



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**MANUAL DE LOS ENSAYOS: COLUMNA RESONANTE Y CORTE TORSIONAL
CÍCLICO DEL LABORATORIO DE GEOTECNIA DE LA UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE QUITO, CAMPUS SUR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieros Civiles

AUTORES: Alexis Gabriel Fernández Columba
Marco Alexander Villamarín Galarza

TUTOR: José Domingo Alviar Malabet

Quito - Ecuador
2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Alexis Gabriel Fernández Columba con documento de identificación N° 1726751124 y Marco Alexander Villamarín Galarza con documento de identificación N° 1803764008; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 03 de agosto del 2022

Atentamente,



Alexis Gabriel Fernández Columba

1726751124



Marco Alexander Villamarín Galarza

1803764008

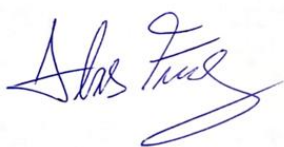
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Alexis Gabriel Fernández Columba con documento de identificación N° 1726751124 y Marco Alexander Villamarín Galarza con documento de identificación N° 1803764008; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Manual de los Ensayos: Columna resonante y Corte torsional cíclico del Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Sur”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 03 de agosto del 2022

Atentamente,



Alexis Gabriel Fernández Columba
1726751124



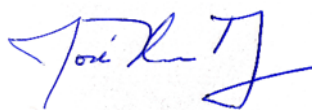
Marco Alexander Villamarín Galarza
1803764008

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Domingo Alviar Malabet con documento de identificación N° 1757837602, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MANUAL DE LOS ENSAYOS: COLUMNA RESONANTE Y CORTE TORSIONAL CÍCLICO DEL LABORATORIO DE GEOTECNIA DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE QUITO, CAMPUS SUR, realizado por Alexis Gabriel Fernández Columba con documento de identificación N° 1726751124 y por Marco Alexander Villamarín Galarza con documento de identificación N° 1803764008, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 03 de agosto del 2022

Atentamente,



Ing. José Domingo Alviar Malabet, PhD

1757837602

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación en primer lugar va dedicado a Dios, a mis padres Bertha y Raúl por su apoyo permanente, su paciencia y sus enseñanzas que me brindan día a día de no rendirme y seguir adelante, a mi hermano Paúl por su apoyo e inspiración de seguir preparándome.

ALEXIS GABRIEL FERNÁNDEZ COLUMBA

DEDICATORIA

A mi Madre Lourdes Amparito Galarza Espín, quien siempre estuvo apoyándome y guiando en el camino de la vida, le quiero dedicar con mucho amor todo mi esfuerzo y dedicación para realizar este trabajo

A mi Padre Marco Danilo Villamarin Alulema, por sus consejos y apoyo en mi proceso de formación y a toda mi familia quien me ha enseñado a superarme cada día más quiero dedicarles este trabajo.

MARCO ALEXANDER VILLAMARIN GALARZA

AGRADECIMIENTO

Mis más sinceros agradecimientos a mi padre Raúl, quien siempre me ha apoyado y motivado a cumplir mis metas, a mi madre Bertha mi soporte con sus palabras de aliento para no decaer, a mi hermano Paul que ha estado conmigo en buenos y malos momentos acompañadme, a mi tutor el Ing. Domingo Alviar, una excelente persona y profesional que ha compartido varios conocimientos humanos y profesionales mientras realizábamos este trabajo de titulación, a mi compañero de tesis Marco, cuya presencia en este trabajo fue muy importante para culminar esta meta y a la Universidad Politécnica Salesiana y a toda la planta docente por sus enseñanzas y filosofía.

ALEXIS GABRIEL FERNÁNDEZ COLUMBA

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Politécnica Salesiana, profesores y miembros quienes con su apoyo han permitido cumplir mis sueños y deseos superación.

A mis compañeros que forme durante mi proceso de formación, los cuales ayudaron en mi crecimiento profesional y como ser humano.

De manera muy especial a Dios por permitirme cumplir mi sueño y así poder ayudar con mis conocimientos adquiridos a las personas que lo necesiten.

MARCO ALEXANDER VILLAMARIN GALARZA

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedente.....	2
1.3. Problema.....	2
1.4. Delimitación.....	3
1.5. Justificación.....	4
1.6. Grupo Beneficiario.....	5
1.7. Objetivos.....	5
1.7.1. Objetivo General.....	5
1.7.2. Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO II	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1. Dinámica de suelos.....	7
3.2. Tipos de Ondas.....	7
3.2.1. Ondas superficiales.....	7
3.2.2. Ondas Internas.....	7
3.3. Licuación de Suelos.....	8
3.3.1. Licuación de Arenas.....	9
3.4. Parámetros Dinámicos.....	10
3.4.1. Módulo de Corte.....	10
3.4.2. Amortiguamiento (D).....	10
3.5. Modelos para evaluar el comportamiento de los Suelos Cargados Cíclicamente.....	13
3.5.1. Modelo Lineales Equivalente.....	13
3.5.2. Módulo de Corte (G).....	14
3.5.3. Determinación del G_{max}	15
3.5.4. Determinación del G_{Sec}	16
3.6. Ensayos de laboratorio.....	17
3.6.1. Ensayo de columna Resonante.....	17
3.6.2. Ensayo de Corte Torsional Cíclico (C.TC.).....	21
CAPÍTULO III	23
METODOLOGÍA	23
3.1. Tipos de investigación.....	23

3.2.	Métodos.....	24
3.3.	Técnicas e Instrumentos de investigación	25
3.4.	Proceso técnico de Ingeniería Civil.....	25
CAPÍTULO IV		27
ENSAYOS DE COLUMNA RESONANTE Y CORTE TORSIONAL CÍCLICO		27
4.1.	Introducción	27
4.2.	Características del equipo Wykeham Farrance modelo 31-WF8500	27
4.3.	Partes del equipo Wykeham Farrance 31-WF8500.....	30
4.3.1.	Celda de aluminio.....	31
4.3.2.	Marco flotante interno	32
4.3.3.	Transductores LVDT.....	33
4.3.4.	Cabezal Activo	34
4.3.5.	Base pasiva.....	35
4.4.	Accesorios de prueba para probetas de 50 mm de diámetro.	36
4.5.	Calibración del equipo.....	40
4.6.	Preparación de muestras del suelo.....	42
4.6.1.	Características de las probetas.....	42
4.6.2.	Preparación de probetas a partir de muestras en campo.....	42
4.6.3.	Reconstitución de probetas a partir de muestras alteradas	46
4.7.	Ejecución de los ensayos Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico	52
4.7.1.	Según la normativa ASTM D4015	52
4.7.2.	Nivelación y colocación de base pasiva.	53
4.7.3.	Procedimiento para montaje de muestra.....	55
4.7.4.	Montaje de Muestra de arena suelta.	56
4.7.5.	Montaje de Muestra de suelo inalterado en el pedestal fijo.	59
4.7.6.	Montaje del Equipo Columna Resonante y Corte Torsional.....	62
4.8.	Explicación del software	66
CAPÍTULO V.....		76
RECOPIACIÓN DE RESULTADOS.....		76
5.1.	Datos iniciales de las probetas.....	76
5.2.	Limo In situ	77
5.3.	Limo Saturado	79
5.4.	Arena de Ottawa seca	84
CAPÍTULO 6.....		87
ANÁLISIS DE RESULTADOS		87

CONCLUSIONES.....91
RECOMENDACIONES93
REFERENCIAS94
ANEXOS96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de ondas.....	8
Tabla 2 Conexiones a caja de control principal	29
Tabla 3 Especificaciones Técnicas Generales del equipo WF-8500.....	30
Tabla 4 Accesos rápidos.....	68
Tabla 5 Datos de las probetas ensayadas.....	76
Tabla 6 Resultados R.C. Limo in situ	77
Tabla 7 Resultados del ensayo T.S.....	78
Tabla 8 Grafica de respuesta Corte torsional cíclico.....	79
Tabla 9 R.C. del suelo MH aturado.....	79
Tabla 10 T.S. del suelo MH saturado	81
Tabla 11 Prueba de Skempton.....	83
Tabla 12 Resultados de R.C. de la arena de Ottawa.....	84
Tabla 13 T.S. de la arena Ottawa	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Equipo Wykeham Farrance 31-WF8500	3
Figura 2 <i>Licuação de Arenas</i>	9
Figura 3 <i>Decaimiento de la amplitud de la vibración de un oscilador armónico amortiguado</i>	12
Figura 4 Curva de histéresis	13
Figura 5 Proceso de degradación para llevar el G_{max} a G_{sec}	15
Figura 6 Curvas Teóricas G/G_{max} vs deformación por corte	16
Figura 7 Esquema de una columna resonante.	18
Figura 8 Curva de aceleración vs frecuencia	20
Figura 9 Representación gráfica de los esfuerzos que actúan en el ensayo C.T.C	22
Figura 10 Equipo Wykeham Farrance 31-WF8600	28
Figura 11 Partes exteriores del Equipo Wykeham Farrance 31-WF8600.....	31
Figura 12 Marco flotante del Equipo Wykeham Farrance 31-WF8500	32
Figura 13 Tipos de transductores en el equipo.....	33
Figura 14 Cabezal Activo del Equipo Wykeham Farrance 31-WF8500	34
Figura 15 Base del Equipo Wykeham Farrance 31-WF8500	35
Figura 16 Transductores de presión	36
Figura 17 Cilindros dilatadores de membrana y para reconstitución de muestras.....	38
Figura 18 Base para tallaje de muestras de suelo.....	39
Figura 19 Ventana de las constantes de calibración del software	40
Figura 20 Kit de calibración.....	41
Figura 21 Bloque de suelo inalterado.....	43
Figura 22 Extracción de bloque pequeño para el tallado	43
Figura 23 Equipo de tallado de muestras	44

Figura 24 Tallado de muestras	45
Figura 25 Medición de las probetas talladas	46
Figura 26 Peso de la arena de Ottawa	47
Figura 27 Elementos para el montaje de muestra	48
Figura 28 Membrana de látex en el molde partido	48
Figura 29 Probeta de la arena suelta	49
Figura 30 Enrasar la muestra.....	49
Figura 31 Colocación del cabezal activo en la muestra	50
Figura 32 Probeta sin el molde partido	51
Figura 33 Agua en la celda.....	52
Figura 34 Nivelación de base del equipo.	54
Figura 35 Base pasiva.	55
Figura 36 Colocación de membrana en el pedestal.....	56
Figura 37 Proceso de montaje de muestra de arena de Ottawa.....	57
Figura 38 Retiro del molde (cilindro partido).....	58
Figura 39 Colocación de membrana de látex.....	60
Figura 40 Muestra inalterada	61
Figura 41 Colocación de cámara interior	62
Figura 42 Colocación de marco Flotante	63
Figura 43 Colocación de sensores de presión (Proxi1 y Proxi2)	64
Figura 44 Colocación completa de sensores de presión y axial.....	65
Figura 45 Colocación de cilindro de acrílico y columnas.....	66
Figura 46 Ventana principal del software	67
Figura 47 Constantes y datos ingresados en el software.....	69

Figura 48 Celda de presión y Contrapresión	70
Figura 49 Ventada de los sensores trim	71
Figura 50 Ventana para ingresar los datos de la probeta	72
Figura 51 Ventana para iniciar el ensayo	73
Figura 52 Ventana del ensayo de columna resonante	74
Figura 53 Ventana del ensayo de corte torsional cíclico.....	75
Figura 54 Grafica del ensayo R.C.	77
Figura 55 Gráfica de R.C. del suelo MH saturado	80
Figura 56 Gráfica de T.S. con suelo MH saturado.....	82
Figura 57 Gráfica R.C. Arena de Ottawa seca	84
Figura 58 Grafica T.S. de la arena Ottawa.....	86
Figura 59 Curva G/Gmax sobrepuesta de arena de Ottawa	87
Figura 60 Curva de amortiguamiento sobrepuesta, de arena de Ottawa.....	88
Figura 61 Curva G/Gmax sobrepuesta de MH en estado natural y saturado	89
Figura 62 Curva de amortiguamiento sobrepuesta, MH en estado natural y saturado	89

RESUMEN

Los ensayos dinámicos que pueden ser realizados a muestras de suelo no son abarcados en pregrado, con el presente trabajo de tesis de grado se espera a futuro se realice más trabajos de investigación, así como fomentar el uso de los equipos dinámicos con los que cuenta la universidad en los laboratorios de suelos y geotecnia.

Docentes y estudiantes interesados en la investigación sobre el comportamiento de los suelos frente a cargas dinámicas, mediante ensayos no poseen una guía o manual de cómo realizarlos. En este documento tratará de la utilización del equipo 31-WF8500 que combina los ensayos de Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico, a través de los cuales se puede obtener parámetros dinámicos del suelo tales como el Amortiguamiento(D), Módulo de Corte (G) con la deformación. El presente manual se lo realiza de la manera más didáctica posible para que quien lo utilice sienta total confianza en realizar el ensayo de manera exitosa. Se describe detalladamente cada elemento que conforma el equipo y cuál es su función, también se hace enfoque en el tallaje de muestras inalteradas y reconstitución de muestras alteradas, como se monta las probetas en el equipo y además se hace énfasis en que errores no se deben cometer al momento de montar, tanto muestras como elementos del equipo. Para ello se ensayó 2 muestras de suelo, uno con arena de Ottawa la cual fue reconstituida y una muestra de suelo (MH) la cual fue tallada para su ensayo.

Realizar en primera persona los ensayos es la mejor manera para interpretar los resultados obtenidos, es un complemento perfecto a las bases teóricas adquiridas que nos harán crecer en el ámbito profesional.

Palabras clave: Columna Resonante, Corte Torsional Cíclico, manual de laboratorio, muestras alteradas e inalteradas, tallaje de muestras, módulo de corte, amortiguamiento.

ABSTRACT

The dynamic tests that can be carried out on soil samples are not covered in undergraduate, with the present thesis work, it is expected that more research will be carried out in the future, as well as promoting the use of the dynamic equipment that the university has. in soil and geotechnical laboratories.

Teachers and students interested in research on the behavior of the usual against dynamic loads, through tests do not have a guide or manual on how to carry them out. This document will deal with the use of the 31-WF8500 equipment that combines the Resonant Column and Cyclic Torsional Shear tests, through which dynamic soil alterations such as Damping (D), Shear Modulus (G) can be obtained. with the deformation. This manual is done in the most didactic way possible so that whoever uses it feels totally confident in performing the test successfully. Each element that makes up the equipment and what its function is described in detail, also focuses on the sizing of unaltered samples and reconstitution of altered samples, how the specimens are mounted in the equipment and also emphasizes that errors should not be commit at the time of assembly, both samples and equipment elements. For this, 2 soil samples were tested, one with Ottawa sand which was reconstituted and a soil sample (MH) which was carved for testing.

Carrying out the tests in the first person is the best way to interpret the results obtained, it is a perfect complement to the theoretical bases acquired that will not grow in the professional field.

Keywords: Resonant Column, Torsional Shear Testing, laboratory manual, altered and unaltered samples, shear modulus, damping.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1. Introducción

El objetivo principal de este trabajo es la elaboración de un manual, para realizar los ensayos Columna Resonante y Corte torsional Cíclico utilizando el equipo 31-WF8500. Todo el proceso de preparación de muestras, calibración, montaje de equipo y ejecución de ensayos será explicado de manera detallada e ilustrativa, de tal manera que para el usuario sea relativamente simple llevarlos a cabo.

Actualmente la Universidad Politécnica Salesiana cuenta con el equipo 31-WF8500, el cual tiene la capacidad de realizar los ensayos de Columna Resonante y Corte Torsional, a bajas y altas deformaciones respectivamente. Estos ensayos servirán para la determinación de los parámetros dinámicos de los suelos como son: módulo de corte (G), deformación de corte (γ) y Amortiguamiento (D). Para lo cual se realizó investigaciones de cada uno de los aspectos mencionados de acuerdo a normativas y artículos científicos especializados en fortalecer el conocimiento del tema.

La interpretación de resultados obtenidos en ensayos para determinar parámetros dinámicos es relevante en proyectos de ingeniería civil, con ellos se puede determinar el comportamiento del suelo ante cargas sísmicas o vibraciones producidas por maquinarias, cargas de tráfico específicas (aterrizaje aéreo), oleajes entre otros. Siendo una de las principales razones para la elaboración de este manual el cual servirá en la determinación de las propiedades dinámicas del suelo en el laboratorio de la universidad.

1.2. Antecedente

En el Ecuador, la mecánica de suelos es un tema de vital importancia en el ámbito de la construcción en obras de ingeniería, pero también existe otro tema igual de relevante que es la Dinámica de Suelos. En varias ocasiones al momento de llevar a cabo proyectos de ingeniería civil como: edificaciones, vías, túneles, puentes, entre otros; se deja de lado el comportamiento dinámico de los suelos.

La Dinámica de Suelos está relacionada directamente con cargas cíclicas, cargas variables en el tiempo, sismos y terremotos, ya que estos eventos son más conocidos por generar vibraciones, pero existen otras acciones que dan origen a estas cargas, como; la operación de una determinada maquinaria, tráfico intenso, aterrizaje de aviones y carga debido a la acción de olas, por mencionar algunas. Entonces para llevar a cabo este tipo de proyectos, es necesario realizar ensayos como: Columna Resonante (R.C), Corte torsional cíclico (T.S.S.); para determinar los parámetros dinámicos del suelo (Módulo de corte y amortiguamiento), con base a la normativa vigente ASTM.

1.3. Problema

La dinámica de suelos al ser un tema muy importante, y debido que su contenido es parte fundamental para desarrollar nuevos proyectos, que sean confiables, seguros y cumplan con las normas de seguridad. Es indispensable hacer un mayor énfasis en este tema, en la formación de nuevos profesionales.

En el presente proyecto se desarrollará un material de apoyo, que conste con información suficiente, que facilite el aprendizaje e incentive a los estudiantes a indagar más allá del comportamiento estático del suelo. Utilizando un equipo que sirve para la determinación de parámetros dinámicos de suelos. Se realizará una revisión teórica a fondo acerca al tema, así como

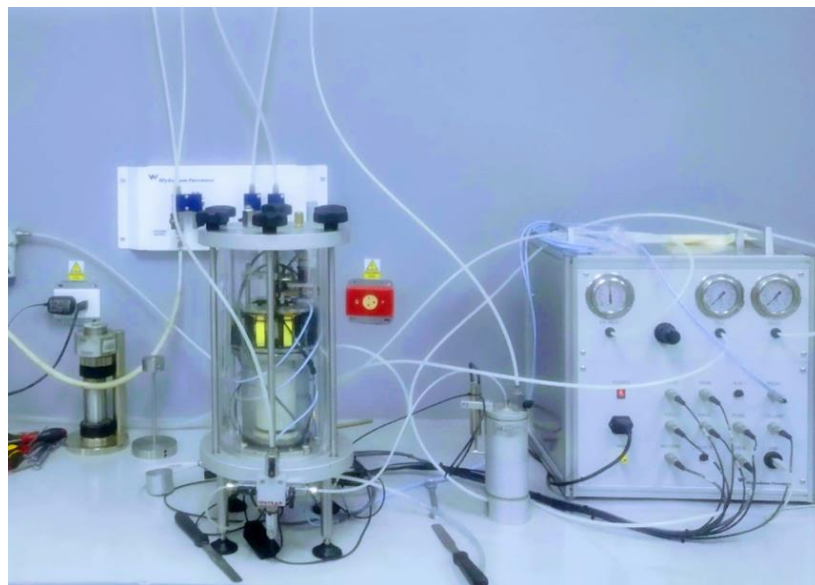
preparación de muestras a ensayar, calibración del equipo e interpretación de los resultados de los ensayos realizados, con base a las normativas vigentes.

1.4. Delimitación

El equipo a utilizar para realizar los ensayos que permitan determinar los parámetros dinámicos del suelo es el Wykeham Farrance 31-WF8500, se encuentra ubicado en el laboratorio de Geotecnia (subsuelo del bloque G), de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, Campus Sur.

Figura 1

Equipo Wykeham Farrance 31-WF8500



Nota. Equipo para ensayo de Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico, ubicado en el laboratorio de Geotecnia, de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, Campus Sur. Elaborado por: Los Autores

1.5. Justificación

Según Rodríguez (2005), “La Dinámica de suelos ha evolucionado como una disciplina independiente, desarrollando procedimientos tanto teóricos como experimentales, sin embargo, requiere de otros campos del conocimiento como son: Mecánica de suelos, Dinámica estructural e Ingeniería Sísmica” (p.1). Actualmente este tema tiene mucha relevancia en el desarrollo de proyectos en el campo de la Ingeniería Civil, principalmente en diseño sismo resistente, pero también es importante en el ámbito vial, cimentaciones para maquinaria industrial, por mencionar las más conocidas. En estos proyectos es necesario conocer cómo se comporta el suelo al aplicar una carga dinámica, para ello existen determinados ensayos que se realizan a muestras de suelo, mediante los cuales se puede determinar los parámetros dinámicos del suelo.

En el presente trabajo de titulación se describirá las propiedades dinámicas del suelo, la determinación de las mismas en el laboratorio. Se describirá el equipo a utilizar para encontrar dichos parámetros, también se hará énfasis en la obtención y preparación de muestras a ser ensayadas. Todo esto debido a que en la universidad no existe una guía, que sirva de ayuda para los estudiantes al momento de realizar los ensayos con el equipo de Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico.

Este trabajo beneficiará directamente a los estudiantes de Ingeniería Civil, quienes podrán comenzar a utilizar el equipo en el laboratorio de Geotecnia, y puedan realizar los ensayos correspondientes para la determinación de los parámetros dinámicos del suelo, con el apoyo de un manual de laboratorio. También será de gran apoyo para la universidad, debido a que puede ofrecer servicios a terceros, realizar este tipo de ensayos a otras entidades, ya que, al ser un tema en constante surgimiento, además de ser un requisito indispensable por parte de entes reguladores en algunos proyectos es de vital importancia conocer el comportamiento del suelo bajo cargas dinámicas.

1.6. Grupo Beneficiario

El proyecto tendrá como beneficiarios a los estudiantes de la carrera de ingeniería civil de la Universidad Politécnica Salesiana, además los docentes que realicen trabajos de investigación o entidades que requieran de los servicios para determinar los parámetros dinámicos de los suelos.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Realizar un manual de laboratorio de los ensayos Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico, a través de la descripción detallada e ilustrada del proceso, para determinar los parámetros dinámicos en los suelos, con base a la normativa de la American Society for Testing and Materials (ASTM).

1.7.2. Objetivos Específicos

Exponer las generalidades teóricas que abarcan los ensayos a estudiarse, mediante revisión bibliográfica, para tener un conocimiento previo de los parámetros dinámicos del suelo.

Presentar y describir el equipo 31-WF8500 de forma detallada, con base al manual otorgado por la empresa Wykeham Farrance, para conocer el proceso de calibración, muestras, montaje, desmontaje del equipo y obtención de datos.

Describir las técnicas de remoldeo de muestras en el caso de las arenas con base a la normativa ASTM, para simular condiciones naturales del terreno, y realizar satisfactoriamente los ensayos dinámicos mencionados.

Realizar la clasificación de suelos de las muestras a ensayarse según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS), y con los resultados obtenidos calcular las curvas teóricas G/G_{max}

y amortiguamiento vs deformación angular, para comparar con los resultados de los ensayos dinámicos.

Interpretar las diferentes gráficas, mediante el software DYNATOR, los ensayos de columna resonante y corte simple torsional, para la determinación de la curva de degradación G y amortiguamiento.

Realizar un video, exponiendo cada paso a seguir durante el montaje y realización de los ensayos de columna resonante y corte torsional cíclico, para el uso personal de laboratorio.

Socializar el Manual de Laboratorio del Ensayo Columna Resonante - Torsional Cíclico, mediante la exposición y sustentación, para su uso en el laboratorio de Geotecnia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Dinámica de suelos

La dinámica de suelos y su importancia, está relacionada con los sismos y cargas cíclicas variables en el tiempo, los efectos que causa en cimentaciones, estructuras de tierra como taludes, depósitos naturales del suelo. Esto depende principalmente de la relación esfuerzo-deformación. La dinámica de suelos esta principalmente aplicada en la ingeniería sísmica, las estructuras sometidas a oleajes, las cimentaciones de maquinarias y a las vibraciones provocadas por acción humana (Díaz, 2005).

3.2. Tipos de Ondas

3.2.1. Ondas superficiales

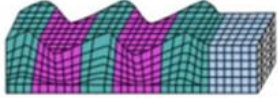

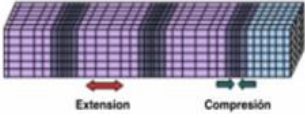

“Las ondas de superficie son el resultado de la interacción entre ondas de volumen y las capas superficiales de la tierra. Estas viajan a lo largo de la superficie con amplitudes que decrecen aproximadamente de forma exponencial con la profundidad” (Kramer, 1996, p. 156). Esto quiere decir que este tipo de ondas, solo se propagan en la superficie con velocidades menores en comparación con las ondas internas. Existen dos tipos de ondas superficiales como: Love y Rayleigh, las cuales se detalla en la tabla 1.

3.2.2. Ondas Internas

Las ondas internas, se considera aquellas que se propagan en rocas y suelos esto quiere decir en el interior de la Tierra, generando menor destrucción. Estas están definidas en dos grandes grupos como: Primarias y Secundarias, las cuales se detalla en la tabla 1.

Tabla 1

Tipos de ondas

		Características	Representación Grafica
Ondas Superficiales	O. Love	Producen cortes horizontales Viajan a velocidades menores que las Ondas Rayleigh	
	O. Rayleigh	Movimiento Horizontal y vertical La amplitud de las ondas decrece con la profundidad	
Ondas Internas	O. Primarias	Actúan de forma longitudinal o compresión Amplitudes pequeñas Viajan a mayor velocidad	
	O. Secundarias	Actúan de manera transversal o de corte No viajan en fluidos	

Nota. tipos de ondas según su medio de propagación. Elaborado por: Los Autores

3.3. Licuación de Suelos

Cuando el suelo saturado está expuesto a cargas sísmicas, cargas cíclicas o alguna otra carga rápida, sucede el fenómeno de licuación. El suelo tiende a perder su resistencia al corte y rigidez.

Según Rodríguez Pascua (1997), “El suelo completamente saturado, con arenas sin cohesión, generalmente limpias, que pueden incluir algo de gravas puede ser licuado durante la sacudida sísmica”

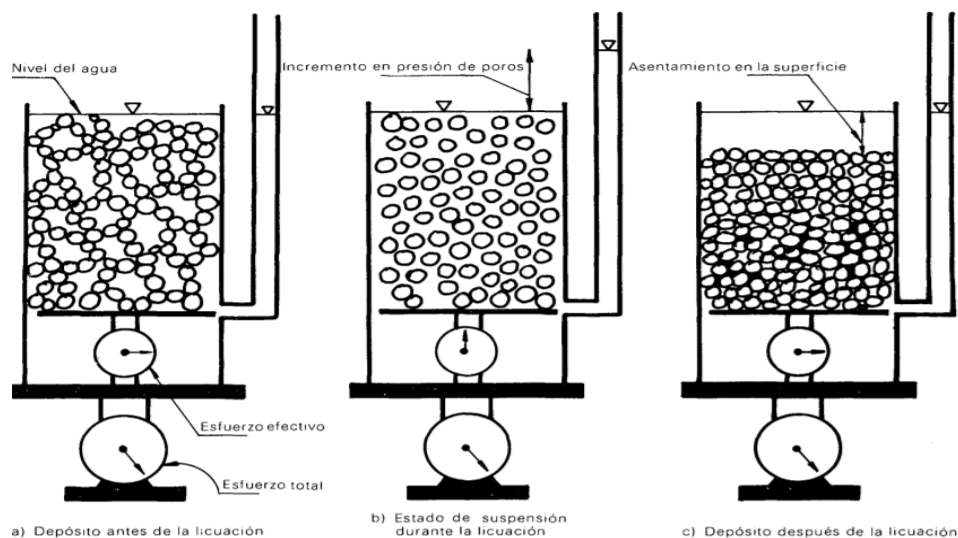
Algunas características físicas de un suelo potencialmente licuable son:

- Volcanes de arena
- Grietas en el terreno
- Pérdidas de la capacidad portante del suelo
- Movimientos laterales
- Oscilaciones horizontales del terreno
- Fallas de taludes por flujo del terreno.

3.3.1. *Licuación de Arenas*

Figura 2

Licuación de Arenas



Nota. Representación gráfica licuación en arenas. Fuente: Alarcón, 2007

En un depósito de arena mal graduada y saturada, al estar expuesta a cargas de corta duración o sismos, la densidad del suelo baja (si fuera un suelo bien graduado las partículas más pequeñas se acomodarían en los vacíos, y así el suelo tendría una densidad mayor). Al ser esfuerzos de corte

cíclicos de corta duración el depósito no puede drenar, la presión de poros del depósito aumenta, el agua saldrá hacia el lugar más fácil (superficie del estrato), y las partículas sólidas se reacomodarán hacia la parte inferior del estrato como se puede observar en la figura 2. Como consecuencia la resistencia al corte disminuye.

3.4. Parámetros Dinámicos

3.4.1. Módulo de Corte

El módulo de cortante en la mayoría de los suelos exhibe relaciones esfuerzo-deformación no-lineales, y es por esa razón que el módulo se determina en el laboratorio como el módulo secante. El módulo secante de corte de un elemento del suelo varía con la magnitud de la deformación angular cíclica. A magnitudes de baja deformación el módulo secante de corte es alto, pero este decrece conforme la magnitud de la deformación angular aumenta.

3.4.2. Amortiguamiento (D)

Según Krammer (1996), “El amortiguamiento es la energía que se disipa en los suelos y en las estructuras mediante varios mecanismos de pérdida de energía” (p.235). El suelo tiene la capacidad de disipar la energía ante la aplicación de una carga cíclica, y estos ciclos indican que capacidad tiene el suelo para disipar energía potencial almacenada debido a su rigidez.

A continuación, se describen algunos tipos de amortiguamientos.

- Amortiguamiento viscoso

La magnitud del amortiguamiento depende de la velocidad relativa y de los parámetros del sistema de amortiguamiento. Para un sistema particular, la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad:

$$F = c \frac{dz}{dt} \quad (1)$$

Donde:

F=fuerza de amortiguamiento

c=coeficiente de amortiguamiento

$\frac{dz}{dt}$ =velocidad

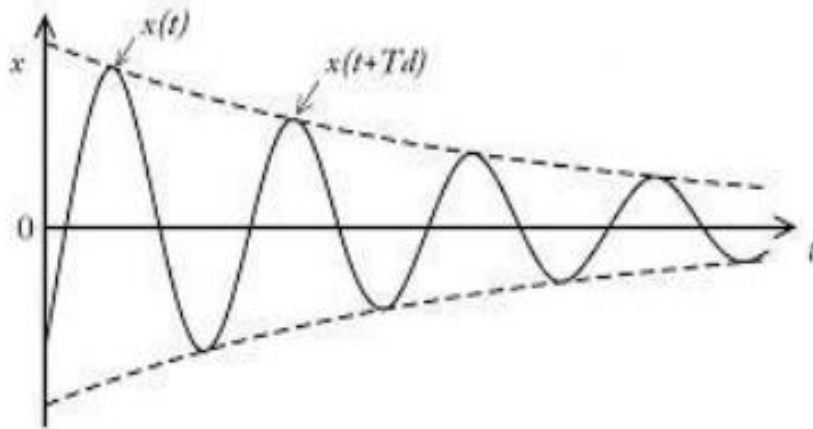
La ecuación diferencial del sistema se hace lineal con este tipo de amortiguamiento.

- Amortiguamiento interno o estructural

Es una de las propiedades más sensibles de materiales y estructuras, tanto a nivel macro como microscópico, siendo particularmente sensibles a la presencia de grietas y micro grietas. Es el fenómeno por el cual se disipa energía mecánica en un sistema (principalmente para la generación de calor y/o energía). La amortiguación determina la amplitud de la vibración en la resonancia y el tiempo de persistencia de la vibración después que culmina la excitación.

Figura 3

Decaimiento de la amplitud de la vibración de un oscilador armónico amortiguado



Nota. Representación gráfica del decaimiento de la amplitud. Fuente: Krammer (1996)

- Amortiguamiento de Coulomb

Este tipo de amortiguamiento se presenta debido a la fricción en las conexiones o puntos de apoyo. Es constante, independiente de la velocidad o cantidad del desplazamiento, y usualmente se trata como amortiguamiento viscoso interno, cuando el nivel de desplazamiento es pequeño, o como amortiguamiento histérico cuando es alto. La fricción de cuerpo es grande en los muros de mampostería confinados cuando estos se agrietan y proporcionan una resistencia sísmica muy efectiva. El amortiguamiento Coulomb, corresponde a un amortiguamiento de fricción, con dirección del desplazamiento y de signo opuesto al de la velocidad.

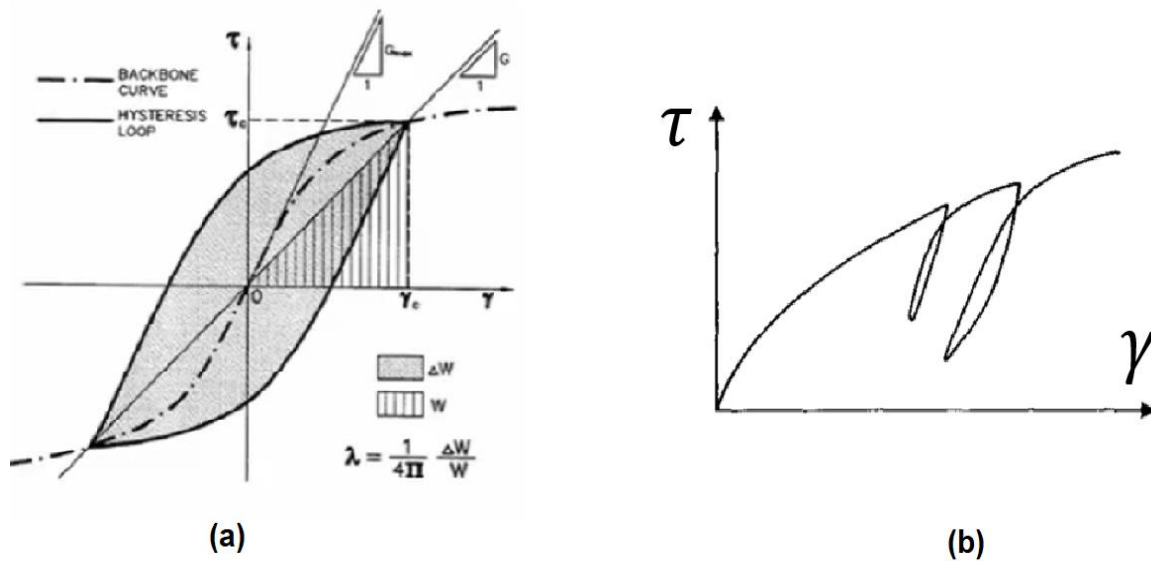
3.5. Modelos para evaluar el comportamiento de los Suelos Cargados Cíclicamente

3.5.1. Modelo Lineales Equivalente

El suelo cuando esta cíclicamente cargado sufre un proceso de histéresis, la figura 4b representa ciclos generales del proceso de carga y descarga de energía, en cambio en la figura 4a se puede apreciar un ciclo centrado en el origen, en donde la forma del lazo tiene una pérdida de energía por amortiguamiento interno.

Figura 4

Curva de histéresis



Nota. Representación gráfica de la curva de histéresis de los suelos. a) Ciclo centrado en el origen, b) Ciclos generales. Fuente: Krammer (1996)

Aspectos de interés en la curva de Histéresis.

- La abertura de la curva será proporcional a la capacidad de disipación de energía que tenga el terreno.
- La inclinación de la curva representa la rigidez del suelo (la pendiente en el origen representa al mayor valor de módulo de corte G_{max}).

$$G_{max} = \text{valor de módulo de corte del suelo} \quad (2)$$

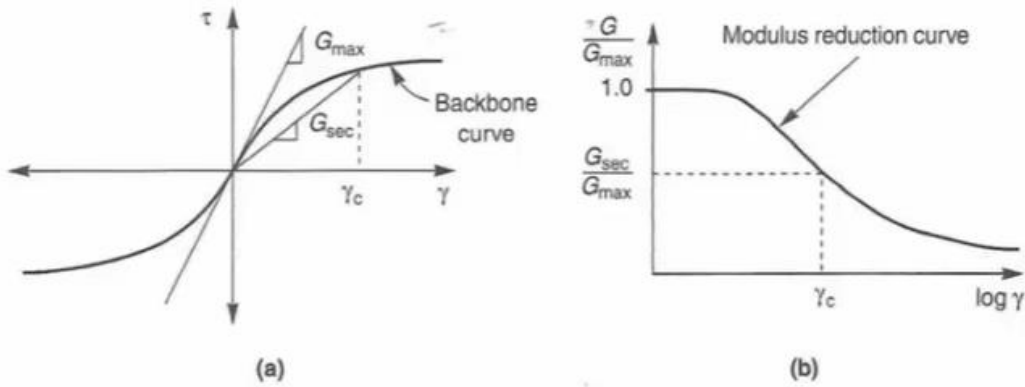
$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} = \text{módulo de corte secante} \quad (3)$$

3.5.2. *Módulo de Corte (G)*

El módulo de corte G , también denominado módulo de rigidez, es una constante elástica que caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico (lineal e isótropo) cuando se aplican esfuerzos cortantes. Describe el cizallamiento o cambio de fuerza del suelo (Curd 2013).

Figura 5

Proceso de degradación para llevar el G_{max} a G_{sec}



Nota. a) Curva tipo backbone, muestra la variación de G_{sec} con la deformación por corte. b) Curva típica de reducción de modulo $\frac{G}{G_{max}}$. Fuente: Santivañez (2006)

El G_{sec} , varia con la amplitud de deformación por corte cíclico.

A bajas amplitudes de deformación, el G_{sec} es alto, pero disminuye a medida que se incrementa la amplitud de deformación.

Cuando el suelo está sometido a la acción sísmica o cargas cíclicas, se tiene un G_{max} inicial, y a medida que el suelo va deformándose debido a esta acción, se pasa de un $\frac{G}{G_{max}} = 1$ a un valor menor que 1.

3.5.3. Determinación del G_{max}

Ya que las deformaciones por corte son inferiores al 0.0003%, se recomienda que la velocidad de ondas de corte (V_s), puede ser utilizada para estimar el G_{max} .

$$G_{max} = \rho V_S^2 \quad (4)$$

Donde:

ρ = densidad del material.

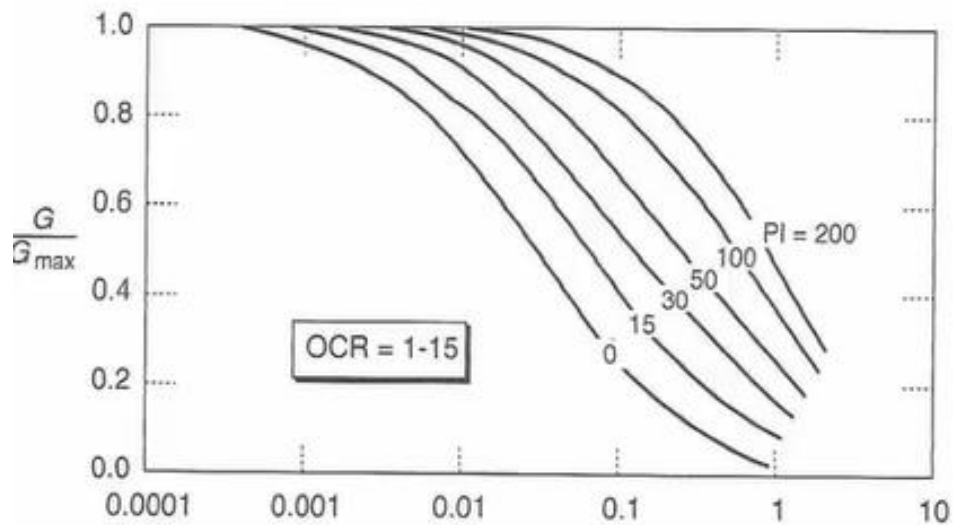
V_S = Velocidad de onda.

3.5.4. Determinación del G_{sec} .

Para determinar el valor de G_{sec} , existen algunas curvas de reducción experimentales elaboradas por distintos autores.

Figura 6

Curvas Teóricas G/G_{max} vs deformación por corte



Nota. Curvas de reducción de módulo para suelos de grano fino con diferente índice de plasticidad. Fuente: Vucetic y Dorby (1991).

3.6. Ensayos de laboratorio

3.6.1. *Ensayo de columna Resonante*

El origen de este ensayo se remonta a Ishimoto and Iida (1937), posteriormente Bishop (1959), Hardin (1965), Drnevich, Hall and Richard (1967) y otros, fundamentaron la teoría en que se basa la interpretación de los resultados del equipo de columna resonante.

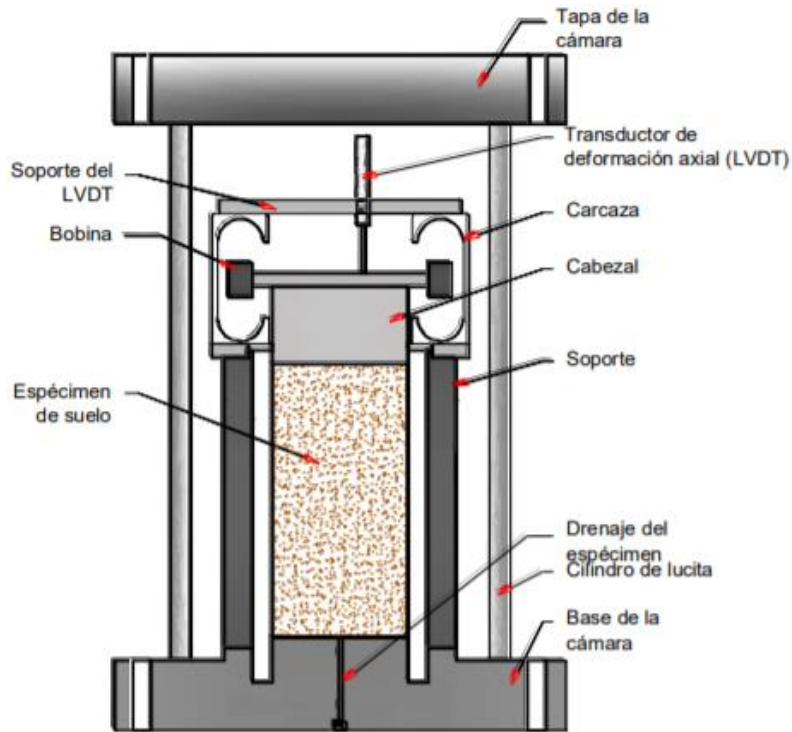
Este ensayo consiste en someter un espécimen cilíndrico de suelo a un estado de vibración forzada longitudinal o torsional, al variar la frecuencia de excitación se logra conocer la frecuencia de resonancia del espécimen. El espécimen cilíndrico que puede ser un cilindro sólido o hueco y se coloca sobre una base rígida, en su parte superior se coloca el dispositivo que comunica la excitación torsional y/o longitudinal. En esta forma se tiene un espécimen de suelo fijo en su extremo inferior y libre en su parte superior.

Para medir la deformación axial, se emplea un transductor de desplazamiento (LVDT). La presión de confinamiento se aplica mediante aire comprimido.

Los resultados son interpretados con la teoría de propagación de ondas en una barra elástica, con esto podemos deducir que la velocidad de ondas por corte en una barra es diferente a las que se producen en un medio semi-infinito.

Figura 7

Esquema de una columna resonante.



Nota. Esquema de la aplicación de la carga. Fuente: Cepeda y Arenas (2010)

Características del ensayo de Columna Resonante.

- En esta prueba se puede utilizar una columna cilíndrica sólida o hueca de la muestra del suelo.
- El empleo de un espécimen hueco minimiza la variación de la amplitud del esfuerzo cortante a través del espécimen.
- El empleo de un espécimen tipo hueco resulta ser más complicado ya que el labrado de este presenta numerosas dificultades, por las cuales optan por el empleo de una muestra sólida

- Debido a las bajas deformaciones que se inducen al espécimen, la muestra de suelo queda en condiciones de ser utilizada nuevamente en otro tipo de ensayo.
- Los principales factores que afectan los resultados de las pruebas son la amplitud de deformación angular, la presión de confinamiento, la relación de vacíos, así como también la temperatura y el tiempo, aunque de manera menos importante.

3.6.1.1. Parámetros dinámicos

○ Determinación del módulo de corte

Mediante las inercias de la probeta y del equipo, existen infinitos valores de β (relación $\frac{I_p}{I_t}$), que satisfacen las distintas formas de vibración en el sistema mecánico. Se toma el primer modo de vibración ya que, en este, se da la máxima respuesta del sistema y la forma de onda permite una estimación más precisa de las deformaciones en la muestra. Para lo cual se obtiene la siguiente fórmula.

$$G = \rho \left(\frac{2\pi f_n h}{\beta} \right)^2 \quad (5)$$

Dónde:

$\rho =$ densidad de la muestra

$f_n =$ frecuencia natural del sistema

$\beta =$ Inercia muestra/Inercia del equipo.

$h =$ altura de la muestra

$I_p =$ Inercia de la probeta

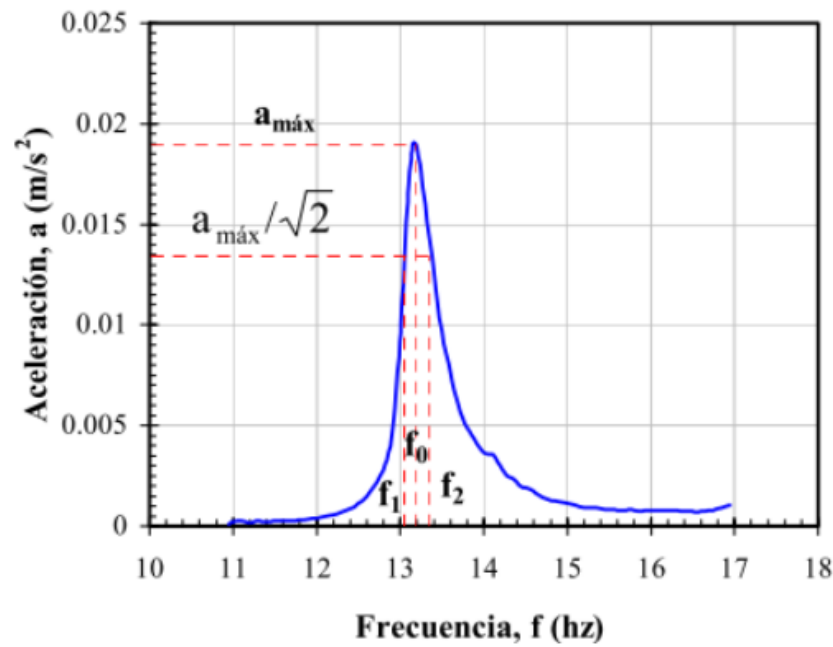
$I_t =$ Inercia del equipo

○ **Curva de frecuencia**

La curva registra la aceleración máxima a_{max} , la frecuencia de resonancia f_0 , las frecuencias límites f_1, f_2 que corresponden a la aceleración $a_{max}/\sqrt{2}$, como se puede apreciar en la figura 8.

Figura 8

Curva de aceleración vs frecuencia



Nota. Variación de la aceleración de respuesta, con el incremento de frecuencia de excitación y la fuerza de torsión. Fuente: Gordillo (2011)

Deformación angular

La deformación angular se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$\gamma = \left(\frac{1}{12 \pi^2 r} \right) \frac{D}{L} \frac{a_{max}}{f_0^2} \tag{6}$$

Dónde:

$D =$ diámetro de la probeta (m)

$f_0 =$ frecuencia de resonancia (ciclos/s)

$r =$ distancia del centro de gravedad del acelerómetro al centro de la muestra de suelo (m)

$L =$ longitud de la muestra (m)

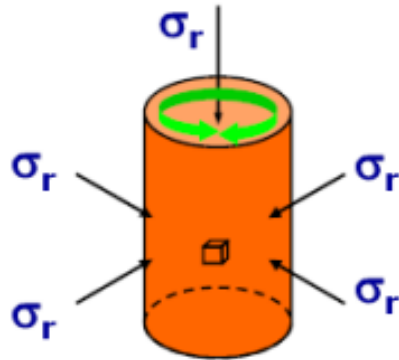
$a_{max} =$ aceleración máxima de respuesta $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

3.6.2. Ensayo de Corte Torsional Cíclico (C.TC.).

El ensayo C.T.C. genera esfuerzos cortantes a la muestra cilíndrica del suelo, causada por la aplicación de un momento torsor, la cual genera tensiones tangenciales en los planos horizontales. La rotación es constante en los ejes principales y se puede realizar el ensayo en condiciones de consolidación isotrópica. Los resultados que se obtendrá son los siguientes: características de la rigidez, amortiguamiento de la muestra del suelo el cual será sometido a un amplio rango de deformaciones y también se estudia el comportamiento a la licuefacción.

Figura 9

Representación gráfica de los esfuerzos que actúan en el ensayo C.T.C



Nota. La fuerza de torsión es la que genera el cizallamiento en la muestra. Fuente: Gordillo (2011).

El sistema registra los valores de tensión y deformación torsional para cada amplitud y muestra el ciclo de histéresis a partir del cual se determinan G y D. Ver en la figura 9.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipos de investigación

Para el desarrollo del presente proyecto se aplicarán 3 tipos de investigaciones; bibliográfica, explicativa y experimental.

La investigación explicativa va más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de las relaciones entre conceptos; es decir, están dirigidos a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales. Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar porque ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiestan o por que se relacionan dos o más variables. (Hernández, 2000, p.95).’

La investigación explicativa será muy importante en este proyecto, ya que, al hablar de los parámetros dinámicos de los suelos, no es suficiente describir cada término relevante que se encuentran dentro del tema. Es necesario ir más allá de sus conceptos básicos; como estos influyen en el diseño y la vida útil en obras de ingeniería civil (comprender el comportamiento de los suelos ante cargas dinámicas), a través de que ensayos se puede determinar los parámetros dinámicos, como llevar a cabo los ensayos de manera exitosa y finalmente la parte más importante que es la interpretación de los resultados que se obtiene con los ensayos.

La investigación bibliografía. Según Muñoz, 2015:

Es aquella que emplea predominantemente fuentes de información escrita o recogida y guardada por cualquier otro medio, es decir, todo tipo de documentos: libros, publicaciones periódicas, materiales grabados por cualquier medio (voz, imágenes, datos), documentos

históricos, información estadística; todos ellos recopilados por otras personas o instituciones donde la tarea del investigador consiste en buscarla, organizarla, sistematizarla y analizarla para un determinado fin. (p. 98).

Realizar una revisión en documentos (libros, tesis, artículos académicos), sobre todo lo referente a dinámica de los suelos, servirá para dar inicio al presente proyecto, se tendrá una amplia visión sobre el tema en cuestión, con base a diversas fuentes bibliográficas. Se relacionará estudios, datos, opiniones, entre otros, ya existentes que provienen de diferentes autores.

La investigación bibliográfica servirá para adquirir el conocimiento necesario, entender cada término, estar en capacidad de llevar a cabo los ensayos para determinar los parámetros dinámicos planteados e interpretar los resultados, y de esta manera llegar al fin que es obtener un manual para determinar los parámetros dinámicos de los suelos de manera clara.

Para llegar a cabo el desarrollo del manual de laboratorio para determinar los parámetros dinámicos de los suelos, se realizará los respectivos ensayos en el laboratorio de geotecnia, por tal motivo se utilizará otro tipo de investigación. “La investigación experimental está integrada por un conjunto de actividades metódicas y técnicas que se realizan para recabar la información y datos necesarios sobre el tema a investigar y el problema a resolver” (Ruiz, 2005, p.1).

3.2. Métodos

Se utilizará el método experimental, ya que, para conocer cuál es el comportamiento del suelo bajo cargas dinámicas, se realizará los siguientes ensayos: columna resonante, corte torsional cíclico; los que permitirán obtener los parámetros dinámicos del suelo, es decir, la muestra del suelo será ensayada bajo diferentes casos de cargas cíclicas. Los resultados variaran dependiendo de los niveles

de deformación alcanzada.

3.3. Técnicas e Instrumentos de investigación

Al inicio se recolectará la información sobre conceptos relevantes sobre el tema en libros, tesis, y artículos académicos, esto es necesario para adquirir el conocimiento acerca del tema en cuestión. También se utilizará el manual facilitado por la casa fabricante, del equipo para determinar los parámetros dinámicos de los suelos. El manual ayudará para familiarizarse con el equipo.

Se realizará visita al laboratorio de geotecnia de la universidad para conocer el equipo a ser utilizado en este proyecto.

Y finalmente al realizar los ensayos se utilizará, hojas de registros para anotar los datos del suelo a ensayarse, además el propio equipo viene con un software en donde almacena los datos del ensayo que serán entregados para el respectivo análisis.

3.4. Proceso técnico de Ingeniería Civil

En primer lugar, se definirá cuales normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM) que se utilizarán para realizar los ensayos mencionados.

A la par se realizará la revisión teórica, acerca de los temas necesarios para llevar a cabo los ensayos.

Para llevar a cabo el presente proyecto, al inicio se realizará el proceso de revisión en documentos (libros, tesis, artículos académicos) sobre todo lo referente a dinámica de suelos; conceptos generales, ensayos que se realizan para conocer el comportamiento del suelo bajo cargas dinámicas (determinación de parámetros dinámicos de los suelos).

Algunos de los parámetros relevantes en este trabajo son:

- Módulo de corte y amortiguamiento.

- Periodo de vibración.

Otro aspecto importante es tener claro en base a que apartado de la norma vigente de la American Society for Testing and Materials (ASTM), se debe realizar la preparación de muestra y el ensayo.

Se realizará una visita al laboratorio de Geotecnia de la universidad, para conocer detalladamente el equipo 31-WF8500 de la empresa Wykeham Farrance. Esto ayudará para informarse sobre el proceso de calibración, montaje y desmontaje del equipo, colocación de muestras y obtención de datos.

Finalmente se llevará a cabo los siguientes ensayos: columna resonante, corte torsional cíclico, en el laboratorio de Geotecnia, se tomará apuntes detalladamente de cada paso a seguir para obtener un ensayo exitoso. Todas las anotaciones realizadas serán de gran ayuda para redactar un manual claro que sirva de guía a los estudiantes y docentes sobre cómo realizar el ensayo y como determinar los parámetros dinámicos de los suelos que se pueden determinar mediante el ensayo.

CAPÍTULO IV

ENSAYOS DE COLUMNA RESONANTE Y CORTE TORSIONAL CÍCLICO

4.1. Introducción

En el laboratorio de Geotecnia de la Universidad Politécnica Salesiana se cuenta con el equipo 31-WF8500, cuyo fabricante es la empresa Wykeham Farrance, quienes son pioneros en ensayos avanzados de suelos. Se encuentran en el mercado desde el año 1941. En la figura 1 se puede apreciar todo el sistema ya instalado en el laboratorio.

Para realizar los ensayos de RC Y TSS, se utilizará probetas cilíndricas de 50 mm x 100 mm. A dichas probetas se restringirán en su base, y serán excitadas dinámicamente en la parte superior, donde se aplica una fuerza de torsión que es generada por un motor eléctrico compuesto por 8 bobinas de accionamiento. La frecuencia resultante es de hasta 250 Hz y los modos fundamentales de vibración se encuentran a partir de la amplitud máxima de movimiento; en función de la frecuencia de resonancia, la velocidad de la onda de corte y el módulo de onda de corte del equipo se calculan utilizando la teoría elástica. (Revista Farrance, 2013). Como se indicó en las ecuaciones 5, 6

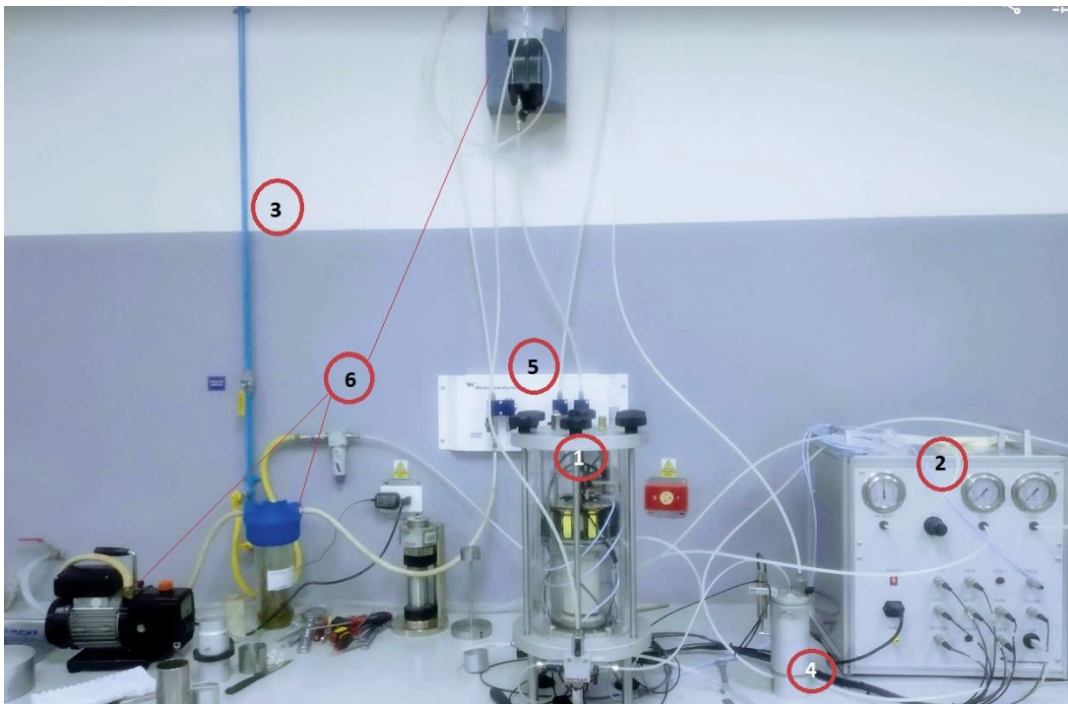
4.2. Características del equipo Wykeham Farrance modelo 31-WF8500

El equipo 31-WF8500 combina las características de la columna resonante y el corte torsional en una sola unidad que incluye el motor accionado por corriente para aplicar carga torsional a la muestra, una serie de transductores con acondicionamiento de señal, una celda y un sistema de control electroneumático de contrapresión y un registrador de datos. (Revista Farrance, 2013, p.74)

En el ensayo de corte simple torsional o también conocido como corte torsional cíclico, la muestra de suelo se deforma cíclicamente a una frecuencia baja (un máximo de 10 Hz), controlando continuamente el par y la deformación. A partir de las curvas par-deformación, se obtiene una relación entre el esfuerzo cortante promedio y la deformación cortante promedio, que a su vez proporciona el módulo de corte y la relación de amortiguamiento. (Revista Farrance, 2013, p.74)

Figura 10

Equipo Wykeham Farrance 31-WF8600



Nota. Sistema completo de RC y TSS en el laboratorio de geotecnia. Fuente: Los Autores.

Partes que se muestran en la figura 1

1. Equipo para ensayo de columna resonante y corte torsional
2. Caja de control principal que incluye:
 - Fuente de alimentación

- Amplificador de corriente
- Unidad acondicionadora de señal de 8 canales
- Placa de adquisición de datos y generación de señal USB
- Dos convertidores electroneumáticos para celda y contrapresión

Tabla 2

Conexiones a caja de control principal

Conexiones de caja de control principal	
Descripción	Nombre del pin de conexión
Conexión a LVDT para la medición de la compresión axial de la muestra	Axial
Entrada auxiliar para otras aplicaciones	Aux 1
Conexión al par de los transductores de proximidad Celda, Poro y Contrapresión.	Prox
Serie de 3 conectores para los transductores de presión correspondientes.	Cell, Pore y Back pressure
Conexión a los transductores de cambio de volumen o presión diferencial	Volumen
Conexión a los controladores de motor de los transductores de proximidad	Motion
Entrada auxiliar para otras aplicaciones	Aux 2
Salida para conectar las bobinas del motor torque	Coils
Conexión a PC	USB

Nota. Cada cable está equipado con un conector específico para facilitar la instalación de los transductores dentro del cuerpo de la celda, cerca de la muestra.: Los Autores

3. Línea de presión hacia la caja de control principal
4. Aparato de cambio de volumen automático con inversión de flujo
5. Panel de válvulas
6. Sistema para desaireación de agua

- Depósito de desaireación, capacidad 23 lt.
- Filtro y trampa de aire
- Bomba de vacío portátil. 220-240 V/50-60 Hz/monofásico
- Tubo de goma día 6,5 x 12,5 mm, 2 m de largo para vacío

Tabla 3

Especificaciones Técnicas Generales del equipo WF-8500

Especificaciones Generales WF-8500	
Torque máximo	1.5 Nm
Deformación Angular máxima	10°
Presión máxima de celda y contrapresión	10 MPa
Frecuencia de excitación Dinámica Columna Resonante	1-300 Hz
Frecuencia de excitación Dinámica Corte Torsional	0-50 Hz
Dimensiones Caja de control	51 x 45 x 35 cm
Dimensiones celda	H=55cm, D=27cm
Panel de control USB para adquisición de datos y generación de señal	

Nota. Listado de características generales. Elaborado por: Los Autores

4.3. Partes del equipo Wykeham Farrance 31-WF8500

El equipo 31-WF8500 está conformado por diferentes partes, las cuales son desmontables. de tal manera que brinda la facilidad para montar la probeta a ser ensayada. además, cuenta con su propio software Dynator, para registrar y realizar los ensayos de manera simple una vez que la probeta se encuentra montada adecuadamente. A continuación, se realiza un desglose de todas las partes del equipo, se comenzará a partir de aquellos elementos de mayor tamaño hasta llegar a los elementos de menor medida. Todo esto será de utilidad ya que en caso de que una de sus partes llega a perderse o

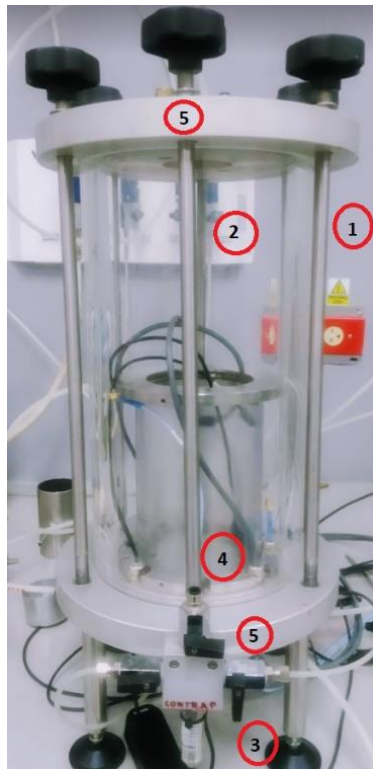
se deteriorada, sea fácil identificarla y reemplazarla.

4.3.1. Celda de aluminio

Cuenta con columnas de acero inoxidable y cilindro acrílico transparente de 170 mm diámetro interior x 200 mm de diámetro exterior incluyendo canales para drenaje de fondo. Además, en la base se encuentra ubicado 4 patas regulables, que sirven para nivelar el equipo.

Figura 11

Partes exteriores del Equipo Wykeham Farrance 31-WF8600



Nota. 1. Columnas de acero inoxidable 2. Cilindro Acrílico 3. Bases roscadas ajustable
4. Cilindro interno 5. Base y Tapa de aluminio. Fuente: Los Autores.

Todas las partes que se aprecian en la figura 11 simulan el confinamiento, con el que se desea ensayar la muestra de suelo. En la cámara se puede llegar hasta presiones de 1 MPa.

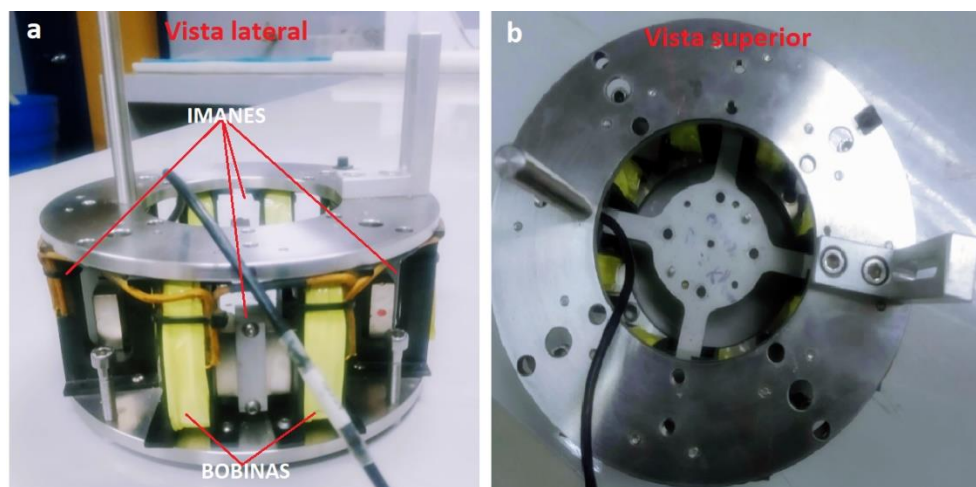
El cilindro o célula interna que contiene la muestra se llena con agua para evitar la difusión de aire a través de la membrana que contiene la muestra de suelo.

4.3.2. Marco flotante interno

Sirve para ensamblar el motor eléctrico que aplica las cargas torsionales; este motor tiene cuatro pares imanes NeFeB (imán de neodimio) de 10 x 25 x 40 mm y ocho bobinas.

Figura 12

Marco flotante del Equipo Wykeham Farrance 31-WF8500



Nota. 1. Marco flotante con 4 imanes de Neodimio y 8 bobinas. Fuente: Los Autores.

El marco flotante consta 8 bobinas y 4 imanes de Neodimio como se aprecia en la figura 12a, todo este conjunto forma un sistema de accionamiento electromagnético que sirven para realizar la excitación dinámica en la parte superior de la muestra de suelo. En la parte superior se coloca dos transductores de proximidad para monitorear la rotación del ensamblaje de la tapa

superior y otro transductor axial.

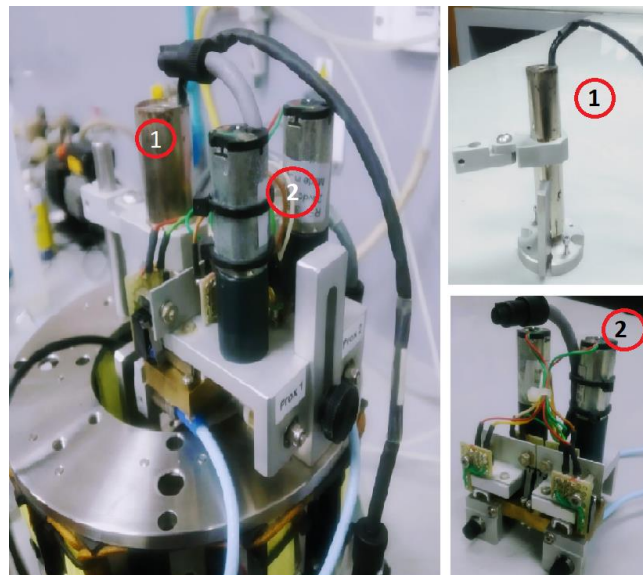
Su funcionamiento consiste que, al aplicar una corriente sinusoidal a las bobinas, atrae los imanes en una dirección e invierte la dirección, a medida que la onda sinusoidal cambia de positiva a negativa. El movimiento de rotación real de la tapa superior está determinado por la rigidez de la muestra que se está probando.

4.3.3. *Transductores LVDT*

Son mecanismos que se utilizan en sistemas de control automático, muchas veces como sensores de movimiento mecánicos en el campo de la tecnología de medición. Convierte vibraciones o movimiento mecánico, especialmente el movimiento lineal, en señales eléctricas de corriente, voltaje o variables y viceversa.

Figura 13

Tipos de transductores en el equipo



Nota. 1. Transductores LVT sobre marco flotante. Fuente: Los Autores.

Kit de sensores que contiene:

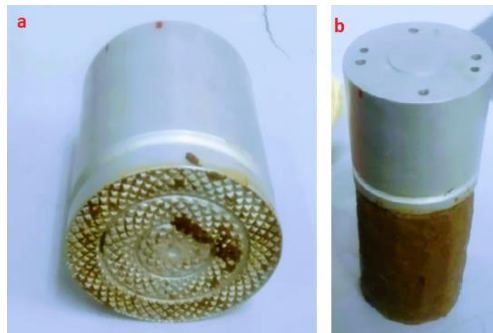
- 1 transductor de desplazamiento axial LVDT de alta precisión.
- 2 transductores de proximidad montados en el conjunto fijo para medir la tensión rotacional

4.3.4. Cabezal Activo

Es el accesorio que transmite la excitación dinámica o torsional al espécimen de suelo. La base que tiene contacto con la muestra de suelo tiene una textura rugosa muy pronunciada (semejantes a garras) como se puede apreciar en la figura 14a, debió a que la muestra de suelo debe formar un solo cuerpo con el cabezal activo para que la excitación transmitida del motor se aplique directamente al espécimen cilíndrico. Como los ensayos de columna resonante se los puede realizar tanto para muestras sólidas como huecas existen diversos cabezales según se requiera, en el Laboratorio de geotecnia de la Universidad Politécnica Salesiana se trabajará con el cabezal para muestras sólidas con un diámetro igual a 50mm y altura 100mm.

Figura 14

Cabezal Activo del Equipo Wykeham Farrance 31-WF8500



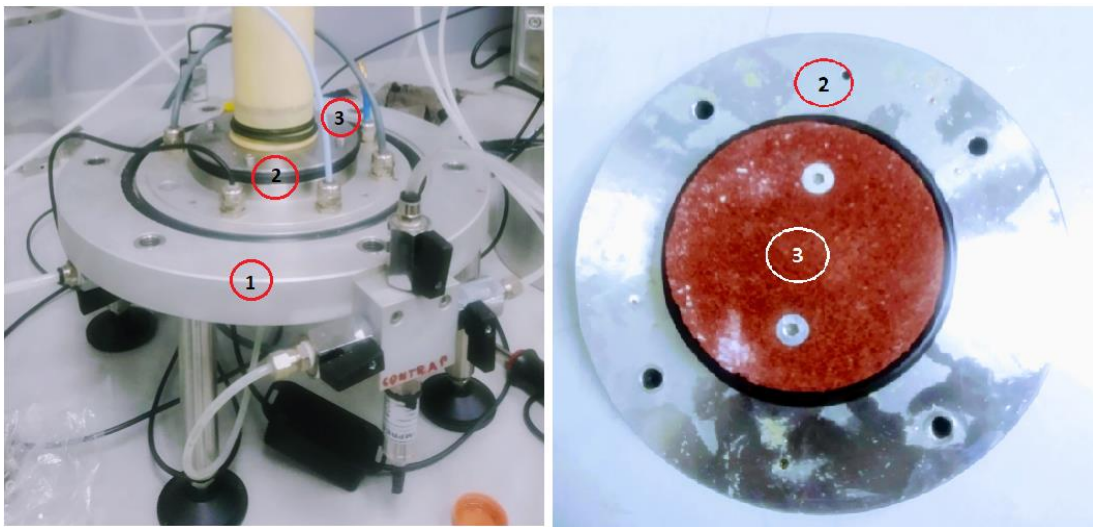
Nota. Base rugosa del cabezal activo que va en contacto directo con el suelo (a). Vista superior de la base activa donde se aprecia los 4 orificios para los tornillos de sujeción con el marco flotante interno (b). Elaborado por: Los Autores.

4.3.5. Base pasiva

Sirve para mantener fija la parte inferior de la muestra, es decir que el movimiento este totalmente restringido en su base, ya que la excitación dinámica se da en la parte superior de la probeta. Como se observa en la figura 15, para que la probeta este totalmente restringida, se coloca una piedra porosa de diámetro igual al del espécimen de suelo, para el caso de este proyecto se usó probetas con diámetro igual a 50 mm, además la piedra poros sirve como filtro para saturar la muestra.

Figura 15

Base del Equipo Wykeham Farrance 31-WF8500



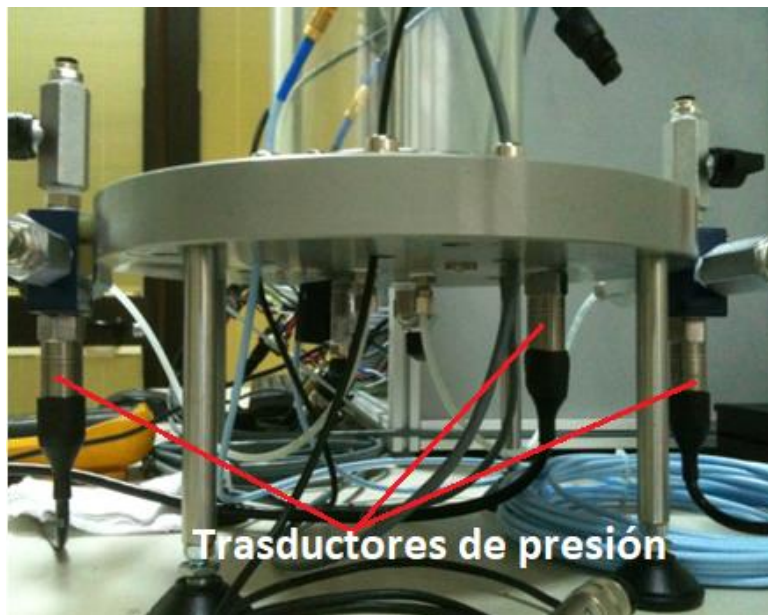
Nota. 1. Base de aluminio con orificio para drenaje 2. Base pasiva para la muestra de suelo.
3. Piedra porosa. Fuente: Los Autores.

Como se puede observar en la figura 16, ubicados en la base de aluminio, existen 3 transductores que miden: presión intersticial o de poros, contrapresión y presión de cámara, necesario para simular las condiciones naturales en las que se encuentra ubicado el suelo a ensayarse. Todas las presiones ya

mencionadas se las puede medir, ya que en la base pasiva se encuentran los orificios para presión de poros y contrapresión, y el orificio correspondiente a presión de cámara se encuentra en base de aluminio.

Figura 16

Transductores de presión



Nota. 1. En la base de del equipo existen 3 transductores de: presión intersticial, contrapresión, y presión de cámara. Elaborado por: Los Autores.

4.4. Accesorios de prueba para probetas de 50 mm de diámetro.

Adicional a todo el equipo de columna resonante y corte torsional, en el laboratorio de geotecnia se cuenta con los accesorios necesarios para realizar ensayos a probetas de suelo con diámetro igual a 50mm.

- **Cilindro dilatador de membrana**

Cilindro de acero inoxidable con un diámetro de 6cm y altura de 10cm, tiene un agujero que se encuentra ubicado a media altura, donde se conecta una manguera que sirve para realizar una leve succión, de tal manera que la membrana se dilate totalmente y el espécimen de suelo pueda ser colocado con facilidad. Ver figura 17^a

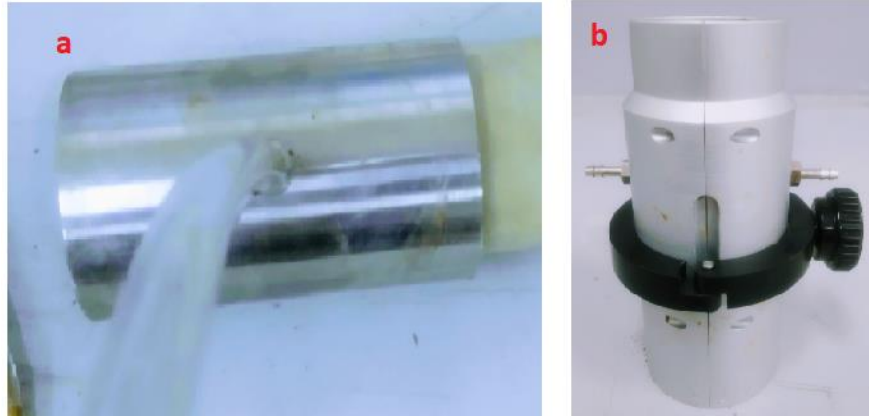
- **Molde bipartido para reconstitución de muestras**

Es un cilindro hueco de aluminio que sirve para reconstituir muestras de suelo alteradas, este cilindro este partido a la mitad de su diámetro, consta de un anillo de plástico ajustable para que al compactar mantenga el diámetro de 5cm. Una vez terminado de reconstituir la muestra se afloja el anillo y se retira el cilindro, de esta manera se garantiza que las bases de la probeta estén totalmente perpendiculares con la altura.

También posee 2 orificios para manguera a los costados, que sirven para realizar succión a la membrana y que esta se adhiera correctamente al molde de tal manera que se obtenga una muestra bien moldeada. Ver Figura 17b

Figura 17

Cilindros dilatadores de membrana y para reconstitución de muestras



Nota. Cilindro dilatador de membrana (a) y cilindro bipartido para realizar muestras reconstituidas con su anillo ajustable (b). Elaborado por: Los Autores.

- **Membrana de látex para espécimen de suelo**

Son utilizadas cuando se realizan ensayos en cámaras triaxiales, su diámetro y longitud varían, en este caso se utilizan membranas para especímenes de 10 cm de altura y 5 cm de diámetro, poseen un espesor que no debe superar el 1% del diámetro de la muestra, y su diámetro interior según la norma ASTM-D2850, es el 90% de la muestra.

La función de la membrana es proteger al espécimen de la migración de aire del fluido de confinamiento.

- **Pera de succión**

Se utiliza en vez de una cámara de vacíos, para extraer aire ente la membrana y la cámara. También se utiliza para realizar succión en el cilindro dilatador de membrana y el cilindro para muestras reconstituidas.

- **Junta Tórica - O 'Ring**

Son utilizados para asegurar que la muestra recubierta con la membrana de látex quede totalmente aislada (asegurar la estanqueidad de gases o líquidos).

- **Base para tallaje de muestras**

Elemento de acero inoxidable, posee una base giratoria de tal manera que facilita el tallaje de muestras cilíndricas. En esta base se encuentra gravados círculos de diferentes diámetros según las dimensiones que se requieran, a sus costados posee dos varillas que sirven de tope para pasar cortando el bloque de suelo que se coloca en la base giratoria, y en la parte superior posee un tornillo sin fin con una placa para ajustar la muestra.

Figura 18

Base para tallaje de muestras de suelo



Nota. Vista frontal, se aprecia varillas que sirven de tope y tornillos sin fin con placa para ajustar bloque de suelo (a). Vista superior, se aprecia diferentes diámetros gravados en la base giratoria (b). Elaborado por: Los Autores.

4.5. Calibración del equipo.

En la calibración del equipo, se utilizó las constantes recomendadas por el fabricante. Las constantes son de cada sensor utilizados en el equipo, entre estas tenemos: Sensor de presiones, cambio de volumen, sensores de aceleraciones, sensor de asentamiento axial, la inercia del cabezal activo y la elasticidad de la varilla de calibración, par de torsión, relación del voltaje con el ángulo. Observar en la figura 19 los valores de las constantes ingresadas en el panel del software.

Figura 19

Ventana de las constantes de calibración del software

Calibration constants

A/D calibration

	Units	Gains [μ V]	Offsets [x]
Accelerometer	m/s ²	16.7100	-84.4300
Angle	mrاد	3.4880	0.0000
Prox1	mm	0.1744	0.00000
Prox2	mm	0.1744	0.00000
Cell Pressure	kPa	-104.5000	-3.00
Back Pressure	kPa	-104.8000	1.00
Pore Pressure	kPa	-105.0000	21.00
Volume	cm ³	4.9880	0.00000
Accelerometer Y	m/s ²	16.7500	-94.5500
Axial	mm	2.4780	0.0000
Coil Current	A	0.2000	0.0000

D/A calibration

	Units	Gains [mV/x]	Offsets [mV]
Cell Pressure	kPa	12.700	-69.70
Back Pressure	kPa	12.900	-4.60

Controllers

	Kp	Ki	Kd	Type
Cell Pressure	0.800	0.080	0.000	PID
Back Pressure	0.500	0.050	0.000	PID

Other constants

Rm Approx	0.66667
Drive Inertia [kg cm ²]	12.10000
Head #1 Inertia [kg cm ²]	1.03100

Drive Calibration

Drive offset	0.00000
Current to Torque [Nm/A]	0.47510
System Damping [%]	0.00000

OK
Cancel

Nota. Constantes de cada sensor del equipo 31-WF8500. Elaborado por: Los Autores.

También se utilizó el kit de calibración, el cual consta de una barra de acero inoxidable, y una masa del mismo material. Esta probeta metálica sirvió para comprobar si el amortiguamiento del material tiende a cero o cercano y si su módulo de corte era igual a 70000 MPa, dato obtenido de la característica del acero inoxidable. En la figura 20 se encuentra la barra de calibración montada en el equipo lista para ser ensayada.

Figura 20

Kit de calibración



Nota. Kit de calibración de acero inoxidable. Elaborado por: Los Autores.

Los resultados obtenidos al ensayar la barrilla de calibración son los siguientes: módulo de corte (G) 73000 MPa y el amortiguamiento (D) 0.126 %, se considera que el equipo se encuentra calibrado ya que los valores de corte y amortiguamiento son similares a los esperados.

4.6. Preparación de muestras del suelo

Las muestras de suelo deben ser extraídas con el mayor cuidado, ya que estas deben conservar las condiciones in situ como: humedad, densidad del suelo, esfuerzos y disposición de las partículas del suelo.

Las probetas obtenidas, deben cumplir con la norma ASTM, para analizar la distribución de partículas, límite líquido, y límite plástico; por ende, se debe seguir los procedimientos adecuados, para la construcción de probetas y montaje para la determinación correcta de los parámetros dinámicos del suelo.

4.6.1. Características de las probetas

Para los ensayos de columna resonante y corte torsional, se utilizó dos tipos de suelos, con características diferentes; ya que la arena de Ottawa se utilizó para explicar cómo se realiza la reconstitución y montaje de probetas para los ensayos dinámicos con arenas sueltas. El segundo suelo fue un bloque inalterado extraído de una calicata otorgado por el laboratorio de suelos para luego realizar el tallado de las probetas con relación 2:1 y montaje en el equipo.

El suelo del bloque inalterado es un MH limo arcilloso de color café y con baja plasticidad el contenido de humedad 35.4 %, límite plástico de 64.23%, límite líquido de 66.01%, datos obtenidos en el laboratorio de suelos. Ver en los anexos

4.6.2. Preparación de probetas a partir de muestras en campo

La muestra obtenida en campo fue de un cubo de 50*50*50 cm la cual estaba cubierto con parafina, también con tela y embalado con plástico, para que no pierda sus condiciones de humedad in situ.

Figura 21

Bloque de suelo inalterado



Nota. Muestra inalterada otorgada por el laboratorio de Mecánica de Suelos de la U.P.S. Elaborado por: Los Autores.

Paso 1: Realizar el corte de un bloque más pequeño de aproximadamente 10*5*5 cm, del bloque inalterado, con la ayuda de un cúter y cuerdas de violín.

Figura 22

Extracción de bloque pequeño para el tallado



Nota. Realizando el corte con la cuerda de violín (a), Bloque de suelo pequeño, listo para realizar el tallado (b). Elaborado por: Los Autores.

Paso 2: Colocar el cubo en el equipo de tallado, el cual servirá para sujetar y girar la muestra, mientras se realiza el tallado y corte del suelo sobrante, para así formar el cilindro cuyo diámetro será de 50 mm y la altura de 100 mm.

Figura 23

Equipo de tallado de muestras



Nota. Muestra inalterada lista para ser tallada. Elaborado por: Los Autores.

Paso 3: La muestra debe ser tallada con cuidado para que no cambie las condiciones de situ y cumplir con la relación 2:1. Como se puede ver en la figura 24

Figura 24

Tallado de muestras



Nota. Corte del exceso de la muestra para obtener la probeta (a), Cilindro termina, listo para tomar datos (b). Elaborado por: Los Autores.

Paso 4: Luego se procede a medir la probeta obtenida del tallado, tanto el diámetro, altura y peso, para tener un registro y poder ingresar en el software para realizar los ensayos. La cuales se irán registrando en una tabla de datos, para luego identificar con facilidad las probetas ensayadas en las condiciones que fueron sometidas.

Figura 25

Medición de las probetas talladas



Nota. Diámetro de la probeta (a), Altura de la probeta (b), Peso de la probeta (c).

Elaborado por: Los Autores.

4.6.3. Reconstitución de probetas a partir de muestras alteradas

La reconstitución de muestras se utiliza, para obtener las condiciones in situ de una muestra alterada. Para la reconstitución de muestras tenemos varios métodos, los cuales se utilizan de acuerdo con las condiciones del suelo.

- **Método de reconstitución estática.** Para la ejecución de este método se utilizan materiales sencillos y básicos. Los parámetros a considerar para la formación de probetas es la relación de vacíos, y el peso volumétrico seco. Las muestras inalteradas no deben pasar del 20% de contenido de humedad, ya que estas no podrían reconstituirse (Gonzales 2019).
- **Método de compactación.** Este método se puede utilizar en arenas sueltas y densas, ya que utiliza la densidad del suelo in situ, garantizando así la sedimentación natural del suelo y la homogenización de las partículas debido a la carga estática uniformemente distribuida. Se

necesita de un molde partido, y un apisonador, para alcanzar al volumen determinado, según la densidad del suelo; las capas suelo pueden variar de 3 a 4 capas.

- **Método de pluviación.** Se deposita una muestra de arena seca con la ayuda de un embudo en un molde partido. La punta del embudo se mantiene a una altura mínima de caída por encima de la superficie de la arena a lo largo del llenado con el fin de dar a la densidad más baja posible. Se puede modificar la densidad, al tocar por la periferia de manera uniforme del molde utilizando una varilla de goma para conseguir una densidad más alta deseada.

Según las normativas ASTM D3999-11 7.4.3 y 7.4.4 y el método de compactación, se emplearon para la reconstitución de probetas, de la arena de Ottawa, cuya densidad tiene un valor de 1.6667 g/cm³; Para el montaje y formación de probetas se siguió el siguiente proceso.

Paso 1: Pesar el material necesario, según la densidad requerida, para cada capa; en nuestro caso cada porción era de 85.9 g. Él se obtuvo en base a la densidad de la arena de Ottawa.

Figura 26

Peso de la arena de Ottawa

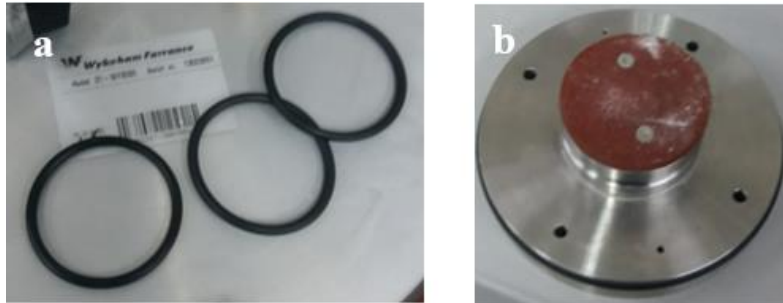


Nota. Peso de arena necesario para cada capa de la probeta. Elaborado por los Autores.

Paso 2: Coloca la membrana de látex de 5 cm * 10 cm, en el soporte de la piedra porosa, la cual también será fijada con 2 O’rings, para evitar el ingreso de aire a la probeta.

Figura 27

Elementos para el montaje de muestra

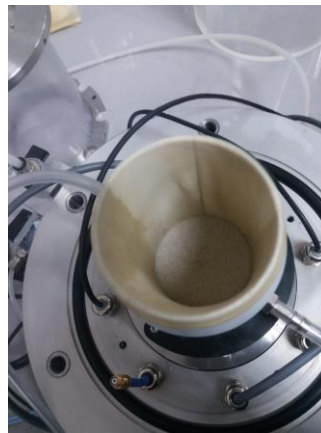


Nota. O’rings (a), soporte de la piedra porosa (b). Elaborado por los autores

Paso 3: Colocar la membrana de latex se pasa por el molde partido, el cual también se debe hacer una pequeña succión para que la membrana se quede siempre en las paredes del molde y así poder dar la forma de la probeta.

Figura 28

Membrana de látex en el molde partido



Nota. Colocación de la membrana en el molde partido. Elaborado por los autores

Paso 4: Se procede a colocar la arena, hasta los niveles determinados en cada capa, para que cumpla con la densidad in situ del suelo. Para nuestro caso ensayamos una arena suelta, por eso la compactación poca para llegar al nivel de cada capa.

Figura 29

Probeta de la arena suelta



Nota. Llenado de la probeta con la arena de Ottawa. Elaborado por los autores

Paso 5: Enrasar con una espátula, en la última capa de suelo, se debe hacer con cuidado para que no se derrame el material y así no perder las condiciones esperadas de la probeta.

Figura 30

Enrasar la muestra

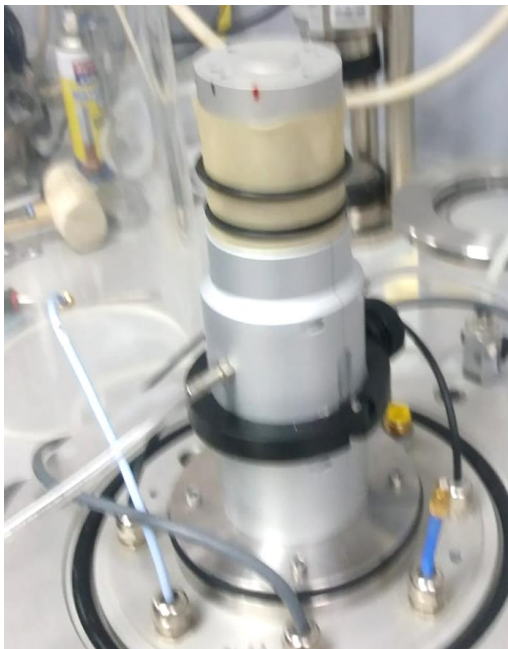


Nota. Nivelar el extremo de la muestra con una espátula. Elaborado por los autores

Paso 6: Luego se coloca el cabezal de aluminio, para que los esfuerzos del equipo sean replicados en la muestra, y también se debe fijar la membrana al cabezal con 2 O’rings.

Figura 31

Colocación del cabezal activo en la muestra

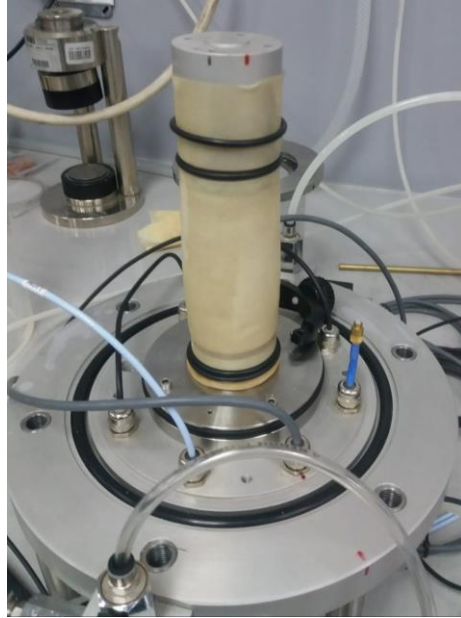


Nota. Asegurar bien la membrana con los O’rings . Elaborado por los autores

Paso 7: Luego procedemos a retirar el molde partido, para la cual necesitamos una pera de succión ya que esta hace que las partículas del suelo no pierdan su distribución en la probeta. La succión se hace por la tubería de contrapresión, esta succión debe permanecer hasta colocar agua en la cámara.

Figura 32

Probeta sin el molde partido

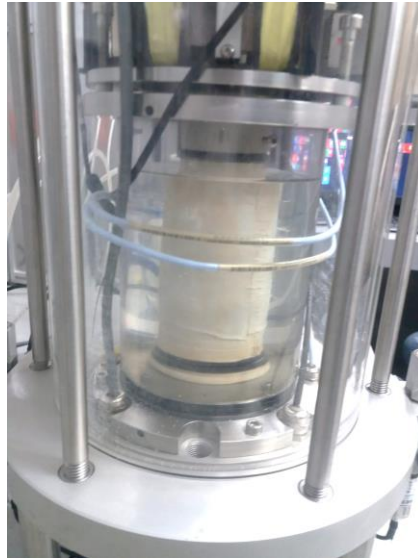


Nota. La muestra se mantiene gracias a la pera de succión, garantizando la distribución de las partículas de suelo de manera uniforme. Elaborado por los autores.

Paso 8: Para finalizar se coloca la cámara de presión del equipo, la cual se sujeta con 4 tornillos, para luego llenar de agua hasta la altura de los O’rings. Para luego seguir con la colocación de los magnetos, proxis, y sensor axial, los cuales irán sujetos con sus respectivos tornillos.

Figura 33

Agua en la celda



Nota. La cámara que contiene el agua debe estar bien asegurada con los tornillos. Elaborado por los autores.

4.7. Ejecución de los ensayos Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico

4.7.1. Según la normativa ASTM D4015

Para el caso de muestras a ensayarse, se establecen algunos parámetros que debe cumplir para llevar a cabo un ensayo satisfactorio.

En primer lugar, dice que las muestras deben tener sección circular uniforme, y tanto la parte inferior como superior de la probeta deben ser totalmente perpendicular a la altura de la muestra, para que esta se asiente bien en la piedra porosa y el cabezal. Su diámetro mínimo debe medir 33mm o 1.3 in, y no deben existir partículas dentro de la probeta que exceda 1/6 del diámetro.

Las muestras deben cumplir la siguiente relación; altura sobre diámetro (h/D)>2 hasta 3.

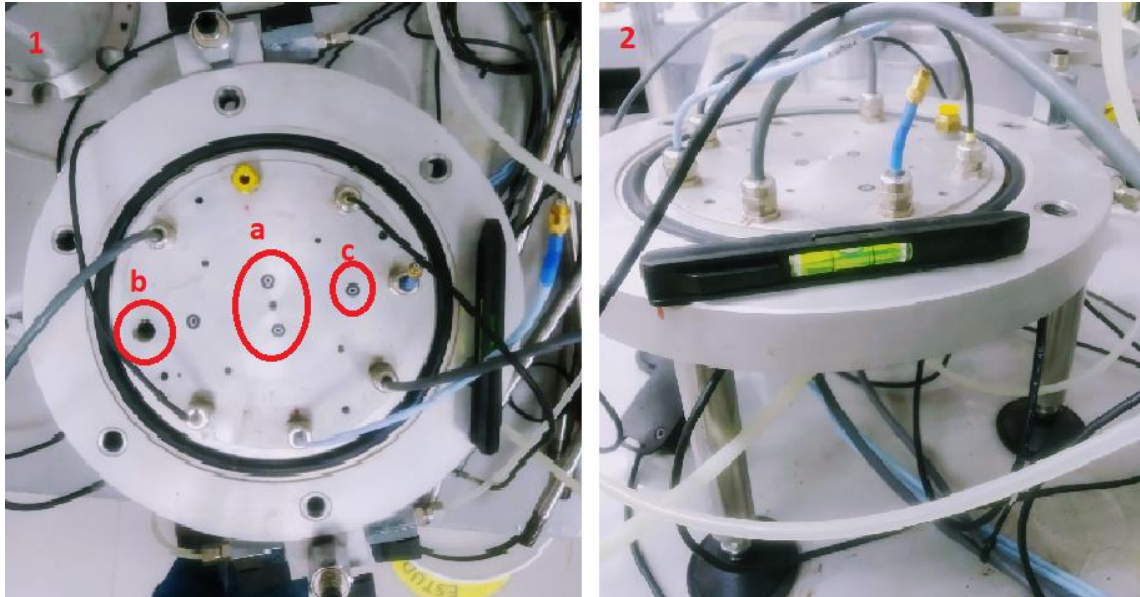
Los equipos de medición deben tener una tolerancia de 1%. Respecto a las mediciones de diámetro, se debe tomar en 3 puntos a lo largo de su altura, se recomienda tomar mediciones con el calibrador en sus 2 caras y al medio de la probeta. Para el caso de la altura las medidas tendrán que realizarse en los cuatro cuadrantes, una vez realizadas todas las mediciones se sacará un promedio de diámetro y altura respectivamente. Al realizar las mediciones de diámetro y altura se sugiera realizarlas de la manera más cuidados ya que cualquier mala manipulación a la muestra cilíndrica, dependiendo del tipo de suelo puede provocar desprendimiento del mismo en cualquier parte de la muestra, dañando el espécimen e invalidándolo para proceder a realizar los ensayos.

4.7.2. Nivelación y colocación de base pasiva.

El primer paso para montar cualquier tipo de muestra de suelo en un equipo de ensayo de columna resonante y corte torsional, es nivelar la base de aluminio, esto se lo realiza tanto en el eje x e y, en el caso del modelo 31-WF8500 lo realizamos gracias a sus 4 patas ajustables.

Figura 34

Nivelación de base del equipo.



Nota. orificios de presión de poros y contrapresión (1a). orificio para llenar agua en cámara o celda (1c). Orificio de presión de cámara o celda (1c). Nivelación de la base, donde además se parecía las patas ajustables (2). Elaborado por: Los Autores

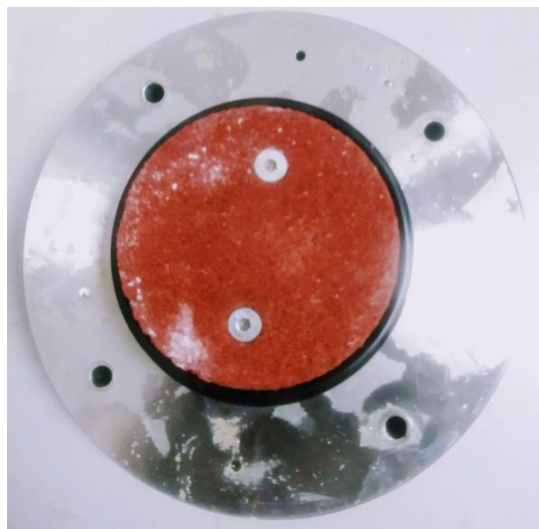
Con la base nivelada se procede a comprobar que los orificios de presión de poros, contrapresión, y presión de cámara (estos se los puede apreciar en la figura 34) no estén taponados. Para ello abrimos las válvulas y dejamos que fluya agua en el caso de los ductos de presión de poros y contrapresión, los cuales son más probables que pueden sufrir taponamientos ya que encima de ellos se coloca la base fija con la piedra porosa y la muestra de suelo.

El siguiente paso es colocar la base pasiva en la base del equipo, se ajustan los 4 tonillos. Se procede a colocar la piedra porosa y se ajusta los tornillos que la fija, la cabeza de estos tornillos deben quedar al ras de la piedra porosa para la probeta de suelo se asiente correctamente, en ocasiones

es necesario realizar un bisel, para que la cabeza de los tornillos no sobresalga y se tenga una base plana para la muestra.

Figura 35

Base pasiva.



Nota. Base pasiva donde se puede observar los 4 orificios donde se ajustan los tornillos con la base del equipo, además se observa que la piedra poros que ya está sujeta con la cabeza de los tornillos totalmente perdidas. Elaborado por: Los Autores.

De igual manera se verifica que el agua pase correctamente a través de la piedra poros, nuevamente se deja fluir agua por los orificios de presión de poros y contrapresión, se seca el excedente de agua que salió y se procede a montar las muestras de suelo.

4.7.3. Procedimiento para montaje de muestra

Para iniciar con el proceso de montaje de muestra, se debe tener en cuenta algunos datos sobre el espécimen a ensayarse, tales como; una clasificación visual del suelo, si es una clasificación hecha en laboratorio es mejor, límite líquido y plástico, el peso la muestra cilíndrica, diámetro, y altura.

4.7.4. Montaje de Muestra de arena suelta.

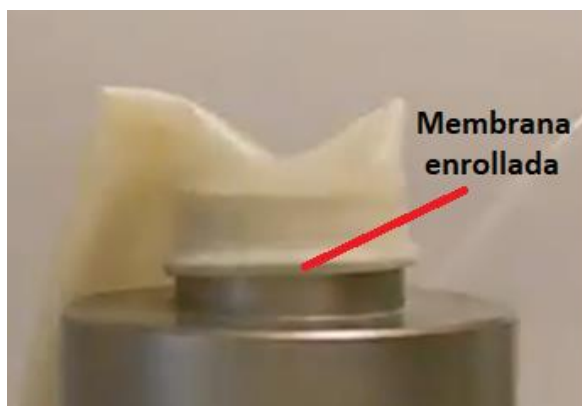
Cuando se tiene muestras arenosas sueltas como es el caso de la arena de Ottawa, se las monta directamente en la base pasiva del equipo.

Paso 1: Colocar una membrana de látex nueva en el pedestal o base pasiva, se debe dejar un excedente de membrana alrededor de la base del pedestal.

Paso2: Colocar 2 O’rings en el pedestal, aparte enrollar el excedente de membrana hasta obtener un anillo similar a un O’ring, que servirá como empaque semejante a un sello en la base del pedestal, así al colocar el cilindro bipartido para reconstitución de muestra no habrá fugas de aire por la parte inferior del bipartido. Esto es necesario ya que en el momento de succionar la membrana contra el cilindro bipartido no debe existir fugas de aire y así obtener una muestra cilíndrica.

Figura 36

Colocación de membrana en el pedestal.



Nota. El excedente de membrana enrollada sirve para que no haya fugas de aire al succionar la membrana contra el cilindro bipartido. Elaborado por: Los Autores.

Paso 3: Una vez colocado en su sitio la membrana con el cilindro bipartido se procede a

colocar la arena con un embudo para no regarla el resto del equipo, todo el proceso de reconstitución de muestra se explica detalladamente en el apartado de reconstitución de muestras alteradas. Para el caso de arena de Ottawa, trabajamos con su densidad seca.

Figura 37

Proceso de montaje de muestra de arena de Ottawa



Nota. Succión de la membrana contra el cilindro bipartido (37a). Colocación de arena dentro de molde con membrana (37b). Enrasamiento de la arena en el molde (37d). Elaborado por: Los Autores.

Paso 4: La arena suelta se coloca por porciones previamente pesadas, al colocar la última porción de suelo de arena, enrasamos con una espátula como se puede apreciar en la figura 6d hasta dejar una superficie totalmente plana para que el cabezal activo se asiente correctamente

Paso 5: Colocar el cabezal cuidadosamente, subir la membrana y colocar los O’rings en el cabezal de tal forma que la muestra quede totalmente aislada y asegurada.

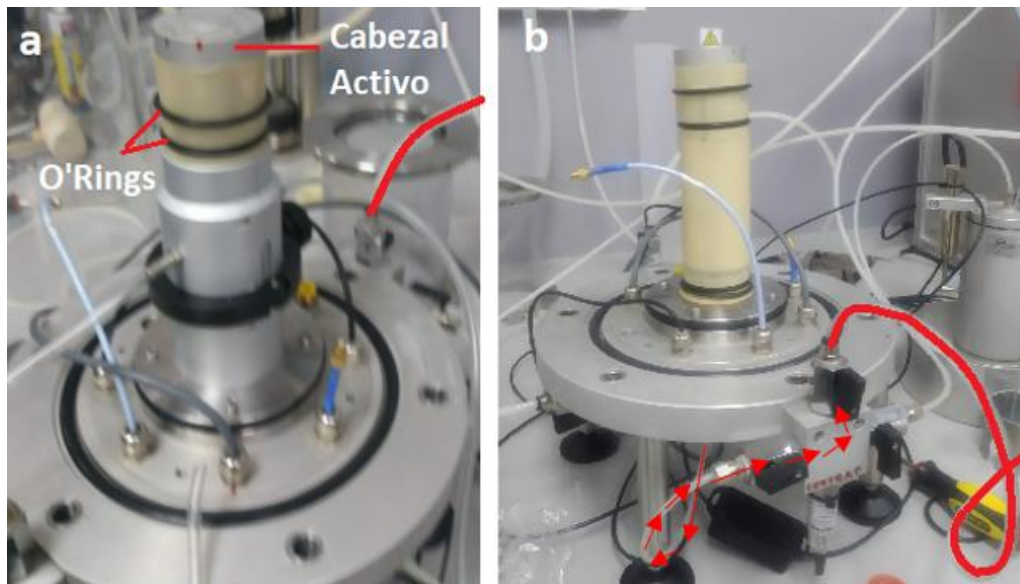
Paso 6: Con la pera de succión en conjunto con una manguera realizar succión (según algunas

bibliografías esta debe oscilar entre 10KPa-20KPa), a través de la válvula de salida de contrapresión. Ya que el cilindro de arena se encuentra totalmente sellado (como una botella cerrada llena de arena, las únicas opciones que tiene para la entrada o salida de aire es por los orificios de presión de poros y contrapresión que se ubican bajo la piedra porosa) gracias a los O’rings que se colocan tanto en el pedestal fijo así como en el cabezal activo, la succión aplicada permite que las partículas de arena se mantengan juntas y que la membrana mantenga la forma del molde cilíndrico (D=50mm y H=100mm).

Paso 7: Retirar cuidadosamente el cilindro bipartido. Comenzamos aflojando el tornillo del anillo de seguridad, con la ayuda de una espátula se abre poco a poco el cilindro bipartido hasta retirar sus 2 partes, de tal manera que la muestra se mantenga por si sola.

Figura 38

Retiro del molde (cilindro partido).



Nota. Muestra con el molde (cilindro bicortado), cabezal activo y O’Rings (38a). Muestra cilíndrica una vez retirada el molde, también se aprecia la manguera que sale de la válvula de

contrapresión (38b). Elaborado por: Los Autores.

En la figura 38b se puede apreciar la dirección del flujo de succión que se aplica en la válvula de contrapresión, para que al quitar el cilindro bipartido la muestra se sostenga por si sola.

Paso 8: La pera de succión se la retirara una vez que se coloque la celda interna y esta se llene de agua o aceite de silicona hasta la altura donde se encuentra el primer O 'ring del cabezal activo, de esta manera la presión del agua hará que la muestra de arena suelta mantenga su forma.

4.7.5. Montaje de Muestra de suelo inalterado en el pedestal fijo.

Paso1: Una vez que se tiene la muestra tallada (con forma cilíndrica uniforme), se procede a verificar que sus bases estén totalmente perpendiculares respecto a su altura, de no ser así se procede a igualarla cuidadosamente con un cuchillo.

Paso 2: Como siguiente paso realizamos las mediciones respectivas con un pie de rey o calibrador de la altura (en sus 4 cuadrantes), también tomamos medidas del diámetro en sus 2 extremos y a media altura y finalmente sacamos un promedio, que serán los datos al ser ingresados en el software.

Paso 4: Tomar una membrana de látex y ubicarla centrada en el cilindro dilatador, para que los excedentes de membrana queden los más iguales posibles, estos servirán para ser colocados en el pedestal y cabezal activo respectivamente. Doblamos los excedentes hacia afuera en los 2 extremos del cilindro. Finalmente realizamos succión a través de la manguera para extraer el aire contenido entre el cilindro y la membrana de tal manera que la membrana se adhiera a todas las paredes internas del cilindro y tome su forma.

Figura 39

Colocación de membrana de látex.



Nota. colocación de membrana en cilindro dilatador (39a). la muestra de suelo debe quedar en la mitad de la membrana (39b). Elaborado por: Los Autores.

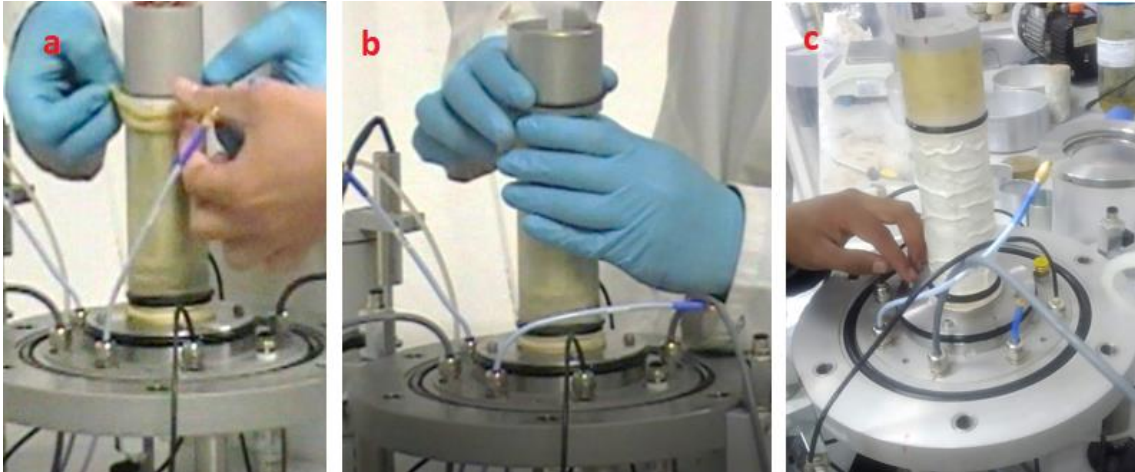
Paso 5: Una vez que la membrana se encuentre dilata se coloca la muestra de suelo, como se aprecia en la figura 39b, se libera la presión de succión y se saca la muestra con la membrana ya colocada

Paso 6: Doblar la membrana en los 2 extremos de la probeta, para que se coloque en el pedestal pasivo y en el cabezal activo. Colocar la muestra encima de la piedra porosa proceder a desdoblar la membrana hacia el pedestal, como siguiente paso se coloca 2 O'Rings en el pedestal.

Paso 7: Colocar el cabezal activo encima de la probeta y de igual manera de desdobla la membrana para cubrir el cabezal, finalmente colocamos otros 2 O'Rings para que la muestra quede totalmente asegurada y aislada.

Figura 40

Muestra inalterada



Nota. Proceso de desdoble de membrana, colocación de cabezal activo y colocación de O'Rings. Elaborado por: Los Autores.

Como se aprecia en la figura 40c, la membrana se encuentra arrugada, es un error común que se dan al momento de montar una muestra, pero está no debe suceder ya que la manera correcta es que la membrana este totalmente estirada, además entre el espécimen de suelo y la membrana no debe haber presencia de burbujas de aire, debido a que estos factores pueden afectar en los resultados de los ensayos a realizarse. Cuando la membrana esta arrugada lo correcto es quitar los O'Rings para estirla y nuevamente poner el O'Ring.

Después de montar las muestras de arena suelta o una muestra de suelo inalterado una muestra reconstituida según la humedad requerida, el procedimiento a seguir es el mismo en cualquiera de los casos mencionados, a continuación, se detalla como colocar elementos tales como: celda interior,

marco flotante, los traductores axiales y de presión (Proxis), celda exterior, tapa y columnas.

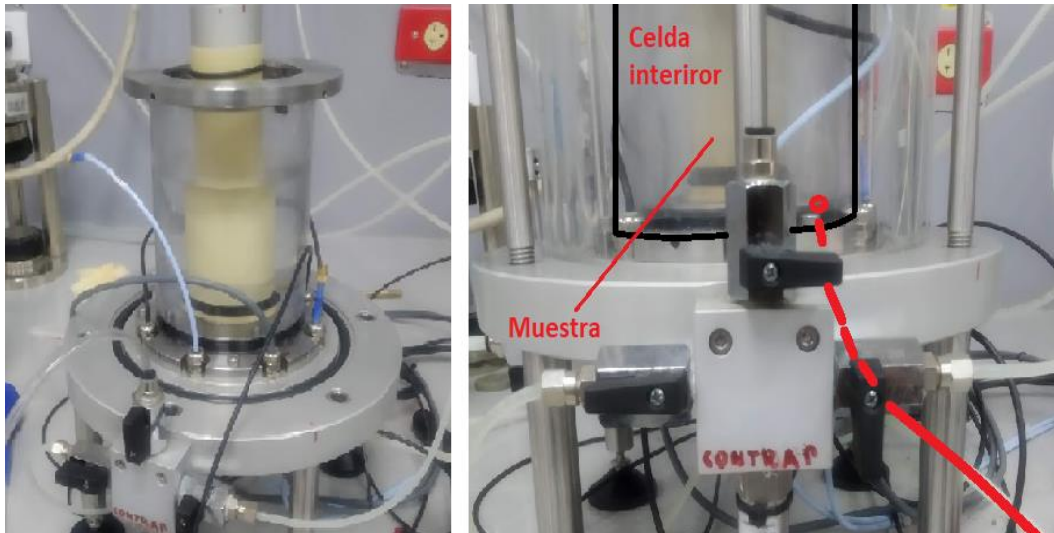
4.7.6. *Montaje del Equipo Columna Resonante y Corte Torsional*

Paso1: Con la muestra situada en el pedestal se procede a colocar la cámara interior, cuidadosamente ubicando cada cable que sale de la base. Se ejerce una presión en la parte superior de la celda para que esta entre a presión y finalmente se coloca los tornillos de sujeción.

Paso 2: Después de ajustar todos los tornillos se procede a llenar la cámara interior con agua, para ello ubicamos en la parte inferior de la base una la válvula de la cámara y conectamos la manguera con agua desairada, se abre la válvula y se deja llenar la cámara hasta que el agua llegue al primer O 'Ring del cabezal activo.

Figura 41

Colocación de cámara interior



Nota. Proceso de llenado de cámara interior, en la figura de la derecha se puede apreciar de color rojo la línea de flujo para llenar la cámara interna de agua. Elaborado por: Los Autores.

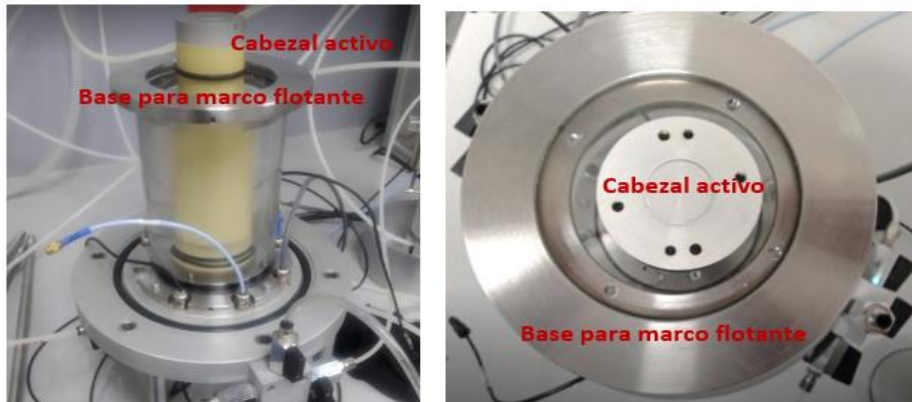
Si la muestra de suelo que estamos montando es una arena suelta, después de terminar este paso (llenar la celda interior con agua), se puede retirar la pera de succión ya que el agua ejercerá una presión alrededor de toda muestra impidiendo que esta se deshaga.

Paso 3: Colocar el marco flotante interno ver figura 42 del marco flotante que está constituido de los 4 imanes y los 4 pares de bobinas.

Figura 42

Colocación de marco Flotante

Vista frontal y superior de la celda interna



Vista lateral y superior de marco flotante



Nota. Proceso de llenado de cámara interior, en la figura de la derecha se puede apreciar de color rojo la línea de flujo para llenar la cámara interna de agua. Elaborado por: Los Autores.

Instalar el marco flotante en la base superior de la celda, en este apartado es muy importante que el excitador embone correctamente con el cabezal activo, para que formen un solo cuerpo (excitador, cabezal activo y muestra de suelo), de esta manera la excitación dinámica será transmitida de forma correcta.

Paso 4: Ajustar los tornillos de fijación tanto del excitador con el cabezal fijo y el marco flotante con la celda interna. Tomar en cuenta que los imanes deben quedar en el centro de las bobinas. Además, estar pendiente de que los tornillos amortiguadores estén en su lugar.

Paso 5: Colocar los sensores de presión a un costado del marco flotante.

Figura 43

Colocación de sensores de presión (Proxi1 y Proxi2)

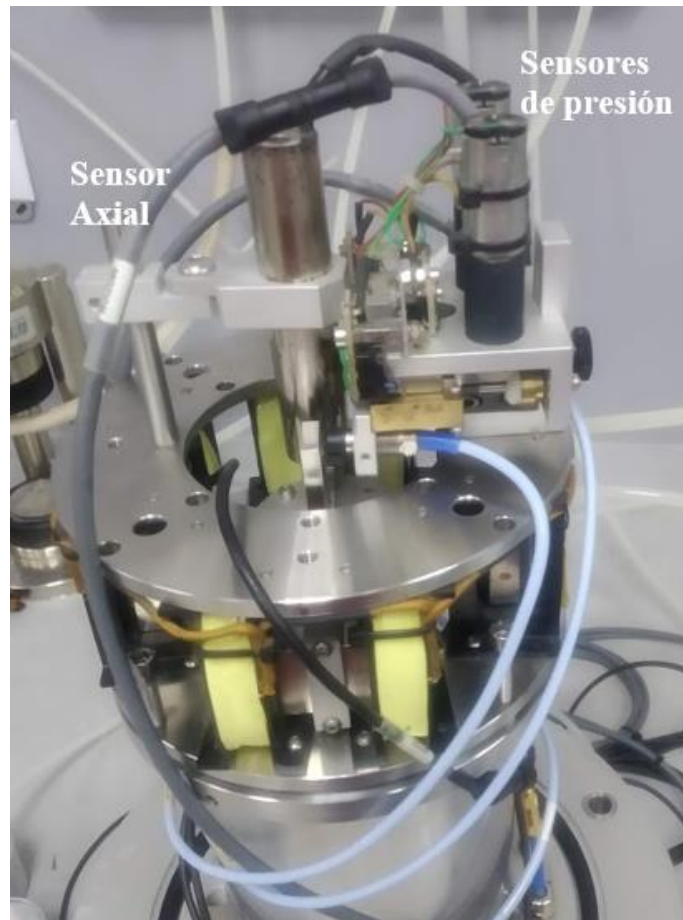


Nota. Proceso de colocación de los sensores de presión. Elaborado por: Los Autores.

Paso 6: El último sensor que se coloca es el axial, que va encima de la placa excitadora justo en el centro del marco flotante. Este sensor es ajustado con los tornillos de sujeción contra la placa excitadora.

Figura 44

Colocación completa de sensores de presión y axial



Nota. sensores colocados y conectados correctamente. Elaborado por: Los Autores.

Una vez que los sensores estén en su lugar y ajustados, se debe proceder a conectar los cables provenientes de la caja de control principal, para ella cada línea se encuentra marcada, además cada conector de sensor tiene su propio pin, por decir el conector del proxí 2 tiene 4 pines y el del proxí 2 tiene 5 pines. Además, los cables deben acomodarse de tal manera que no estorben al momento de colocar el cilindro de acrílico principal.

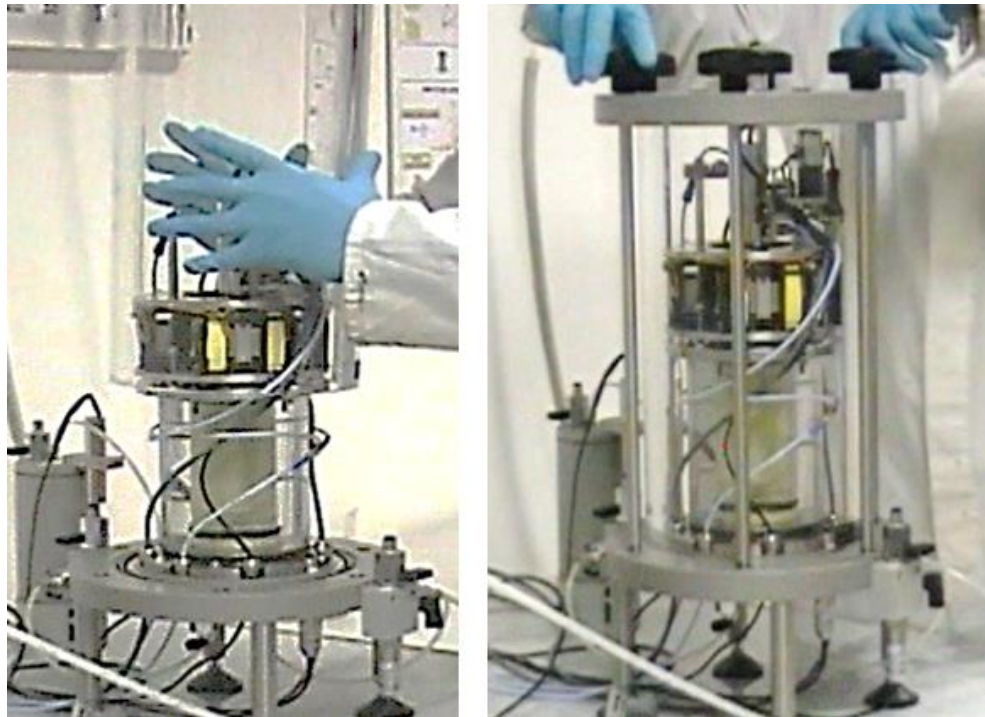
Paso 7: Colocar el cilindro de acrílico, en este apartado se debe tener en cuenta que el

empaques ubicados en la base del equipo deben estar bien acomodados, para que el cilindro de acrílico se asiente bien. De igual manera la tapa posee otro empaque, el cual también debe estar bien ubicado.

Paso 8: Finalmente se colocan las columnas de acero inoxidable, estas deben ser ajustadas de tal manera que no haya fugas en su parte superior e inferior al momento de aplicar presión de celda y contrapresión.

Figura 45

Colocación de cilindro de acrílico y columnas



Nota. el cilindro se lo debe colocar cuidadosamente, y las columnas deben ajustarse bien, de tal forma que no exista fugas. Elaborado por: Los Autores.

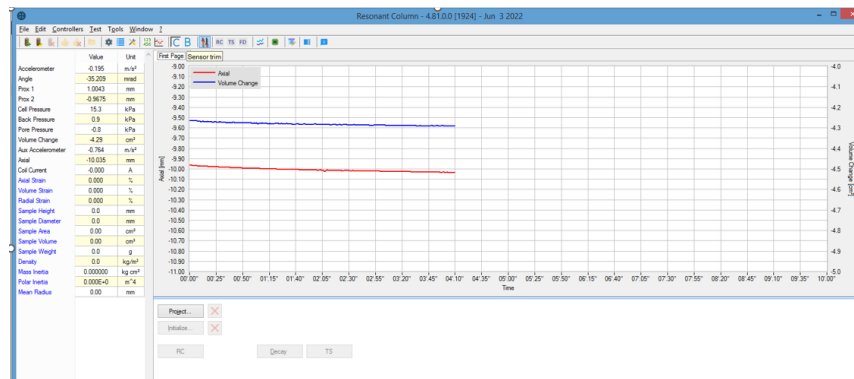
4.8. Explicación del software

El software del equipo 31WF8500 nos permite la realización de los ensayos de Columna Resonante (RC) y Corte torsional Cíclico (TS). También se puede controlar las presiones en cámara,

presión de poro y la contrapresión, las cuales sirven para ensayar las probetas en diferentes condiciones como: saturar y consolidar las muestras, esto ayuda a que los datos obtenidos sean más cercanos a las condiciones in situ.

Figura 46

Ventana principal del software



















Nota. En la ventana principal se observa todas las funciones del software.

Elaborado por: Los Autores.

En la parte superior de la ventana principal, se tiene los iconos de acceso directo para la ejecución de las siguientes funciones que desempeña el software las cuales especificaremos en la siguiente tabla. Tabla 4

Tabla 4*Accesos rápidos*

Icono	Función
	Nuevo proyecto
	Ubicación de los datos del proyecto
	Cerra el proyecto
	Inicializar el proyecto
	Finalizar el proyecto
	Carpeta de archivos del proyecto
	Ajuste
	Calibración
	Constantes
	Graficas
	Presión en cámara
	Contra presión
	Sensores trim
	Ensayo de columna resonante
	Ensayo de corte torsional cíclico
	Decaimiento logarítmico

Nota. Los accesos rápidos ayudarán en la realización de los ensayos. Elaborado por: Los Autores.

La parte izquierda de la ventana se puede observar las constantes de los sensores, valores que toman los sensores después de aplicar las cargas, también se puede observar los datos de las probetas, y resultados después de realizar los ensayos. Observar la figura 47

Figura 47

Constantes y datos ingresados en el software

	Value	Unit
Accelerometer	-0.197	m/s ²
Angle	-35.212	mrاد
Prox 1	1.0044	mm
Prox 2	-0.9675	mm
Cell Pressure	15.3	kPa
Back Pressure	1.0	kPa
Pore Pressure	-0.7	kPa
Volume Change	-4.29	cm ³
Aux Accelerometer	-0.745	m/s ²
Axial	-10.039	mm
Coil Current	-0.000	A
Axial Strain	0.000	%
Volume Strain	0.000	%
Radial Strain	0.000	%
Sample Height	0.0	mm
Sample Diameter	0.0	mm
Sample Area	0.00	cm ²
Sample Volume	0.00	cm ³
Sample Weight	0.0	g
Density	0.0	kg/m ³
Mass Inertia	0.000000	kg cm ²
Polar Inertia	0.000E+0	m ⁴
Mean Radius	0.00	mm

Nota. Las constantes y datos varían según las condiciones del ensayo.

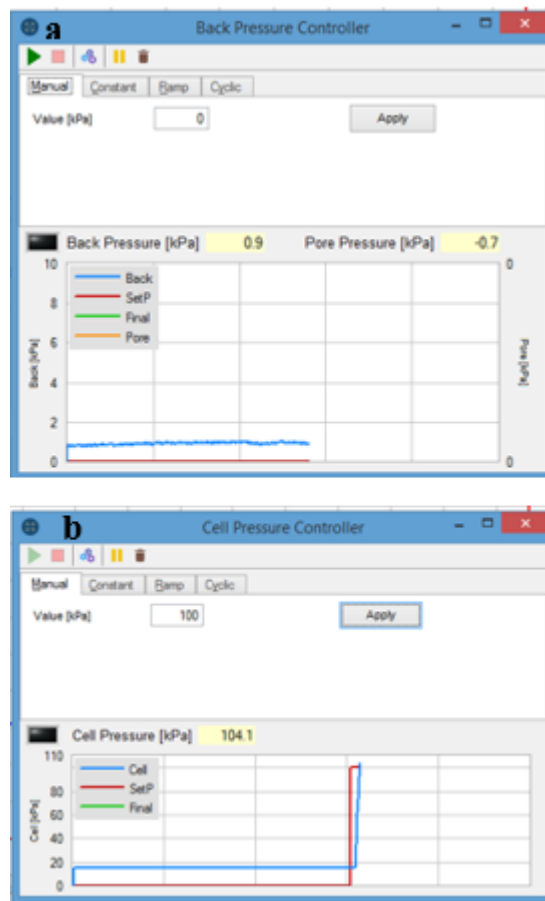
Elaborado por: Los Autores.

Para controlar la presión, tenemos 3 tipos de presiones: la presión de cámara, contrapresión y la presión de poro, la cuales tiene sus diferentes ventanas y las podemos observar en la figura 48. En la ventana de presión de poro se muestran tres gráficos de diferentes colores, azul para el valor

actual de la presión, rojo para el punto de ajuste impuesto al controlador y verde para el valor final a alcanzar, si especifica una tasa de cambio tiempo extraordinario. Mientras que en la ventana de contrapresión tenemos presión de poro de color azul, contrapresión de color naranja, valores que se evalúan de color rojo y finalmente de color verde la presión final a alcanzar.

Figura 48

Celda de presión y Contrapresión

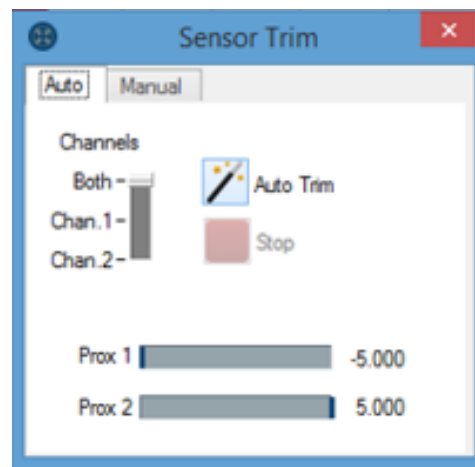


Nota. Contra presión (48 a), cámara de presión (48b). Elaborado por: Los Autores.

Antes de iniciar con los ensayos se debe realizar el auto ajuste de los sensores trim, para que no exista obtención de datos incorrectos, ya que estos sensores garantizan que la excitación dinámica se encuentre encerrada. Para acceder al auto ajuste de los sensores trim se deber dar clic en el icono de la figura 49

Figura 49

Ventada de los sensores trim



Nota. El prox 1 y prox 2 deben encontrarse alineados en cero, después de realizar el auto ajuste. Elaborado por: Los Autores.

Luego de hacer el auto ajuste de los sensores trim se procede a ingresar los datos de cada probeta en la venta de nuevo proyecto, como podemos observar en la figura 50. También se debe poner el nombre del ensayo y una descripción, para que sea fácil la identificación de los datos en los blocs de notas almacenados en el ordenador.

Figura 50

Ventana para ingresar los datos de la probeta

The image shows a software window titled "New Project". It contains the following fields and values:

- Project Name: otawwa
- Comment: (empty text area)
- Name: (empty text area)
- Diameter [mm]: 50.00
- Height [mm]: 100.00
- Weight [g]: 343.6
- Calibration rod: No [normal use]

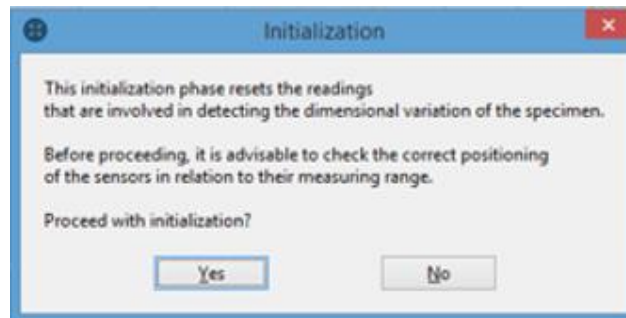
Nota. En la imagen se observa donde se ingresan los datos de las probetas.

Elaborado por: Los Autores.

Para realizar los ensayos, se debe dar clic en inicializar para tener los valores referenciales de los ejes, lectura del cambio de volumen y desplazamiento

Figura 51

Ventana para iniciar el ensayo



Nota. El mensaje que se da después de inicializar es para que los sensores estén listos para medir los desplazamientos. Elaborado por: Los Autores.

En el ensayo de columna resonante (RC), se debe primero realizar un barrido de 1 Hz- 300 Hz, para poder determinar la frecuencia de resonancias de la probeta y así poder determinar el módulo de corte (G) y amortiguamiento (D).

Los campos de la ventana del ensayo de columna resonante:

Frecuencia inicial: frecuencia de inicio de la exploración [Hz]

Frecuencia final: frecuencia final de la exploración [Hz]

Duración: tiempo [s]

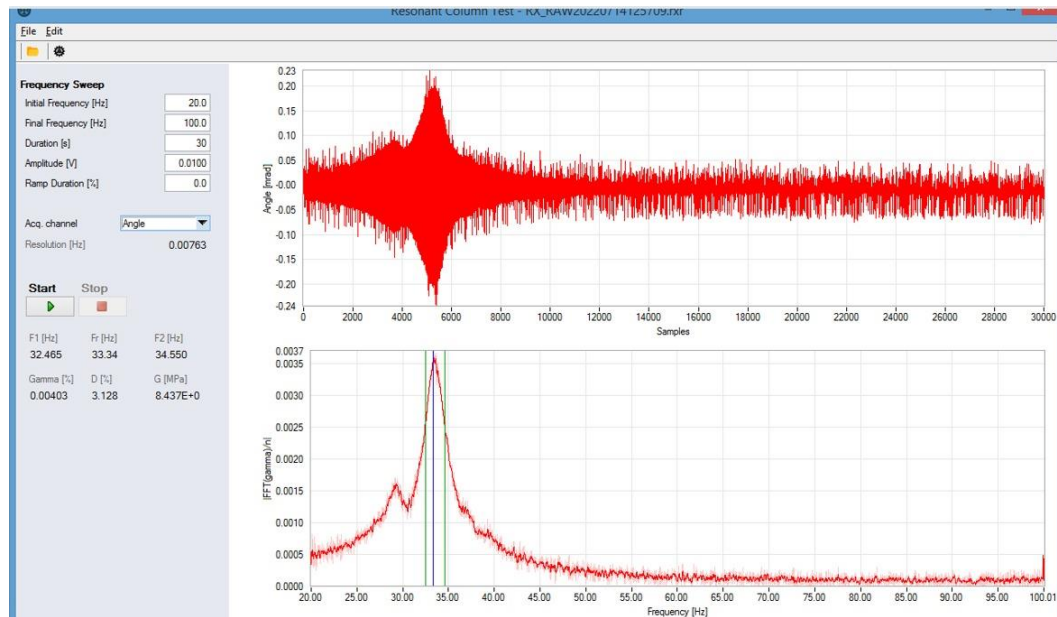
Amplitud: Sinusoidal de la onda [v]

Al presionar el botón "Ejecutar" se inicia el escaneo: el gráfico superior muestra los datos adquiridos contra el tiempo por la rotación impuesta al espécimen y al final se procesarán los datos

del pase, que se muestran en la figura 52, con una línea azul que destaca la frecuencia de resonancia y las líneas verdes para los límites de la banda.

Figura 52

Ventana del ensayo de columna resonante



Nota. Gráficas y resultados obtenidos después de realizar el ensayo.

Elaborado por: Los Autores.

Para el ensayo de corte torsional cíclico (TS), los datos que se deben ingresar son los siguientes:

Frecuencia: Señal de estímulo (Hz)

Amplitud: Amplitud de la onda sinusoidal (V)

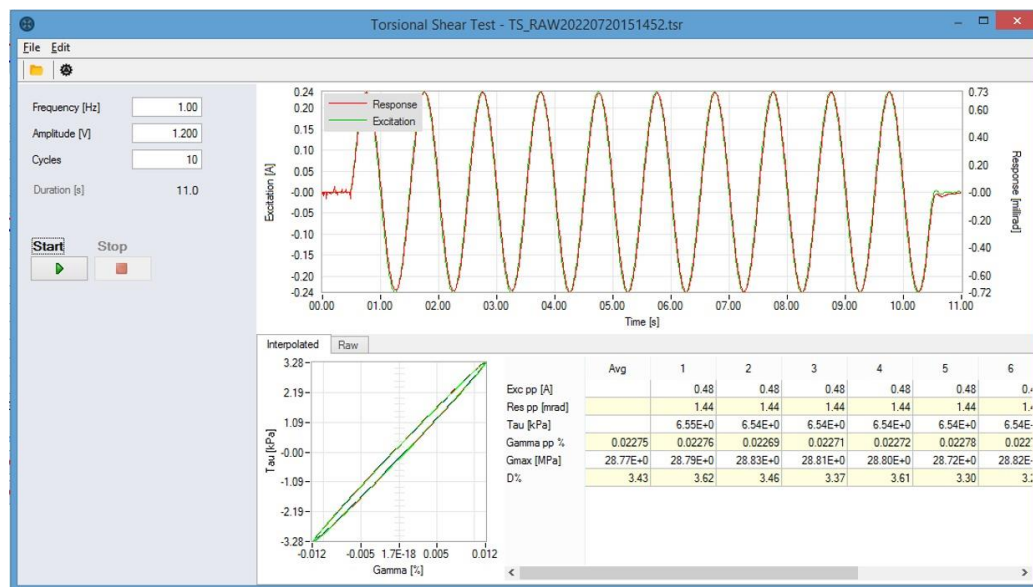
Ciclos: Duración de la fase de estimulación en número de ciclos

Al pulsar el botón "Ejecutar" se inicia la prueba. El gráfico superior muestra los datos adquiridos en el tiempo para la rotación impuesta al espécimen. El diagrama en verde es la excitación, se refiere al eje de ordenadas de la izquierda. El diagrama en rojo es la respuesta y se refiere al eje de ordenadas del lado izquierdo.

Después del procesamiento, los resultados se mostrarán en la parte inferior de la ventana, de izquierda a derecha: Los diagramas de las "elipses" obtenidas al componer la excitación en el eje vertical y la respuesta (deformación torsional) en el eje horizontal. Una tabla con una columna para cada ciclo, que muestra, entre otros, los valores calculados $\gamma\%$, G_{max} y $D\%$.

Figura 53

Ventana del ensayo de corte torsional cíclico



Nota. Gráficas de los ciclos y laso de histéresis, además la tabla de los resultados obtenidos.

Elaborado por: Los Autores.

CAPÍTULO V

RECOPIACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Datos iniciales de las probetas

Los datos de altura, diámetro y peso se deben tomar antes de ser montada la probeta en el equipo, con la ayuda del pie de rey y una balanza con precisión del 1%. En la siguiente tabla 5 se encuentran los datos obtenidos.

Tabla 5

Datos de las probetas ensayadas

# Muestra	Tipo de suelo	Estado	H (mm)	D (mm)	P (g)
1	MH	in situ	103.25	49.34	283.15
2	MH	in situ	102.2	51.95	296.28
3	MH	Saturado y confinado	101.17	51.46	284.06
4	MH	Saturado y confinado	101	50.05	293.58
5	Ottawa	Seca	105	50	343.62
6	Ottawa	Seca	105	50	343.62

Nota. MH limo de alta plasticidad en condiciones naturales y saturada, arena de Ottawa en condiciones seca. Elaborado por: Los Autores.

5.2. Limo In situ

Tabla 6

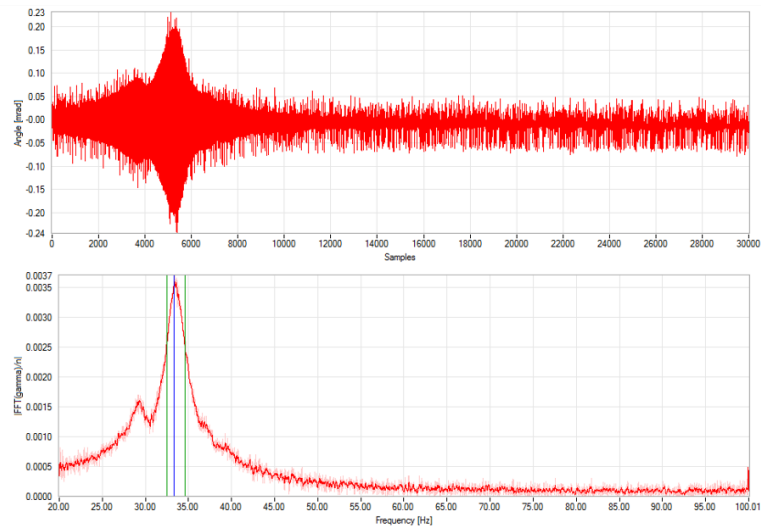
Resultados R.C. Limo in situ

N° de muestra	Resultados						
	F1 (Hz)	Fr (Hz)	F2 (Hz)	G (MPa)	D (%)	γ (%)	Vs (m/s)
1	32.48	33.52	34.68	8.528	3.28	0.0044	78.957
	32.465	33.34	34.55	8.437	3.128	0.004	78.535
	32.599	33.737	34.683	8.644	3.082	0.0028	79.49
	32.71	33.83	34.8	8.697	3.081	0.0034	79.736
2	31.22	32.55	34.313	8.06	4.751	0.0029	76.76
	33.294	34.393	36.21	8.99	4.24	0.0041	81.1
	32.24	33.65	35.14	8.71	3.23	0.0035	77.63
	33.09	33.6	34.56	8.63	3.74	0.0036	72.4

Nota. Resultados obtenidos del ensayo de R.C. Elaborado por: Los Autores.

Figura 54

Grafica del ensayo R.C.



Nota. Grafica del pico de la frecuencia de resonancia. Elaborado por: Los Autores.

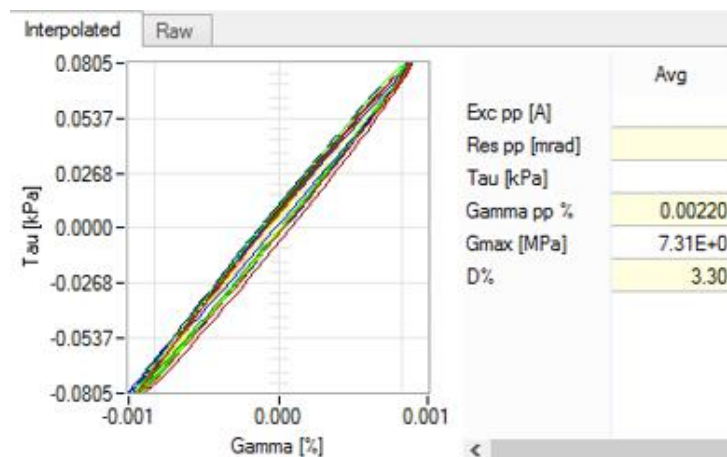
Tabla 7*Resultados del ensayo T.S.*

Frecuencia (Hz)	Amplitud (V)	G (Mpa)	D (%)	Gamma (%)	G/Gmax
1	0.015	7.53	1.79	0.00092	0.88633421
	0.08	7.33	3.11	0.00501	0.8627928
	0.2	7.26	3.1	0.01265	0.8545533
	0.3	7.21	3.24	0.01911	0.84866795
	0.5	7.04	3.64	0.03262	0.82865775
	0.6	6.94	3.69	0.03967	0.81688704
	0.7	6.85	3.82	0.04693	0.8062934
	0.8	6.75	3.95	0.05437	0.7945227
	0.9	6.68	4.08	0.06189	0.7862832
	1	6.58	4.21	0.06976	0.7745125
	1.1	6.47	4.35	0.07802	0.76156472
	1.2	6.36	4.5	0.08657	0.74861694
	1.3	6.25	4.63	0.09556	0.73566916
	1.4	6.13	4.79	0.10484	0.72154432
	1.5	6.07	4.89	0.11356	0.71448189
	1.6	6.04	4.98	0.12	0.71095068
	1.7	5.77	5.26	0.135	0.67916977
	1.8	5.66	5.42	0.1459	0.666222
	1.9	5.55	5.59	0.1572	0.65327422
	2	5.44	5.72	0.1688	0.64032644
	2.1	5.32	5.89	0.1811	0.62620159
	2.2	5.25	5.92	0.19233	0.6179621
	2.3	5.12	6.11	0.20617	0.60266018
	2.4	5	6.29	0.22011	0.58853533
	2.5	4.89	6.46	0.23454	0.57558755
3	4.47	7.35	0.30822	0.52615059	
4	3.47	9.46	0.52961	0.40844352	
5	2.61	11.09	0.88231	0.30721544	

Nota. Resultados obtenidos del ensayo de T.S. Elaborado por: Los Autores.

Tabla 8

Grafica de respuesta Corte torsional cíclico



Nota. Se puede observar la curva de histéresis, que a mayor amplitud tiene mayor deformación. (a) amplitud 2(V). Elaborado por: Los Autores.

5.3. Limo Saturado

Resultado de corte Columna Resonante

Tabla 9

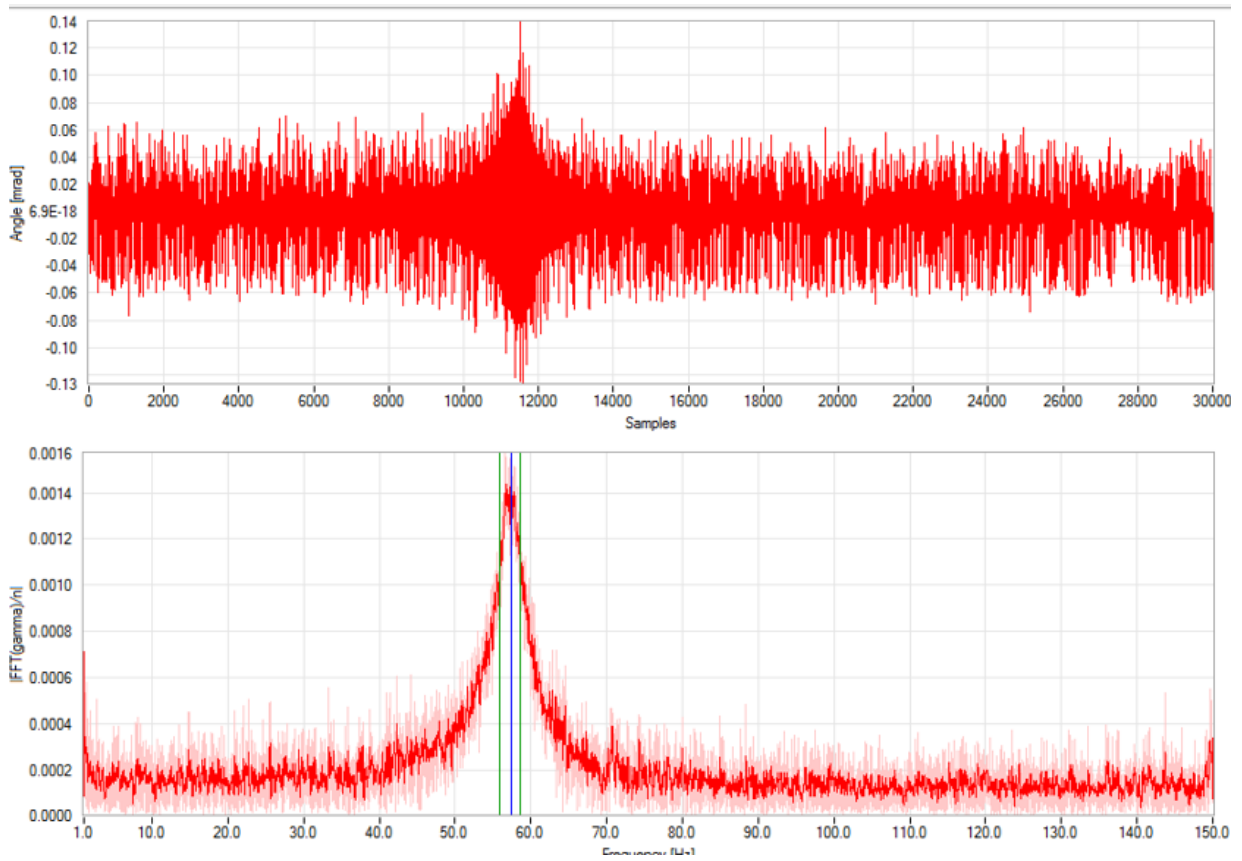
R.C. del suelo MH aturado

N° de muestra	Resultados						
	F1(Hz)	Fr (Hz)	F2(Hz)	G(MPa)	D (%)	γ (%)	Vs (m/s)
3	55.39	56.5	58.6	30.139	2.84	0.0018	144.92
	55.798	57.35	58.67	31.12	2.5	0.0021	147.257
	56.26	57.61	59.15	31.505	2.511	0.0028	148.13
	56.996	58.487	59.789	32.671	2.388	0.0021	150.805
4	55.63	56.5	58.6	30.139	2.75	0.002	145.29
	55.84	57.35	58.67	31.12	2.491	0.0022	148.63
	56.34	57.61	59.15	31.505	2.64	0.0028	145.31
	56.21	58.487	59.789	32.671	2.388	0.0025	149.3

Nota. Resultados R.C. del MH saturado. Elaborado por: Los Autores.

Figura 55

Gráfica de R.C. del suelo MH saturado



Nota. Graficas obtenías del software, se puede apreciar las frecuencias f_1 , f_2 y f_r . Elaborado por: Los Autores.

Resultado de corte torsional Cíclico

Tabla 10

T.S. del suelo MH saturado

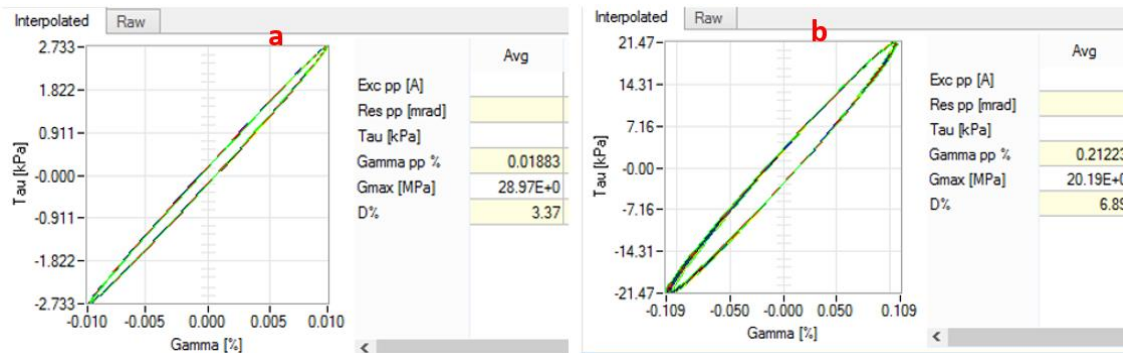
Frecuencia (Hz)	Amplitud (V)	G (Mpa)	D (%)	Gamma (%)	G/Gmax
	0.01	31.2	10	0.00018	0.996486745
	0.02	28.29	5.43	0.00039	0.903545193
	0.04	29.11	2.28	0.00075	0.929734909
	0.06	29.08	4.09	0.00113	0.928776749
	0.08	29.08	3.05	0.0015	0.928776749
	0.1	29.94	2.94	0.00188	0.956244011
	0.2	29.29	2.95	0.00367	0.935483871
	0.4	29.18	3.13	0.00747	0.931970616
	0.6	29.16	3.24	0.01122	0.931331843
	0.8	29.06	3.29	0.01501	0.928137975
	1	28.97	3.37	0.01883	0.925263494
	1.2	28.77	3.43	0.02275	0.918875759
	1.4	28.6	3.47	0.02671	0.913446183
	1.6	28.71	3.6	0.03021	0.916959438
	1.8	28.09	3.71	0.03494	0.897157458
	2	27.83	3.73	0.03919	0.888853401
	2.2	27.63	3.82	0.0443	0.882465666
	2.4	27.4	3.91	0.04779	0.87511977
	2.6	27.15	3.97	0.05226	0.867135101
	2.8	26.9	4.06	0.05681	0.859150431
	3	26.66	4.17	0.06143	0.851485149
	3.2	26.38	4.29	0.06623	0.842542319
	3.4	26.15	4.36	0.07102	0.835196423
	3.6	25.86	4.48	0.0705	0.825934206
	3.8	25.6	4.63	0.0811	0.81763015
	4	25.29	4.73	0.0864	0.80772916
	4.2	24.95	4.87	0.09205	0.79687001
	4.4	24.84	4.95	0.09687	0.793356755
	4.6	24.45	5.08	0.10292	0.780900671
	4.8	24.09	5.23	0.109	0.769402747
	5	23.87	5.32	0.11462	0.762376238
	5.2	23.59	5.44	0.12068	0.753433408
	5.4	23.3	5.54	0.1289	0.744171191
	5.6	23.04	5.66	0.1331	0.735867135
	5.8	22.88	5.75	0.13887	0.730756947
	6	22.63	5.85	0.14525	0.722772277
	6.2	22.31	5.98	0.15233	0.7125519
	6.4	22	6.11	0.159446	0.70265091
	6.6	21.78	6.21	0.16613	0.695624401
	6.8	21.44	6.34	0.17393	0.684765251
	7	21.32	6.39	0.18015	0.680932609
	7.2	20.96	6.54	0.18849	0.669434685
	7.4	20.63	6.69	0.19692	0.658894922
	7.6	20.51	6.75	0.20355	0.65506228
	7.8	20.19	6.89	0.2122	0.644841904
	8	19.79	7.06	0.2221	0.632066432
	8.2	19.69	7.12	0.229	0.628872565
	8.4	19.43	7.25	0.2378	0.620568508
	8.6	19.19	7.36	0.24668	0.612903226
	8.8	18.76	7.53	0.25827	0.599169594

	9	18.33	7.71	0.27036	0.585435963
	9.2	17.96	7.87	0.28213	0.573618652
	9.4	17.63	8.02	0.29375	0.563078889
	9.6	17.28	8.17	0.30623	0.551900351
	9.8	16.93	8.33	0.32929	0.540721814
	10	16.61	8.48	0.33217	0.530501437

Nota. Resultados T.S. del MH saturado. Elaborado por: Los Autores

Figura 56

Gráfica de T.S. con suelo MH saturado



Nota. Se puede observar la curva de histéresis, que a mayor amplitud tiene mayor deformación. (a) amplitud 1(V) y (b) Amplitud de 8 (V) Elaborado por: Los Autores.

5.3.1 Skempton

Para determinar si una muestra de suelo se encuentra saturada se debe realizar la prueba de Skempton la cual tiene como objetivo principal eliminar las burbujas de aire, aplicando presión y contrapresión con un diferencial de 30 kPa entre presiones y se aumenta 50 kPa en un determinado tiempo. Aplicando la siguiente ecuación podemos determinar el porcentaje de saturación.

$$\bar{B} = \frac{\Delta\mu}{\Delta\sigma_3} \quad (7)$$

Donde:

\bar{B} = Coeficiente de Skempton

$\Delta\mu$ = Variación de presión de poro

σ_3 = Variación de esfuerzo efectivo o presión en cámara

Tabla 11

Prueba de Skempton

σ_3 kPa	Contrapresión kPa	μ (kPa)
155.8	110.2	110
203.5	130.8	130.8
	B (%)	0.4360587
203.3	158.1	158.1
250.7	186.5	186.3
	B (%)	0.59493671
250.6	206.1	205.8
299.7	240.1	240.1
	B (%)	0.69857434
299.7	253.8	253.7
351.2	293.6	293.4
	B (%)	0.77087379
351.6	304.6	304.7
402	347.1	346.4
	B (%)	0.82738095
402.8	358.8	358.6
453.6	402.6	402.5
	B (%)	0.86417323
453.7	410.2	410.1
504	455.3	455
	B (%)	0.95

Nota. Pruebas de Skempton para comprobar el nivel de saturación. Elaborado por: Los Autores.

5.4. Arena de Ottawa seca

Tabla 12

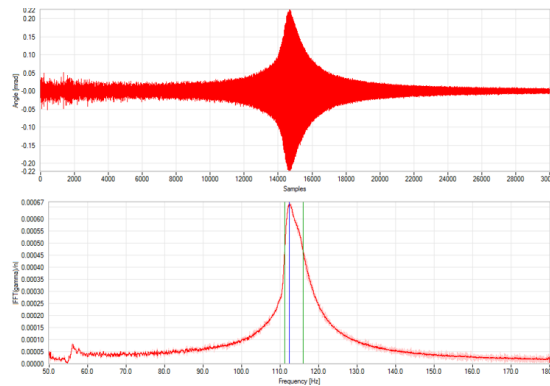
Resultados de R.C. de la arena de Ottawa

N° de muestra	Resultados						
	F1(Hz)	Fr (Hz)	F2(Hz)	G(MPa)	D (%)	D (%)	Vs (m/s)
5	115.17	116.05	117.06	122.75	0.81	0.0013	271.64
	114.89	116.16	117.313	122.98	1.04	0.001	271.31
	113.9	114.975	116.765	120.498	1.25	0.0017	268.89
	112.91	114.082	116.81	118.634	1.71	0.0022	266.799
6	111.43	112.69	116.044	119.45	0.99	0.0019	273.54
	113.62	115.02	116.65	120.31	1.09	0.0015	271.85
	115.62	116.32	117.25	121.63	1.25	0.0016	268.56
	115.63	116.87	117.63	122.63	1.36	0.0022	269.96

Nota. Resultados de R.C de la arena Ottawa. Elaborado por: Los Autores.

Figura 57

Gráfica R.C. Arena de Ottawa seca



Nota. Gráfica de respuesta ensayo de Columna resonante de Arena de Ottawa seca. Elaborado por: Los Autores.

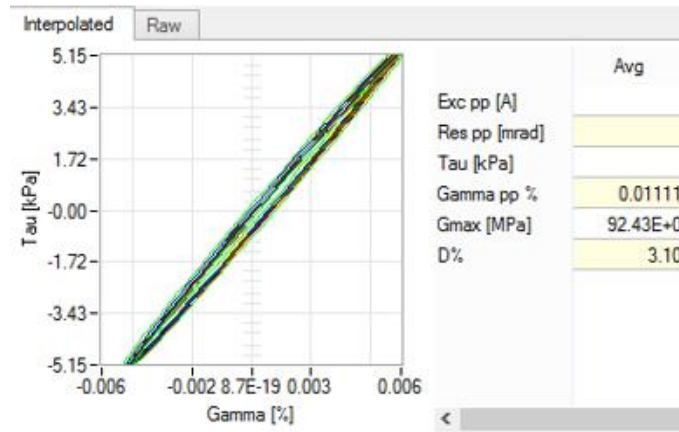
Tabla 13*T.S. de la arena Ottawa*

Frecuencia (Hz)	Amplitud (V)	G (Mpa)	D(%)	D (%)	G/Gmax
1	0.04	115	4.72	0.00018	0.936958957
	0.06	111.16	1.48	0.00028	0.905672675
	0.08	107.8	1.94	0.00038	0.878297179
	0.1	106.5	2.52	0.00045	0.867705469
	0.15	105.69	2.28	0.00073	0.861106019
	0.4	104.51	1.47	0.00197	0.851492005
	0.6	104.39	1.69	0.00296	0.850514309
	0.8	103.67	1.56	0.00397	0.844648131
	1	102.94	1.56	0.00499	0.838700479
	1.2	101.61	1.76	0.00607	0.827864345
	1.4	100.15	1.65	0.00719	0.81596904
	1.8	98.47	1.93	0.00939	0.802281291
	2	97.56	2.47	0.01053	0.794867094
	2.4	95.26	3.48	0.01294	0.776127915
	2.8	93.29	4.38	0.01541	0.760077401
	3	92.84	4.3	0.0166	0.75641104
	3.4	88.72	5.91	0.022	0.722843467
	4.5	86.98	6.43	0.02657	0.70866687
	5	84.75	7.35	0.03	0.690498014
	5.5	83.17	7.94	0.034	0.677625013
6	81.68	8.43	0.038	0.665485284	
6.5	80.54	8.85	0.041	0.656197169	
7	79.29	9.31	0.04534	0.646012832	
7.5	78.06	9.67	0.049	0.635991445	
8	76.97	10	0.05338	0.627110704	
9	70.72	13.11	0.065	0.576189021	
10	64.36	15.83	0.07989	0.524371117	

Nota. Resultados de T.S de Arena de Ottawa seca. Elaborado por: Los Autores.

Figura 58

Grafica T.S. de la arena Ottawa



Nota. Se puede observar el laso de histéresis. Elaborado por: Los Autores.

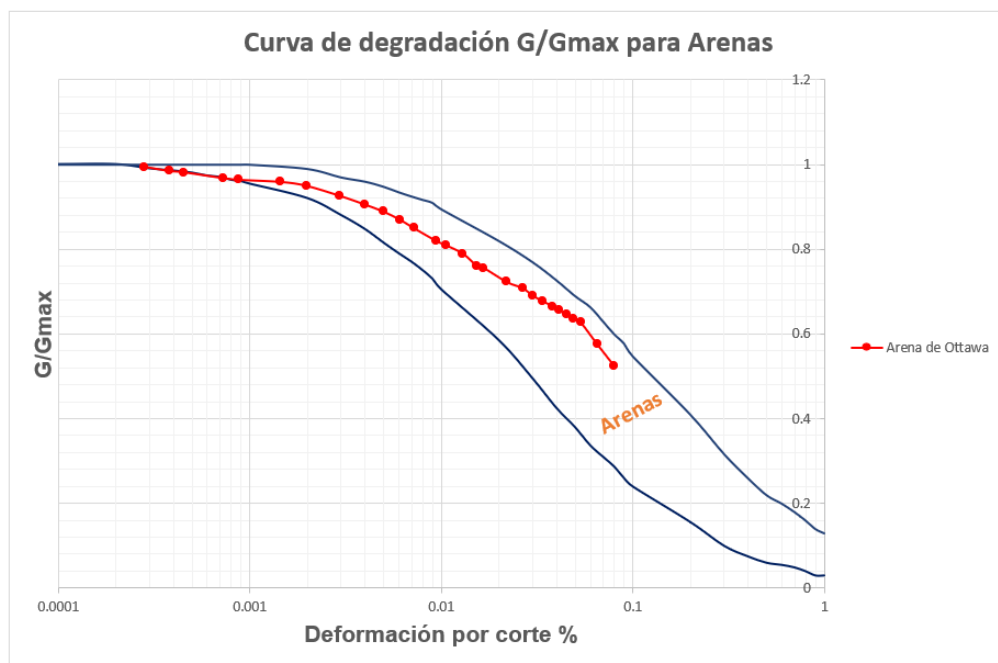
CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el siguiente capítulo se compara las gráficas de las curvas de degradación realizadas en investigaciones previas, con nuestra curva de degradación obtenidas con los datos de los ensayos realizados. También se puede corroborar que los datos obtenidos en el ensayo son los correctos ya que estas se encuentran en los límites establecidos para cada tipo de suelo. Observar las siguientes graficas 59, 60, 61, 62 en la cual se representa cada tipo de suelo y condición a la cual se ensayó las probetas.

Figura 59

Curva G/Gmax sobrepuesta de arena de Ottawa



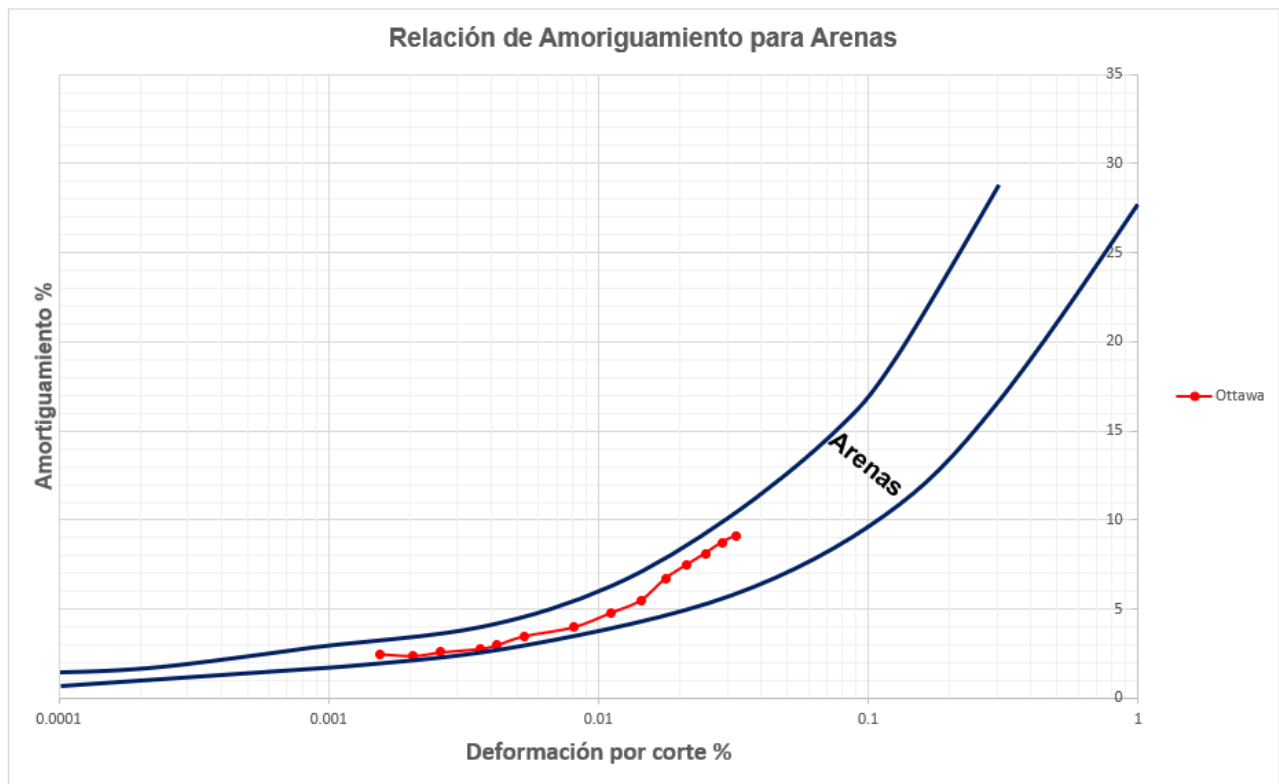
Nota. Se puede observar que la curva de arena de Ottawa en estado seco se encuentra en el rango de arenas, según las curvas teóricas de Seed, Wong, Idriss, & Tokimatsu, 1986.

Elaborado por: Los Autores

Curva de amortiguamiento sobrepuesta, de arena de Ottawa

Figura 60

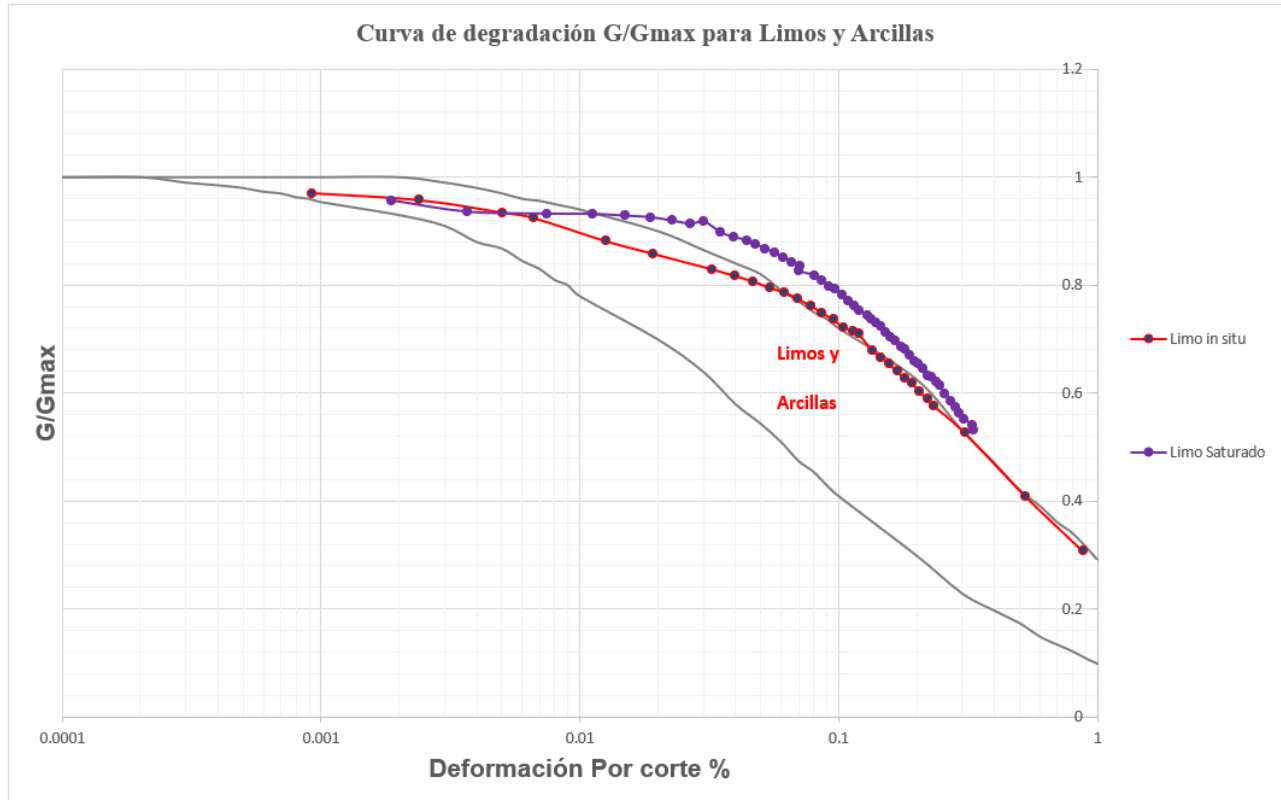
Curva de amortiguamiento sobrepuesta, de arena de Ottawa



Nota. Se puede observar que la curva de arena de Ottawa en estado seco se encuentra en el rango de Amortiguamiento de arenas, según las curvas teóricas de Seed, Wong, Idriss, & Tokimatsu, 1986. Elaborado por: Los Autores

Figura 61

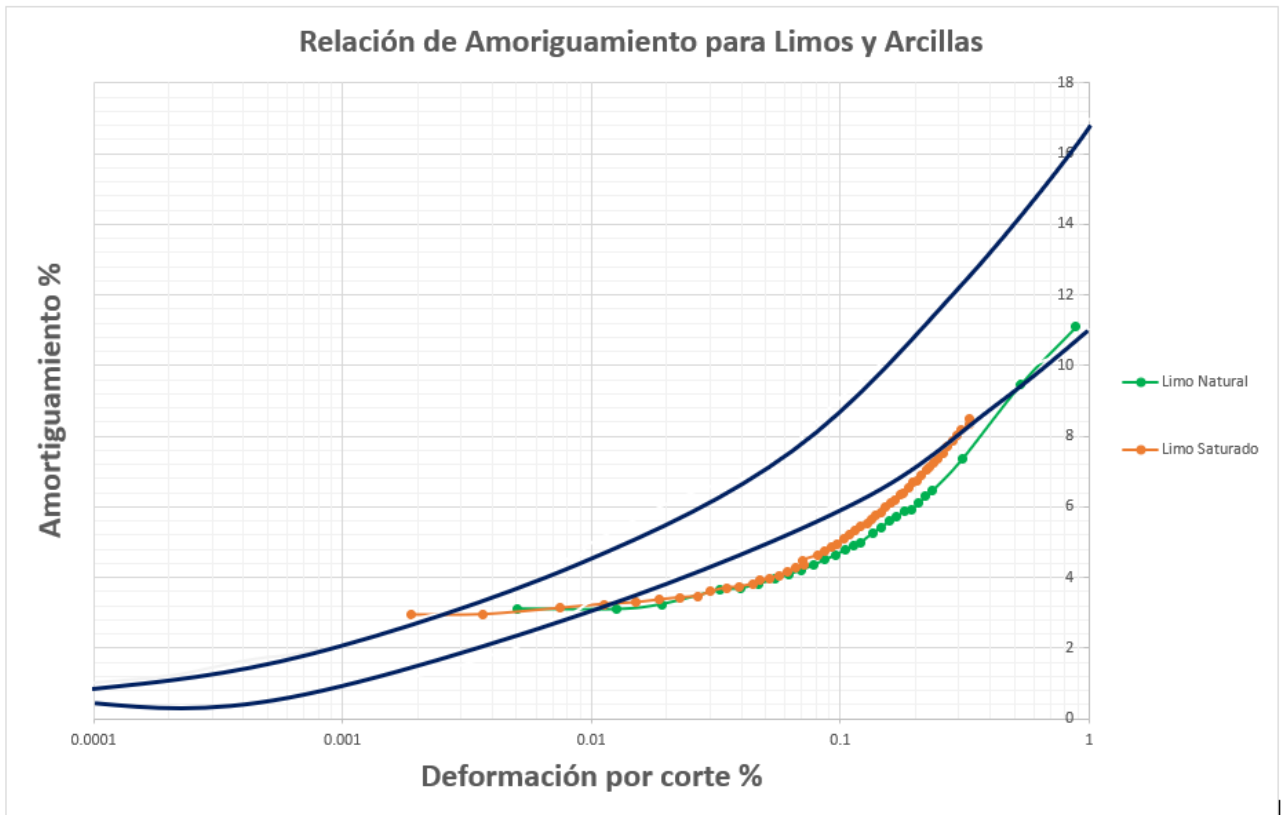
Curva G/Gmax sobrepuesta de MH en estado natural y saturado



Nota. Se puede observar que la curva de MH en estado natural y saturado se encuentra en el rango de arcillas y limos, según las curvas teóricas de Seed, Wong, Idriss, & Tokimatsu, 1986. Elaborado por: Los Autores

Figura 62

Curva de amortiguamiento sobrepuesta, MH en estado natural y saturado



Nota. Se puede observar que la curva de limos en estado natural y saturado, se encuentra en el rango de Amortiguamiento de arcillas y limos, según las curvas teóricas de Seed, Wong, Idriss, & Tokimatsu, 1986. Elaborado por: Los Autores

CONCLUSIONES

Las propiedades dinámicas que calcula el equipo estudiado brindan información valiosa para la interpretación del comportamiento del suelo ante cargas sísmicas o cíclicas, las cuales ayudaran en el desarrollo de proyectos y nuevas investigaciones en el campo de Ingeniería Geotécnica.

Mediante una investigación en fuentes bibliografías expuestas en el Capítulo I de este trabajo, se puede tener información importante sobre los parámetros dinámicos como son el módulo de corte, amortiguamiento y deformación por corte. Además de los fundamentos teóricos del funcionamiento del equipo.

Mediante el presente manual se explica de manera detallada, el proceso adecuado para realizar los ensayos de columna resonante y corte torsional cíclico. Desde la preparación de muestras alteradas e inalteradas, montaje de probetas, calibración, ejecución de los ensayos e interpretación de resultados.

La confiabilidad de los resultados que proporciona el equipo fue comprobada con el kit de calibración de acero inoxidable cuyo valor teórico de G es 70000MPa y su D tiende a 0 . Los resultados al realizar los ensayos fueron $G=72201\text{Mpa}$ y $D=0.18\%$, según el fabricante son valores aceptables.

Se ensayó 2 probetas de limo de alta plasticidad (MH) en condiciones naturales saturada. Obteniendo los siguiente resultados $G=8.495\text{ MPa}$, $D=4.04\%$, $\gamma=0.0021\%$ $G_{\text{sat}}=31.31\text{ MPa}$, $D_{\text{sat}}=2.577\%$, y $\gamma_{\text{sat}}=0.00198\%$. Estos valores varían debido a que la muestra al momento de ser drenada se logra consolidar, lo cual hace que la muestra aumente en cada parámetro dinámico.

Para el ensayo de muestras reconstituidas se utilizó arena de Ottawa, aplicando el método de compactación estática y se obtuvo los siguientes resultados $G=122.7375\text{MPa}$, $D=0.944\%$ y $\gamma=0.001335\%$

En el ensayo de corte torsional cíclico (T.S), se inicia con una amplitud pequeña (0.01V), para determinar el G_{\max} . A medida que se incrementa la amplitud, deformación por corte y amortiguamiento aumentan su valor.

La curva de G/ G_{\max} vs Deformación por corte (γ) que se obtuvieron con los datos de los ensayos R.C y T.S, fueron similares a las gráficas obtenidas por diferentes autores en investigaciones anteriores.

RECOMENDACIONES

Comprobar que la base del equipo este nivelado en los ejes x, y, para no tener alteraciones en los resultados.

Al momento de colocar la membrana en el espécimen de suelo, esta debe manipularse con cuidado, debido a que cualquier orificio en ella invalida el ensayo.

Verificar que los magnetos se encuentren a la mitad de las bobinas.

Las muestras deben ser totalmente cilíndricas, y sus bases debes ser perpendiculares a la altura para que estas se asienten de forma correcta en el pedestal y cabezal móvil.

REFERENCIAS

- Alva Hurtado, J. E. (2002). *Dinámica de suelos*. Universidad Nacional de Ingeniería facultad de ingeniería civil sección post grado primera edición.
- ASTM International. (s.f.). ASTM D3999/D3999M – 11. Standard Test Methods for the *Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus*.
- Braja M. Das, G. R. (2011). *Principles of Soil Dynamics*. Stamford: Cengage Learning
- Cepeda Gómez, D, I, y Arenas López, L, B. (2010). *Caracterización dinámica de suelos; estado del arte e implementación del laboratorio* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Archivo digital. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/133501.pdf>
- Curd, J.M. (2013). *Unsaturated Soil Parameters From Field Stiffness Measurements*. Theses and Dissertations. Civil Engineering. Kentucky University. Archivo Digital. https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1013&context=ce_etds
- Díaz, A. (19 de Julio de 2018). *Caracterización Dinámica de los Suelos - Ensayos de Campo y Laboratorio. Curso de actualización en ingeniería sísmica y dinámica de suelos*. Tunja, Colombia: UPTC.
- Díaz, A. (2005). *Dinámica de suelos*. México D.F.: Limusa.
- Farance, W. (2013). Soil Mechanics Testing Systems. Italia, Controls S.R.L.
- Farrance, W. (s.f). *PPT Resonant Column last version*. Masters of Technology Controls.
- González, H. (2019). *Comparación del comportamiento esfuerzo-deformación en ensayos triaxiales tipo UU de muestras de residuos mineros (jales) inalteradas y reconstituidas*. Tesis de especialidad. Universidad Nacional Autónoma de México-UNAM. Ciudad de México, México.

- Gordillo, G, N. (2011). *Aplicación de la dinámica de suelo*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Profesional Adolfo López Mateos]. Archivo Digital.
<https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/12814/1/Tesis%20final-Nestor%20Octavio%20Gordillo%20Gordillo.pdf>
- Hernández, S, R. (2014). *Metodología de la investigación*. Mcgraw-hill/interamericana editores, S. A. de C. V.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Muñoz Beltrán, A, J. (2017). *Manual de laboratorio para determinar parámetros dinámicos en suelos, con el uso de los equipos. triaxial cíclico, columna resonante y elementos piezométricos bender* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador].
Archivo digital
<http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/14000/PROYECTO%20DE%20TITULO%20LACI%20C3%93N%20ANDR%20C3%89S%20MU%20C3%91OZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Núñez, E. (2010). Resistencia no drenada y licuación en arenas. XX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.
- Puma, M. A y Rincon, P. E. (2015). *Evaluación del potencial de licuación del material de relave en la presa zona norte en la mina cobriza – Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. URP.
<https://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2217>
- Santibañez, D. (2006). *Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.

ANEXOS

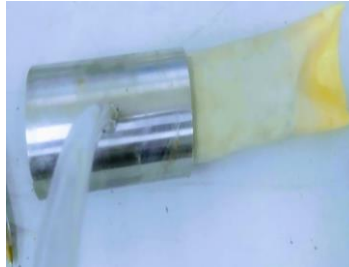
Procedimiento del montaje de muestras inalteradas

Paso 1



Medir y pesar la probeta

Paso 2



Colocar la membrana en el cilindro dilatador y succión

Paso 3



Colocar la muestra en el interior de la membrana

Paso 4



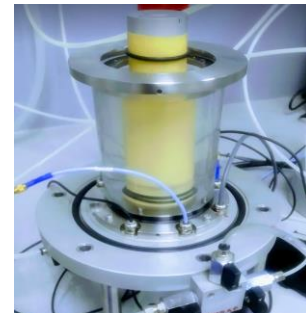
Colocar la muestra en el pedestal

Paso 5



Asegurar la muestra con 2 O'rings en cada extremo

Paso 6



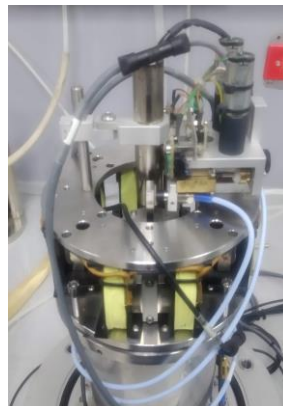
Colocar celda int. Y llenarla de con agua des aireada.

Paso 7



Colocar y sujetar los magnetos

Paso 8



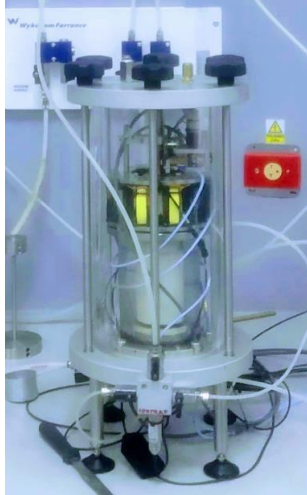
Colocar los traductores

Paso 9



Unir cada cable con su respectivo terminal

Paso 10



Colocar celda exterior, tapa y asegurar con las columnas de acero inoxidable

Ensayos de granulometría y límites de Atterberg



Granulometría por lavado y tamizado.



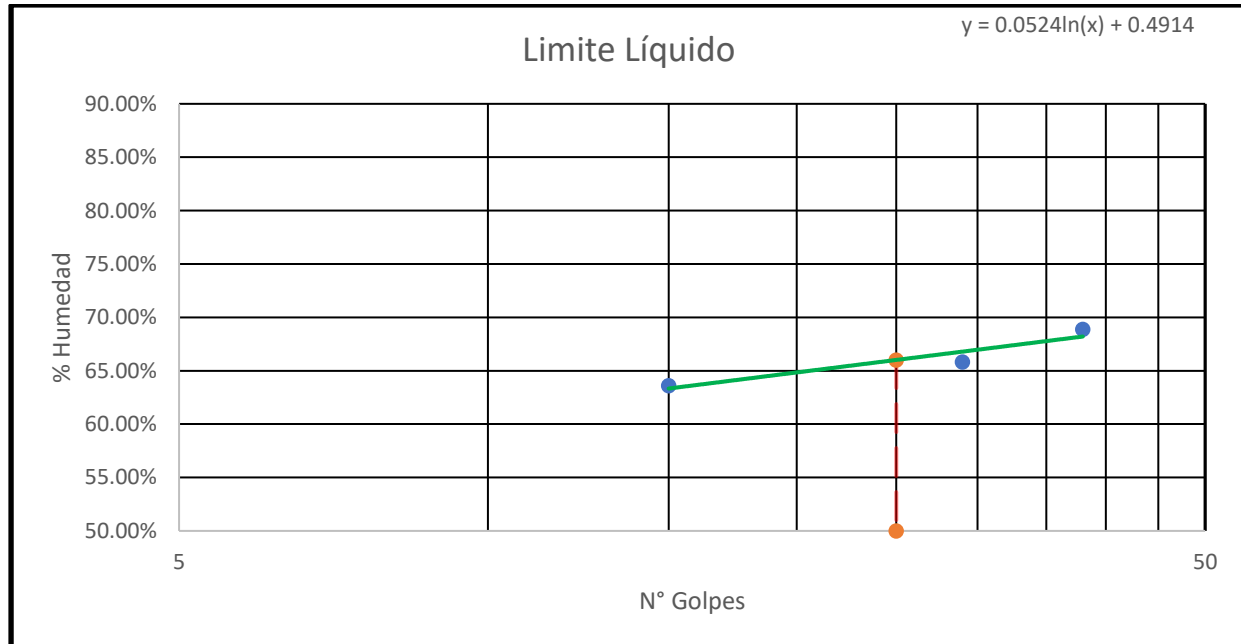
Muestras de limo para LL Y LP



Copa de casa grande

Resultados.

Limite Líquido					
N° Golpes	Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + Masa Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa seca (g)	% Humedad
38	15M	24.39	30.2	27.83	68.90%
29	10M	21.17	32.91	28.25	65.82%
15	15M	21.58	29.63	26.5	63.62%

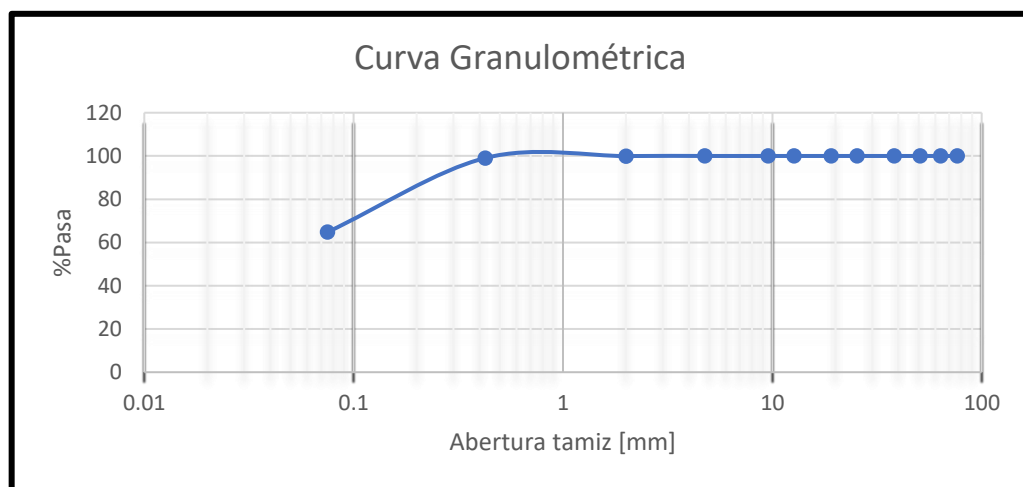


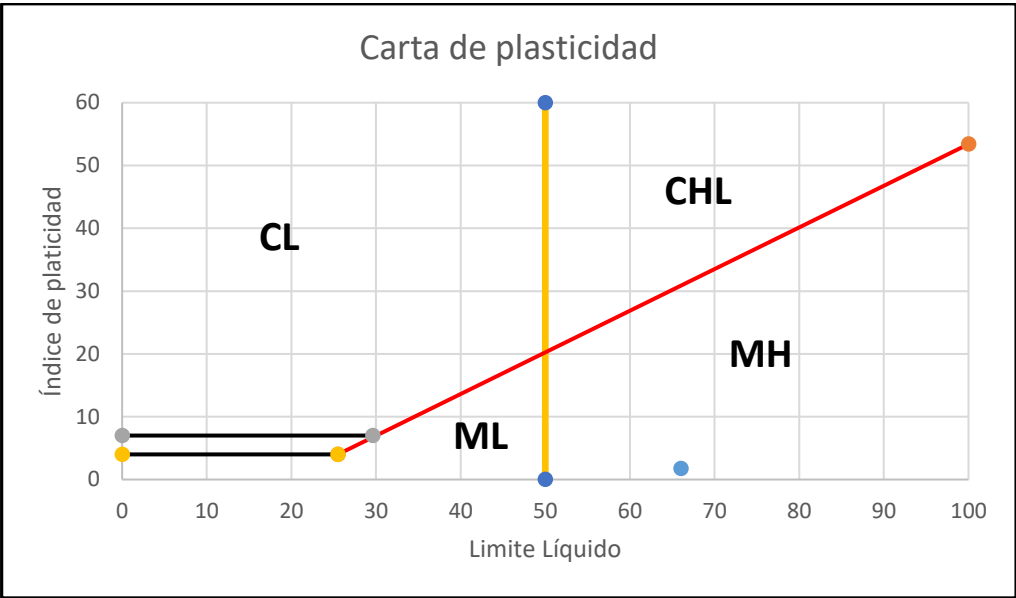
Limite Plástico					
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + Masa Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa sea (g)	% Humedad	Límite Plástico
29M	24.93	27.05	26.22	64.34%	64.23%
9M	25.96	28.11	27.27	64.12%	

LP	64.23
LL	66.01
IP	1.78

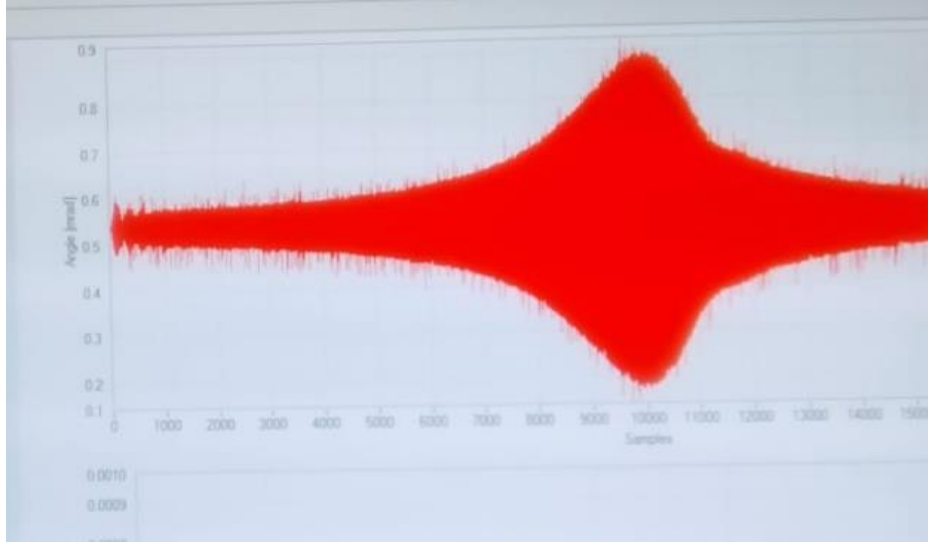
Tamizaje

Tamiz	Abertura tamiz [mm]	Peso Retenido Acumulado [gr]	Peso retenido Parcial [gr]	%Retenido	%Pasa
N° 4	4.75	0.81	0.81	2.96	97.04
N° 10	2	1.68	0.87	3.18	96.82
N° 40	0.425	4.85	3.98	14.53	82.30
N° 200	0.075	7.8	3.82	13.94	68.36
Base		19.60	15.78	57.59	10.77
	Masa de muestra seca	27.40		100.00	





Resultados de ensayo a kit de calibración Acero inoxidable.



Resonant Column v4.81.0.0 [1924]
Resonant Column

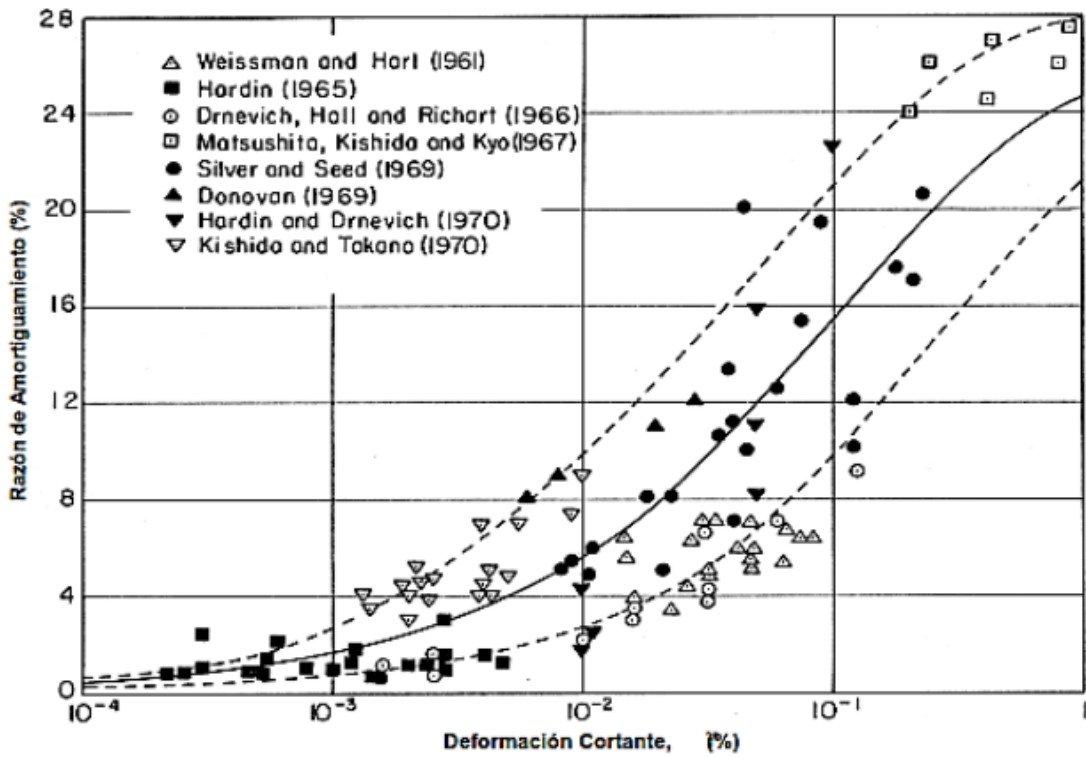
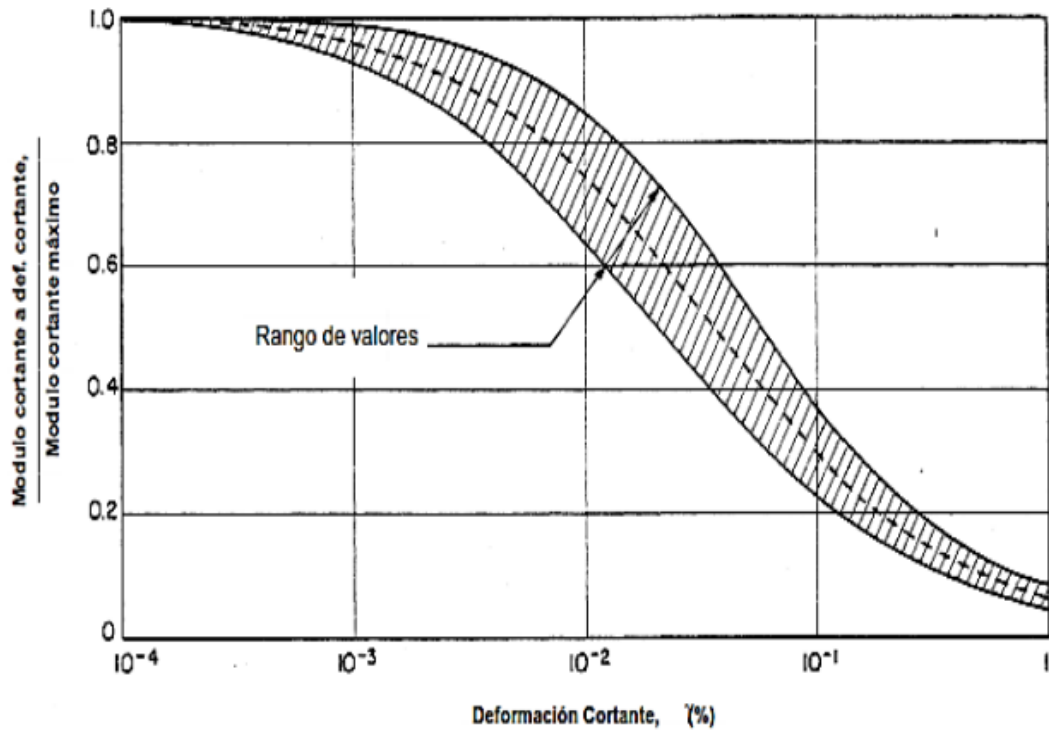
Date 03/06/2022
Time 11:05:35

Specimen actual data
Diameter 8.00 mm
Height 170.00 mm
Weight 89.40 g

RC Parameters
Start Frequency 50.0 Hz
End Frequency 60.0 Hz
Duration 30 s
Amplitude 0.01000 V

RC Results
F1 56.35 Hz
Fres 57.40 Hz
F2 59.12 Hz
Gamma_{sa} 0.0002 %
Dhp 0.1821 %
G 72201.76896 MPa

Curvas teóricas de degradación G/G_{max} para arenas según Vucetc y Dobri, 1991)



Curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento respecto al tipo de suelo
(Seed, Wong, Idriss, & Tokimatsu, 1986)

