia "I_o"

Obtener "I_o" (momento de inercia de la sección superior del equipo) es difícil de calcular matemáticamente, debido a la compleja geometría del sistema de accionamiento, por lo que su valor se encuentra experimentalmente.

Esto se logra mediante la calibración del aparato, ensayando con barras de calibración de metal (Figura 7. 7), cuyas propiedades mecánicas son conocidas. Se debe obtener la frecuencia de resonancia de cada barra, junto a distintos pesos que se añaden al sistema de accionamiento.



Figura 7. 7.-Barras de calibración.

En el ensayo, la barra de calibración, el sistema de accionamiento y los pesos se pueden suponer como péndulo de torsión con un grado de libertad, donde el sistema de accionamiento y los pesos adjuntos son la masa del péndulo, y la barra de calibración es el resorte torsional. La ecuación de movimiento para el sistema descrito anteriormente se puede escribir como:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{I_o}} \quad (7.39)$$

Donde "w_n" es la frecuencia natural radial de vibración de la muestra, "k" su rigidez e "I_o" el momento de inercia de la sección superior del equipo.

Una ecuación lineal que expresa las masas adicionales en términos de “ w_n ”, se puede derivar de la siguiente manera:

$$I_{am} = k/w_n^2 + I_o \quad (7.40)$$

Donde “ I_{am} ” es el momento polar de inercia de los pesos añadidos.

Graficando “ I_{am} ” contra “ $1/w^2$ ”, se obtiene “ I_o ” en la intersección con el eje “ I_{am} ” y “ k ” con la pendiente.

La Figura 7. 8, Tabla 7. 19 y Tabla 7. 20 muestran la obtención de “ I_o ” mediante la calibración del equipo.

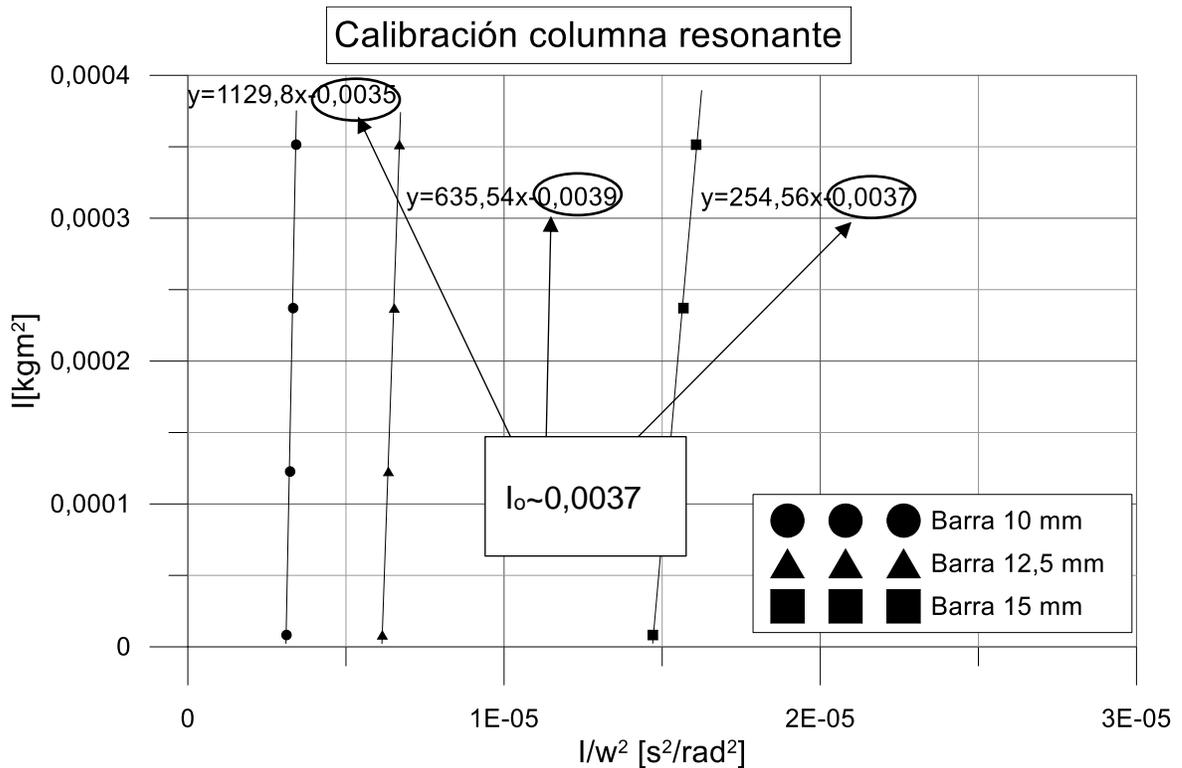


Figura 7. 8.-Obtención de “ I_o ”

Tabla 7. 19.-Inercias barras de calibración y pesos.

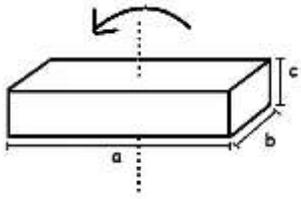
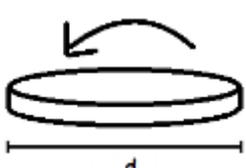
	Masas añadidas	
	Peso añadido	Disco superior de barra de calibración (BC)
Imagen		
b[m]	0,02	-
a[m]	0,1	-
d[m]	0,05	-
m[kg]	0,132	0,026487553
Iam[kg*m2]	0,000114	8,27736E-06

Tabla 7. 20.-Cálculos para la obtención de "I_o"

Barra de Calibración	Masa polar de inercia [kg*m ²]	Masa total polar de inercia [kg*m ²]	Frecuencia de resonancia BC [1/s]	Ω [rads/s]	ω ² [rad ² /s ²]	1/ω ² [s ² /rad ²]	Intersección (I _{am}) [kg*m ²]
Diámetro 15 mm							
Plato superior	8,28E-06	8,28E-06	90,1	565,91	320249,1	3,12E-06	-0,003523
peso 1	1,14E-04	1,23E-04	88,5	556,27	309437,8	3,23E-06	
peso 2	1,14E-04	2,37E-04	87,2	548,10	300417,1	3,33E-06	
peso 3	1,14E-04	3,51E-04	86,0	540,14	291756,1	3,43E-06	
Diámetro 12,5 mm							
Plato superior	8,28E-06	8,28E-06	64,2	403,2	162547	6,15E-06	-0,003905
peso 1	1,14E-04	1,23E-04	63,2	397,1	157686	6,34E-06	
peso 2	1,14E-04	2,37E-04	62,3	391,4	153227	6,53E-06	
peso 3	1,14E-04	3,51E-04	61,5	386,6	149479	6,69E-06	
Diámetro 10 mm							
Plato superior	8,28E-06	8,28E-06	41,5	260,8	67991,7	1,47E-05	-0,003666
peso 1	1,14E-04	1,23E-04	40,8	256,6	65824,8	1,52E-05	
peso 2	1,14E-04	2,37E-04	40,2	252,6	63798,7	1,57E-05	
peso 3	1,14E-04	3,51E-04	39,7	249,4	62221,5	1,61E-05	
						$\overline{I_{am}}$	0,003698