



Guía de laboratorio del ensayo de columna resonante utilizando el equipo TSH-100 de la Universidad Santo Tomás

Carlos Andrés Candela Roza, Hernán David Clevel Noriega

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Director: Carlos Eduardo Torres Romero, Ingeniero civil, MIG

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Civil
Bogotá D.C., Colombia
2020

Agradecimientos

Los autores expresan su más sincero agradecimiento al ingeniero Carlos Eduardo Torres, director de este proyecto de grado, quien con sus conocimientos y continuo apoyo nos guió durante el desarrollo de las diferentes etapas de este proyecto. Su aporte de resultados y registro fotográfico contribuyó enormemente en el desarrollo y continuidad de este proyecto de grado, frente al cierre de los laboratorios por la emergencia sanitaria ocasionada por el COVID-19.

A Andrés David López Vargas, por plantearnos la idea de usar el software SolidWorks para la elaboración de las piezas y la ilustración del montaje y desmonte del equipo, así como también por sus consejos y guía en manejo del software.

Al laboratorista de la facultad de ingeniería civil Oscar Andrés Murillo Páez, por sus consejos en el desmonte y montaje del equipo TSH-100 y en la realización del ensayo de columna resonante.

Resumen

En este trabajo se elaboró una guía de laboratorio para la realización del ensayo de columna resonante usando el equipo TSH-100 dispuesto en el laboratorio de mecánica de suelos de la universidad Santo Tomás, mediante este ensayo, es posible medir algunas propiedades dinámicas de los suelos a deformaciones unitarias bajas, tales como el módulo de corte (G) y el amortiguamiento (D). Se presentan generalidades de la teoría de dinámica de suelos y del ensayo de columna resonante como introducción para investigadores que deseen incursionar en este tema.

Como introducción al ensayo de columna resonante se presentan generalidades de la normativa ASTM D4015-15 la cual abarca métodos de ensayo para la determinación del módulo de corte (G) y amortiguamiento por corte (D) usando dispositivos de columna resonante, se presentan características de los equipos, las muestras y las configuraciones a usar durante el ensayo.

Se presenta y se describe el equipo TSH-100, disponible en el laboratorio de mecánica de suelos de la universidad Santo Tomás para la realización del ensayo de columna resonante, empezando con una descripción detallada de sus partes y conectores, y continuando con explicaciones detalladas e ilustrativas de su uso. Para esto se hizo énfasis en el proceso metodológico de la realización del ensayo, dividiéndolo en los procesos de desmonte del equipo, recuperación de una muestra, montaje de una muestra, montaje del equipo y obtención de datos. En cada proceso se describió de forma detallada e ilustrativa el procedimiento a seguir.

Se describió el procedimiento a seguir para la calibración del equipo, así como también la teoría necesaria para entender el proceso de calibración. Finalmente, se presentan como anexos, un registro fotográfico del montaje de una muestra y montaje del equipo, un inventario del equipo, sus componentes y repuestos disponibles, además, un formato para el registro de datos antes, durante y después del ensayo de columna resonante, como también una bitácora para el control del uso del equipo.

Palabras clave: Guía de laboratorio, columna resonante, módulo de corte, amortiguamiento, velocidad de onda, equipo TSH-100.

Contenido

Pág.

1. Introducción.....	10
2. Conceptos fundamentales	12
2.1. Ondas sísmicas	12
2.1.1. Ondas P (Primary)	13
2.1.2. Ondas S (Secondary)	13
2.1.3. Ondas R (Rayleigh)	14
2.1.4. Ondas L (Love).....	14
2.2. Amortiguamiento.....	15
2.3. Amplitud.....	16
2.4. Periodo.....	16
2.5. Frecuencia.....	16
2.6. Carga dinámica	17
2.7. Rigidez.....	17
2.8. Módulo de corte.....	18
2.9. Grados de libertad.....	19
2.10. Modo de vibración.....	19
3. Ensayo de columna resonante: Generalidades	20
3.1. ¿Qué es el ensayo de columna resonante?	20
3.2. ¿Por qué es importante el ensayo de columna resonante?	21
3.3. Normatividad	21
3.3.1. Características de los equipos	22
3.3.2. Características de la muestra	23
3.3.3. Configuración del ensayo	24
4. Equipo para el ensayo de columna resonante.....	26
4.1. Partes del equipo TSH-100.....	28
4.2. Conectores del equipo TSH-100.....	35
4.2.1. Conectores interiores	35
4.2.2. Conectores exteriores	39
5. Desmonte del equipo TSH-100	41
5.1. Recuperación de una muestra	53
6. Montaje del equipo TSH-100.....	57

6.1.	Montaje de una muestra en equipo TSH-100	57
6.1.1.	Accesorios necesarios	57
6.1.2.	Procedimiento para montaje de una muestra	59
6.2.	Posterior al montaje de la muestra	70
7.	Procedimiento experimental en el equipo TSH-100	79
7.1.	Procedimiento en software CATS de GCTS	79
8.	Resultados del ensayo de columna resonante en el equipo TSH-100	95
9.	Calibración de sistema del equipo TSH-100	98
10.	Bibliografía	107
11.	Anexos	110

Lista de ilustraciones

	<u>Pág.</u>
Ilustración 2.1: Ondas sísmicas.	13
Ilustración 2.2: Efectos mecánicos de ondas sísmicas.	15
Ilustración 2.3: Curva esfuerzo – deformación de un ensayo cíclico.	16
Ilustración 2.4: Representación gráfica de amplitud, periodo y frecuencia.	17
Ilustración 2.5: Módulos de corte.	18
Ilustración 3.1: Ensayo de columna resonante	20
Ilustración 3.2: Ensayo convencional de columna resonante: a) Torque aplicado; b) Rotación medida en el disco activo; c) Figura de Lissajous.	25
Ilustración 3.3: Figuras de Lissajous de un sistema de columna resonante en resonancia: a) desplazamiento; b) velocidad; c) aceleración.	25
Ilustración 4.1: Equipo TSH-100/200	27
Ilustración 4.2: Esquema del sistema Fixed-Free usado en el equipo TSH-100.	27
Ilustración 4.3: Partes del equipo TSH-100	28
Ilustración 4.4: Conectores interiores de cubierta de conexiones.	36
Ilustración 4.5: Conectores del motor a la cubierta de conexiones.	37
Ilustración 4.6: Conectores del motor a la cubierta de conexiones.	37
Ilustración 4.7: Conector de sensor LVDT.	38
Ilustración 4.8: Conectores exteriores de la cubierta de conexiones.	39
Ilustración 4.9: Montaje completo del equipo TSH-100.	40
Ilustración 5.1: Orden de apagado de fuente de alimentación.	41
Ilustración 5.2: Desmonte de equipo TSH-100 paso 3.	42
Ilustración 5.3: Desmonte de equipo TSH-100 paso 4.	43
Ilustración 5.4: Desmonte de equipo TSH-100 paso 5.	44
Ilustración 5.5: Desmonte de equipo TSH-100 paso 7.	45
Ilustración 5.6: Desmonte de equipo TSH-100 paso 8.	46
Ilustración 5.7: Desmonte de equipo TSH-100 paso 9.	47

Ilustración 5.8: Desmonte de equipo TSH-100 paso 10.....	48
Ilustración 5.9: Desmonte de equipo TSH-100 paso 11 (Muestras no recuperables)...	49
Ilustración 5.10: Desmonte de equipo TSH-100 paso 11 (Barra de calibración).....	50
Ilustración 5.11: Desmonte de equipo TSH-100 paso 12.....	50
Ilustración 5.12: Recuperación de una muestra paso 1.	53
Ilustración 5.13: Recuperación de una muestra paso 2.	54
Ilustración 5.14: Recuperación de una muestra paso 3.	54
Ilustración 5.15: Recuperación de una muestra paso 4.	55
Ilustración 6.1: Procedimiento para montaje de muestra paso 1.....	60
Ilustración 6.2: Procedimiento para montaje de muestra paso 2.....	61
Ilustración 6.3: Procedimiento para montaje de muestra paso 3.....	62
Ilustración 6.4: Procedimiento para montaje de muestra paso 4.....	63
Ilustración 6.5: Procedimiento para montaje de muestra paso 5.....	64
Ilustración 6.6: Procedimiento para montaje de muestra paso 6.....	64
Ilustración 6.7: Procedimiento para montaje de muestra paso 7.....	65
Ilustración 6.8: Procedimiento para montaje de muestra paso 8.....	66
Ilustración 6.9: Procedimiento para montaje de muestra paso 9.....	67
Ilustración 6.10: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 1.....	70
Ilustración 6.11: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 2.....	71
Ilustración 6.12: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 3.....	72
Ilustración 6.13: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 4.....	73
Ilustración 6.14: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 4 (Montaje del sensor de proximidad).....	74
Ilustración 6.15: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 6.....	75
Ilustración 6.16: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 7.....	76
Ilustración 7.1: A) Ícono del software CATS Standard; B) Estado del sistema en software CATS de GCTS.....	80
Ilustración 7.2: Ventana de proyectos.	81
Ilustración 7.3: Ventana de muestra.....	82

Ilustración 7.4: Ventana de espécimen.	83
Ilustración 7.5: Ventana de configuración de prueba.	86
Ilustración 7.6: Ventana de edición de configuración de pruebas.	87
Ilustración 7.7: Ventana de ejecución del ensayo de columna resonante.	89
Ilustración 7.8: Ventana de ejecución durante el ensayo.	90
Ilustración 7.9: Ventana de finalización del ensayo.	91
Ilustración 7.10: Ventana de determinación de amortiguamiento A.	92
Ilustración 7.11: Ventana de determinación de amortiguamiento B.	93
Ilustración 7.12: Ventana de selección de gráficos.	93
Ilustración 7.13: Ventana de exportación de archivos.	94
Ilustración 8.1: Resultados en archivo .txt.	96
Ilustración 8.2: Presión de confinamiento vs. Módulo de corte.	97
Ilustración 9.1: Esquema de la barra de calibración y sus partes.	99
Ilustración 9.2: Esquema de masa agregada.	99
Ilustración 9.3: Barra de calibración y masa agregada.	100
Ilustración 9.4: Montajes para calibración: A) Montaje con barra de calibración; B) Montaje con barra de calibración + Masa agregada.	101
Ilustración 9.5: Geometría de la barra de calibración (dimensiones en mm).	103
Ilustración 9.6: Geometría de la masa agregada (dimensiones en mm).	103

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 4.1: Partes del equipo TSH 100.	29
Tabla 4.2: Convenciones conectores interiores de cubierta de conexiones.	36
Tabla 4.3: Convenciones conectores de motor.	37
Tabla 4.4: Convenciones conectores del sensor LVDT.	38
Tabla 4.5: Convenciones conectores exteriores de cubierta de conexiones.	39
Tabla 7.1: Discos activos disponibles por defecto en el software CATS.	84
Tabla 8.1: Características del espécimen de ensayo.	95
Tabla 8.2: Módulos de corte obtenidos mediante ensayo de columna resonante en equipo TSH-100.	97
Tabla 9.1: Volumen y masa de las partes del espécimen de calibración.	104
Tabla 9.2: Volumen y masa de la masa agregada.	105

Lista de diagramas

	<u>Pág.</u>
Diagrama 1:Desmonte del equipo TSH-100	52
Diagrama 2:Recuperación de una muestra.	56
Diagrama 3:Montaje de una muestra en el equipo TSH-100.	69
Diagrama 4:Montaje del equipo TSH-100.	78

1. Introducción

La dinámica de suelos es una rama de la ingeniería geotécnica que estudia el comportamiento de los suelos ante cargas cíclicas, comprenderla resulta fundamental para entender el comportamiento del suelo ante eventos sísmicos, vibraciones ocasionadas por maquinaria, el hincado de pilotes, cargas de tráfico, etc. En el presente trabajo se estudió el ensayo de columna resonante, uno de los ensayos comúnmente utilizados para la determinación de propiedades dinámicas del suelo a bajas deformaciones (módulo de corte G y amortiguamiento D), este ensayo se caracteriza por aplicar una excitación torsional sobre una muestra de suelo en un rango de frecuencias determinadas y medir la amplitud de deformación por corte para cada frecuencia ensayada, hasta encontrar la frecuencia para la cual dicha deformación se maximiza. Existen diferentes configuraciones del equipo para el ensayo de columna resonante, cada una mezcla dispositivos con tecnologías de diversos tipos, sin embargo, todas las configuraciones buscan el mismo objetivo. En la universidad Santo Tomás se cuenta con el equipo TSH-100, el cual combina la configuración para los ensayos de columna resonante y corte torsional en un mismo dispositivo, usando un software incluido con el equipo que permite la ejecución automática de dichos ensayos, además el equipo cuenta con dispositivos para la medición de deformaciones angulares y axiales.

El objetivo principal de este trabajo es elaborar una guía para la realización del ensayo de columna resonante utilizando el equipo TSH-100, describiendo de manera detallada e ilustrativa los procedimientos necesarios para el desmonte del equipo, recuperación de una muestra, montaje de una muestra, montaje del equipo, ejecución del ensayo y calibración del equipo.

Para alcanzar los objetivos, se realizó una revisión teórica de los conceptos necesarios para el estudio de las propiedades dinámicas del suelo obtenidas mediante el ensayo de columna resonante. Se identificó el estado del equipo TSH-100, sus componentes, accesorios auxiliares y repuestos, y se realizó un inventario de todos estos el cual se presenta en los anexos de este documento. Posteriormente se realizó un arduo estudio del manual del equipo, documentos técnicos, bibliografía pertinente, normativa y artículos especializados para fortalecer el conocimiento en el procedimiento a seguir para el desarrollo del ensayo. Se realizaron ensayos en repetidas ocasiones con el objetivo de mecanizar su proceso de ejecución y reunir experiencias que permitieran tener un mejor criterio durante la elaboración de la guía.

Finalmente se elaboró una guía metodológica para la realización del ensayo de columna resonante, incluyendo aspectos técnicos, teóricos, prácticos y de experiencia personal, divididos en procedimientos con el orden sugerido para la realización del ensayo, incluyendo ilustraciones del paso a paso a seguir. También se incluyó registro fotográfico del procedimiento para el montaje de una muestra y montaje del equipo, así como también formatos para el registro de datos en el ensayo y bitácora para la utilización del equipo.

A pesar de que el equipo TSH-100 permite la realización del ensayo de corte torsional, este trabajo se limita al estudio y presentación del ensayo de columna resonante, obteniendo como resultado la guía para la realización del ensayo de columna resonante, utilizando el equipo de referencia.

2. Conceptos fundamentales

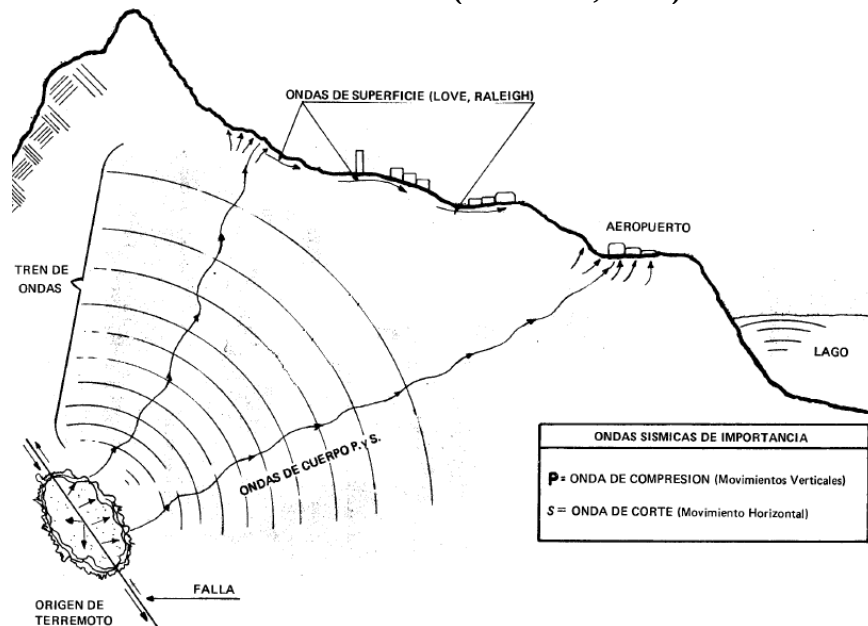
Para el estudio del comportamiento dinámico de los suelos es fundamental conocer conceptos asociados a la teoría básica de dinámica, a continuación, se presenta un marco referencial con los conceptos necesarios para comprender el ensayo de columna resonante y su importancia en el estudio de la dinámica de suelos.

2.1. Ondas sísmicas

“Cuando ocurre un sismo, se producen diferentes tipos de ondas sísmicas, las ondas de volumen y las ondas de superficie” (Kramer, 1996). Los principales tipos de ondas sísmicas son las ondas P (*primary*), S (*secondary*), R (*Rayleigh*) y L (Love), mostradas en la

Ilustración 2.1. Las ondas P y S son también llamadas ondas de volumen o de cuerpo (*body waves*) porque se propagan a través del interior de la tierra en todas las direcciones desde una fuente (como en un sismo) y las ondas R y L son también llamadas ondas de superficie (*Surface waves*) porque se propagan aproximadamente de forma paralela a la superficie terrestre (Kumar, 2008), “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).

Ilustración 2.1: Ondas sísmicas.
Modificado de: (Colindres, 1983)



2.1.1. Ondas P (Primary)

Las ondas P, también conocidas como ondas primarias, de compresión o longitudinales, son ondas que viajan a través del interior de la tierra y son capaces de comprimir y expandir de forma simultánea, los materiales a través de los cuales se propagan. El movimiento de una partícula mediante la cual viaja una onda P es paralelo a la dirección del movimiento de la onda. Las ondas P pueden viajar a través de sólidos y fluidos, se propagan más rápido que las demás ondas sísmicas y por lo tanto son las primeras en llegar a un punto específico (Kramer, 1996).

2.1.2. Ondas S (Secondary)

Las ondas S, también conocidas como ondas secundarias, de corte o transversales, son ondas que viajan a través del interior de la tierra y generan deformaciones por corte en los materiales a través de los cuales se propagan. El movimiento de una partícula mediante la

cual viaja una onda S es perpendicular a la dirección del movimiento de la onda. Las ondas S no viajan en fluidos y viajan más lento que las ondas P en cuerpos sólidos. (Kramer, 1996)

La dirección del movimiento de una partícula se puede analizar dividiendo en dos componentes la onda S, movimiento vertical (SV) y movimiento horizontal (SH). La velocidad de propagación de las ondas S (V_s), varía en función de la rigidez del material en el cual viajan, por lo que este es un parámetro fundamental en el estudio de la dinámica de suelos.

2.1.3. Ondas R (Rayleigh)

Las ondas Rayleigh son ondas generadas por la interacción entre ondas P y el componente vertical de las ondas S (SV) con la superficie terrestre, este tipo de ondas involucran movimiento tanto horizontal como verticalmente (Kramer, 1996). La amplitud de las ondas Rayleigh decrece con la profundidad, la apariencia del movimiento de las partículas a través de las cuales viaja una onda R, es similar al movimiento de las olas en el agua. La profundidad de penetración de las ondas R depende de la frecuencia. (Kumar, 2008)

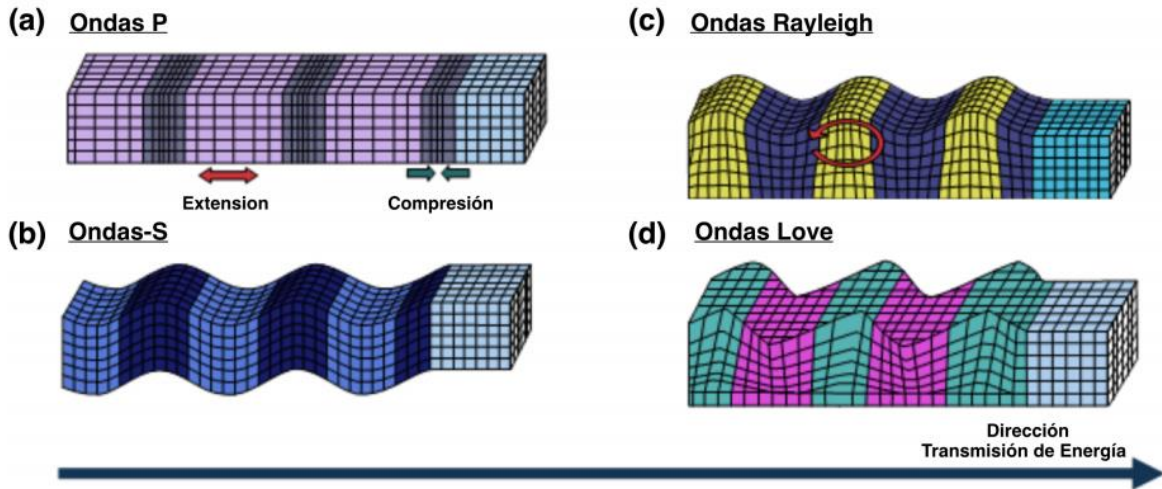
2.1.4. Ondas L (Love)

Las ondas Love son ondas generadas por la interacción entre el componente horizontal de las ondas S (SH) con una capa blanda de la superficie terrestre, por lo tanto su movimiento es, “puramente de corte y perpendicular al plano de propagación de la onda” (Sáenz , 2016).

El efecto mecánico de las ondas sísmicas mencionadas en este apartado se presenta en la

Ilustración 2.2.

Ilustración 2.2: Efectos mecánicos de ondas sísmicas.
Fuente: (Sáenz , 2016)

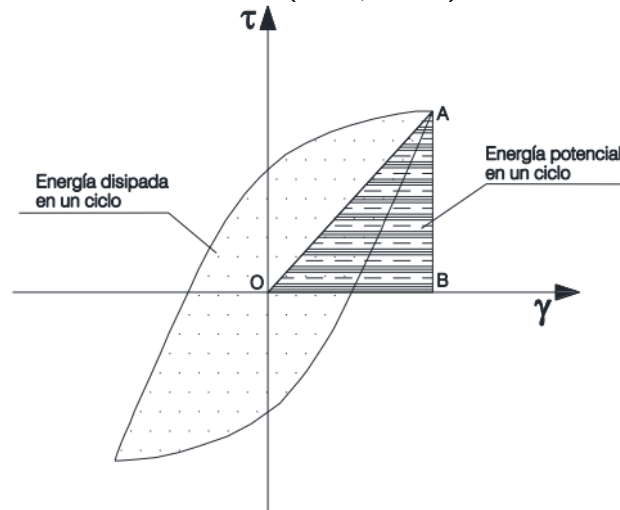


2.2. Amortiguamiento

El amortiguamiento es la energía que se disipa en los suelos y en las estructuras mediante varios mecanismos de pérdida de energía (Kramer, 1996). En los suelos, representa una medida de la capacidad de disipación de energía ante la aplicación de cargas cíclicas, que se caracterizan por la aparición de ciclos de histéresis, estos ciclos indican la capacidad del suelo para disipar energía potencial almacenada debido a su rigidez, el amortiguamiento es consecuencia de los efectos friccionantes provocados por el deslizamiento de las partículas del suelo (Solis, 2017).

El amortiguamiento se puede calcular usando la curva de esfuerzo – deformación de un ensayo cíclico, asumiendo que el suelo tiene un amortiguamiento histérico cuando la energía disipada por ciclo es independiente de la frecuencia de vibración. (Solis, 2017) Se expresa como: $D = \frac{\text{área del ciclo de histéresis}}{4\pi \cdot \text{área OAB}}$, la Ilustración 2.3 presenta un ciclo de histéresis típico en los suelos.

Ilustración 2.3: Curva esfuerzo – deformación de un ensayo cíclico.
Fuente: (Solis, 2017)



2.3. Amplitud

La amplitud de onda, es la magnitud máxima del desplazamiento, está asociada al valor más alto registrado en una variable, medido con respecto al equilibrio o a cero (Freedman & Young , 2009).

2.4. Periodo

El periodo de onda, es el tiempo que tarda un ciclo en completarse. En el sistema internacional de unidades (S.I.) el periodo se mide en segundos (s) (Freedman & Young , 2009)

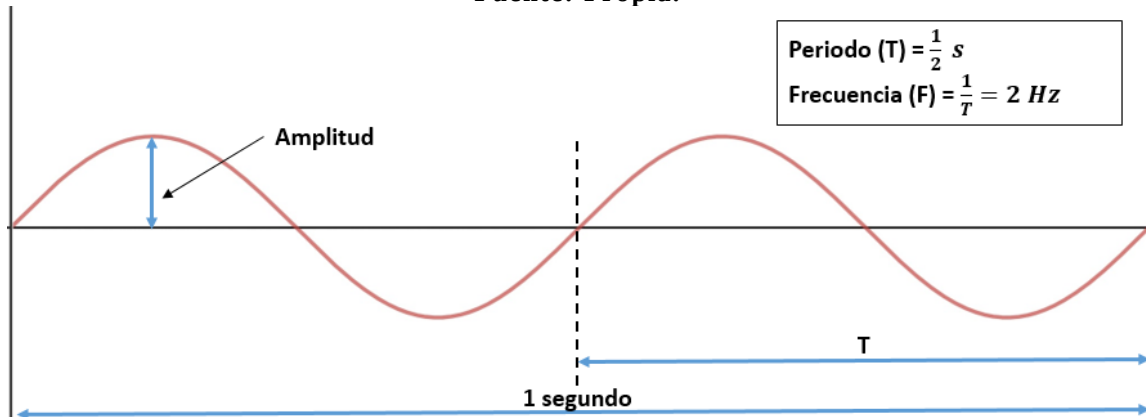
2.5. Frecuencia

La frecuencia de onda, es el número de veces que se repite una oscilación o una vibración en una onda por unidad de tiempo. En el sistema internacional de unidades (S.I.) la frecuencia se mide en s^{-1} o Hertz (Hz).

La representación gráfica de amplitud, periodo y frecuencia se presenta en la Ilustración 2.4.

Ilustración 2.4: Representación gráfica de amplitud, periodo y frecuencia.

Fuente: Propia.



2.6. Carga dinámica

Son cargas que pueden aplicarse de forma súbita, lo que provoca vibraciones en las estructuras, o pueden cambiar de magnitud conforme transcurre el tiempo. Algunos ejemplos son las cargas de impacto, las cargas cíclicas originadas por maquinaria vibratoria, cargas provocadas por el tráfico urbano y los sismos. (Gere & Timoshenko, 1986).

2.7. Rigidez

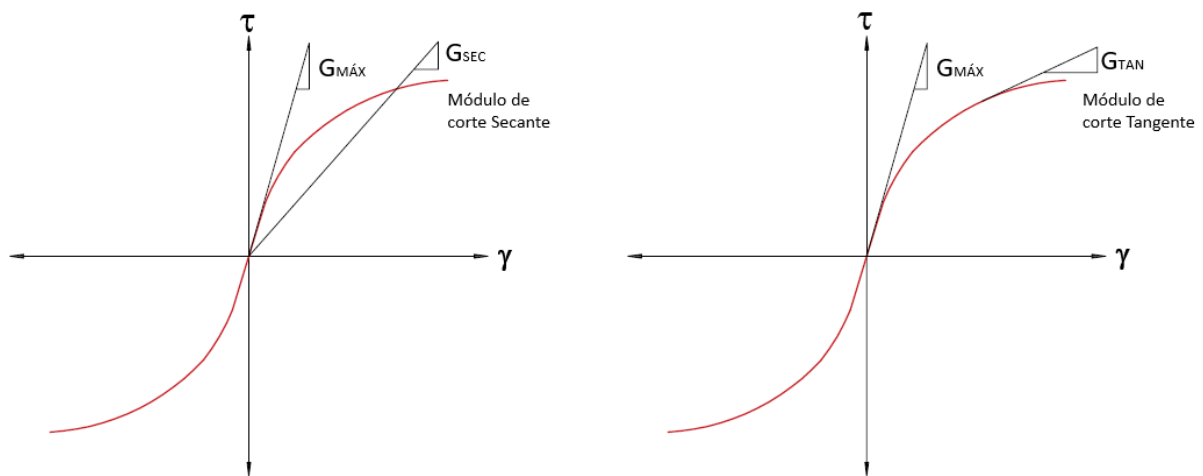
Es la medida de la capacidad de un elemento para oponerse al giro de uno de sus extremos cuando se aplica sobre el algún esfuerzo. (Uribe, 2002) Dado que el suelo tiene un comportamiento anisotrópico, la rigidez es un parámetro de importancia al estudiar fenómenos de propagación de ondas y otros que produzcan bajas deformaciones (Murcia & Perdomo, 2012).

“Los ensayos de laboratorio han demostrado que la rigidez de un suelo está influenciada por esfuerzos cíclicos, relación de vacíos, esfuerzos efectivos, índice de plasticidad, relación de sobreconsolidación y el número de ciclos de carga” (Kramer, 1996).

2.8. Módulo de corte

“Es la relación entre el esfuerzo y la deformación a cortante a amplitudes bajas como las de un sismo” (Suarez , s.f.). La respuesta que presenta un suelo frente a deformaciones, se puede obtener mediante un diagrama de esfuerzo-deformación, dado que el suelo es un material anisotrópico esta grafica es representada a través de una curva y el módulo de corte varía a lo largo de esta, como consecuencia, se definen varios módulos de corte: módulo de corte máximo, módulo de corte secante y módulo de corte tangente (Santibañez, 2006), la representación gráfica de los módulos se presenta en la Ilustración 2.5.

Ilustración 2.5: Módulos de corte.
Fuente: (Santibañez, 2006)



Mediante el ensayo de columna resonante se encuentra la velocidad de onda de corte V_s , que a su vez se utiliza para calcular el módulo de corte G mediante la Ecuación 2.1.

$$G = \rho * v_s^2 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

2.9. Grados de libertad

Son las posibilidades de movimiento independiente que tiene un cuerpo en un espacio determinado, generalmente desplazamientos y rotaciones (Uribe, 2002), “un sistema se mueve con un grado de libertad cuando en un instante cualquiera, su configuración deformada está determinada por un solo parámetro en función del tiempo” (Colindres, 1983).

Los modos de vibración de un sistema son función de sus grados de libertad, es decir, “en un sistema con un grado de libertad es posible un modo de vibrar, en un sistema con dos grados de libertad son posibles dos modos de vibrar y en un sistema con “ n ” grados de libertad son posibles “ n ” modos de vibrar” (Colindres, 1983).

2.10. Modo de vibración

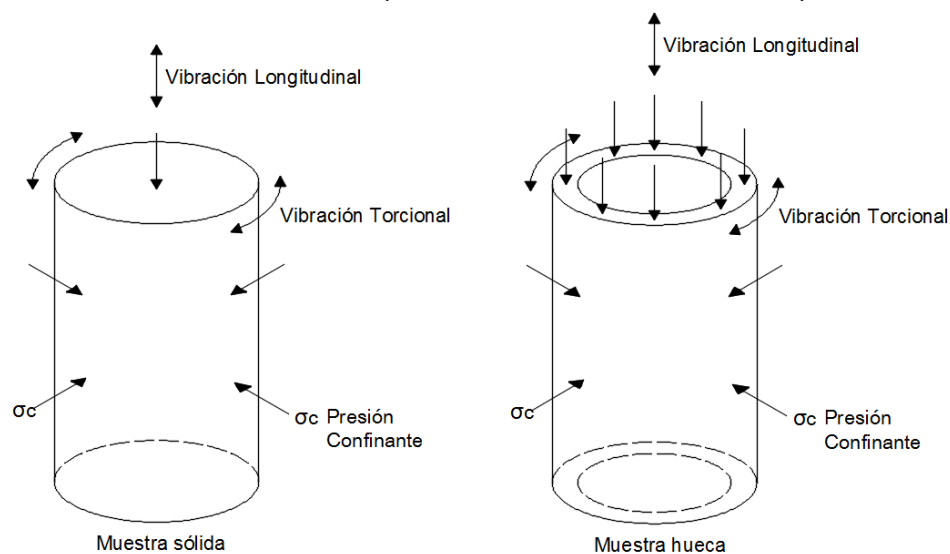
También conocido como modo de oscilación, es la forma característica en que oscila un sistema, el cual no disipa energía y cuyo movimiento está restringido por alguna condición de frontera. Tiene un patrón de movimiento característico, dentro de un determinado conjunto de frecuencias. (McGraw-Hill Companies , 2003)

3. Ensayo de columna resonante: Generalidades

3.1. ¿Qué es el ensayo de columna resonante?

El ensayo de columna resonante es un ensayo de laboratorio usado para determinar propiedades dinámicas del suelo a medias y bajas deformaciones. El ensayo consiste en la vibración longitudinal o torsional, de una muestra cilíndrica, sólida o hueca, de suelo en su estado natural (Das & Ramana, 2014), esto al aplicar una excitación torsional armónica de amplitud constante sobre la parte superior de la muestra, producida por un sistema electromagnético de carga o motor en un rango de frecuencia predeterminado, la amplitud de deformación de la muestra se mide hasta que se encuentra la frecuencia para la cual dicha amplitud se maximiza, a esta frecuencia se le conoce como frecuencia de resonancia, la cual es función de la geometría de la muestra, la rigidez (k) del suelo y la configuración del dispositivo de columna resonante (GCTS , 2007). A partir de la frecuencia de resonancia y la geometría de la muestra (Ilustración 3.1) se puede obtener la velocidad de onda de corte (V_s), con este dato y la densidad del suelo, es posible calcular el módulo de corte (G).

Ilustración 3.1: Ensayo de columna resonante
Modificado de: (Díaz, Dinámica de suelos, 2005)



3.2. ¿Por qué es importante el ensayo de columna resonante?

Las propiedades dinámicas del suelo son parámetros importantes para el análisis y diseño de estructuras que requieren soportar cargas dinámicas (GCTS , 2007), cuando se aplican cargas dinámicas a una masa de suelo, bien se trate de sismos, tránsito de vehículos, vibración de maquinaria, etc., se provocan cambios en el estado de esfuerzos de dicha masa, lo cual puede causar un incremento en las deformaciones (Díaz, 2005). La realización del ensayo de columna resonante permite obtener parámetros fundamentales en el estudio del comportamiento dinámico del suelo y así poder dar respuesta a diferentes problemas relacionados con dinámica de suelos.

3.3. Normatividad

El ensayo de columna resonante está estandarizado mediante la norma ASTM D4015-15, denominada, *métodos de estandarización para ensayos de módulo y amortiguamiento de suelos usando dispositivos de columna resonante de base fija*, esta norma abarca métodos de ensayo para la determinación del módulo de corte (G) y el amortiguamiento por corte (D), mediante vibración en función de la amplitud del esfuerzo cortante, usando dispositivos de columna resonante para muestras cilíndricas sólidas de suelo en condiciones naturales y remoldeadas (ASTM D4015 , 2015).

Existen diversas configuraciones del equipo para el ensayo de columna resonante, esta norma contempla dos configuraciones distintas, el dispositivo tipo 1, el cual aplica un torque conocido en el extremo superior de la muestra y el movimiento de rotación resultante es medido en el mismo extremo, el dispositivo tipo 2, el cual aplica un torque no conocido en el extremo superior de la muestra y el torque transmitido a través de la muestra se mide mediante un transductor en el extremo inferior. (ASTM D4015 , 2015). El extremo de la

muestra en el que se aplica el torque es conocido como extremo activo, mientras que el que permanece fijo es conocido como extremo pasivo.

La universidad Santo Tomás cuenta con el equipo TSH-100 para el ensayo de columna resonante, el cual encaja de forma parcial con las características del dispositivo tipo 1, pues el disco pasivo está directamente conectado a una base fija (no a un transductor de torque), y durante el ensayo, un torque conocido es aplicado en el extremo activo de la muestra y la rotación se mide en el mismo extremo, pero se diferencian en la forma en que se realizan las mediciones, ya que el dispositivo mencionado en la norma utiliza resortes y dashpots, mientras que el equipo TSH-100 utiliza sensores de deformación y de proximidad.

Los métodos de ensayo enunciados en la norma mencionada, se limitan a la determinación del módulo de corte (G) y amortiguamiento por corte (D), la preparación de la muestra y la vibración necesaria. No incluyen la aplicación, medición o control de esfuerzos normales estáticos axiales y laterales. Para estos procedimientos deben revisarse las normativas ASTM D2850, D3999, D4767, D5311 o D7181 (ASTM D4015 , 2015).

3.3.1. Características de los equipos

La norma establece algunas condiciones generales que deben cumplir los equipos usados para el ensayo de columna resonante, a continuación, se presentan a modo de resumen algunos de los requisitos del dispositivo de ensayo.

- ✓ El dispositivo de vibración y la muestra deben estar contenidos dentro de una celda triaxial.
- ✓ El dispositivo debe contar con discos (activo y pasivo) para sostener la muestra dentro de la celda triaxial, deben estar fabricados de un material no corrosivo que

tenga un módulo de al menos diez veces el módulo del material a ser probado, la construcción de los discos debe ser tal que su rigidez sea al menos diez veces la del espécimen.

- ✓ Los discos (activo y pasivo) deben tener una sección transversal circular de diámetro mayor o igual al diámetro del espécimen, y la superficie de contacto con la muestra debe ser rugosa para proporcionar un acoplamiento eficiente con los extremos de la muestra.
- ✓ Debe contarse con un dispositivo de excitación por vibración y transductores o instrumentos para medir la respuesta.
- ✓ Las partes móviles del dispositivo de excitación deben estar conectadas al disco, de tal manera que en el montaje puedan considerarse parte de él.
- ✓ El dispositivo debe contar con mecanismos de control y lectura de los esfuerzos aplicados.
- ✓ El disco en el extremo pasivo debe estar rígidamente fijo.
- ✓ El dispositivo de vibración, debe ser capaz de aplicar una vibración torsional sinusoidal al disco del extremo activo en el que las partes móviles del dispositivo estén rígidamente acopladas.

3.3.2. Características de la muestra

La norma establece algunas condiciones generales que deben cumplir las muestras utilizadas en el ensayo de columna resonante, a continuación, se presenta a modo de resumen algunas de las condiciones establecidas.

- ✓ Las muestras deben tener una sección circular uniforme con extremos perpendiculares al eje del espécimen.

- ✓ Las muestras deben tener un diámetro mínimo de 33 mm o 1.3 in y la partícula más grande contenida dentro de la muestra debe ser máximo de 1/6 de su diámetro.
- ✓ La relación longitud-diámetro debe estar entre 2.0 y 3.0.
- ✓ Las medidas del diámetro deben tomarse en tres puntos a lo largo de la longitud del espécimen con una precisión de 0.25 mm (0.01 in) y promediarse.
- ✓ Las medidas de la altura de la muestra deben tomarse con una precisión de 0.25 mm (0.01 in) en los cuatro cuadrantes y promediarse.
- ✓ Se deben conocer de la muestra a ensayar los siguientes datos: Contenido de agua, grado de saturación, gravedad específica y relación de vacíos.

3.3.3. Configuración del ensayo

La norma establece que el procedimiento a seguir dependerá del equipo utilizado y de sus componentes electrónicos, sin embargo, en cualquier ensayo el montaje se debe realizar mediante procedimientos que minimicen la perturbación de la muestra, debe tenerse cuidado especial al acoplar los discos a la muestra y al conectar el dispositivo de excitación por vibración. En cualquier caso, la muestra debe estar confinada en una membrana de caucho o látex. (ASTM D4015 , 2015)

El ensayo se realiza hasta establecer resonancia, la cual se define como la frecuencia más baja a la que el torque se encuentra desfasado 90° con respecto a la aceleración rotacional o desplazamiento. Esto puede detectarse al observar la figura de Lissajous en un osciloscopio con una señal de entrada de torque en las abscisas y aceleración rotacional o desplazamiento graficados en las ordenadas (ASTM D4015 , 2015). La Ilustración 3.2 presenta la señal del torque aplicado, la rotación medida y la figura de Lissajous cuando el sistema entra en

resonancia. En la Ilustración 3.3 se presentan las figuras de Lissajous de un sistema en resonancia para desplazamiento, velocidad y aceleración.

Ilustración 3.2: Ensayo convencional de columna resonante: a) Torque aplicado; b) Rotación medida en el disco activo; c) Figura de Lissajous.
Fuente: (Camacho , 2011)

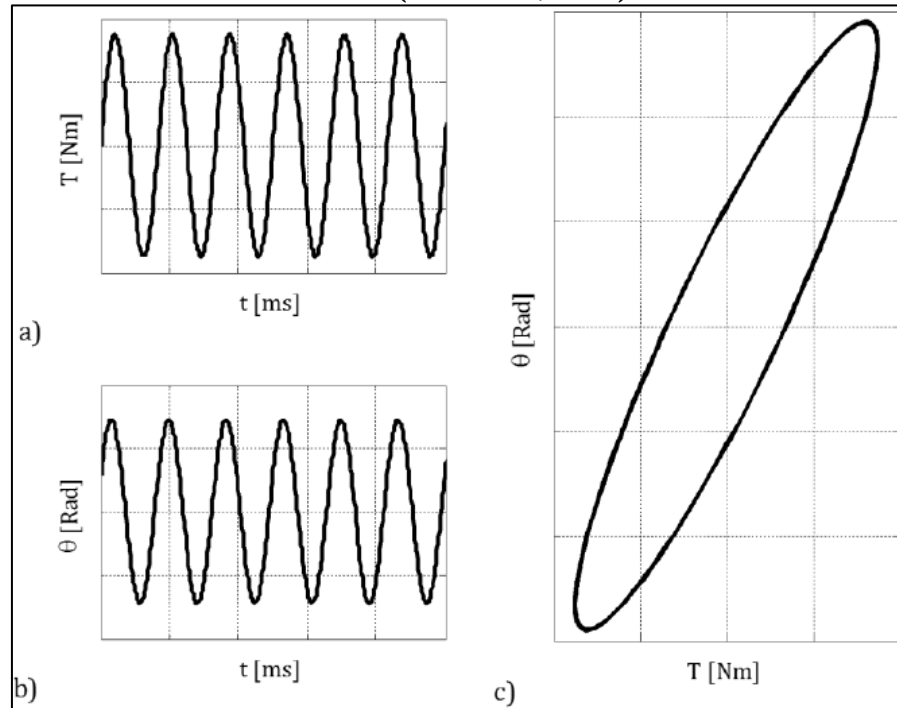
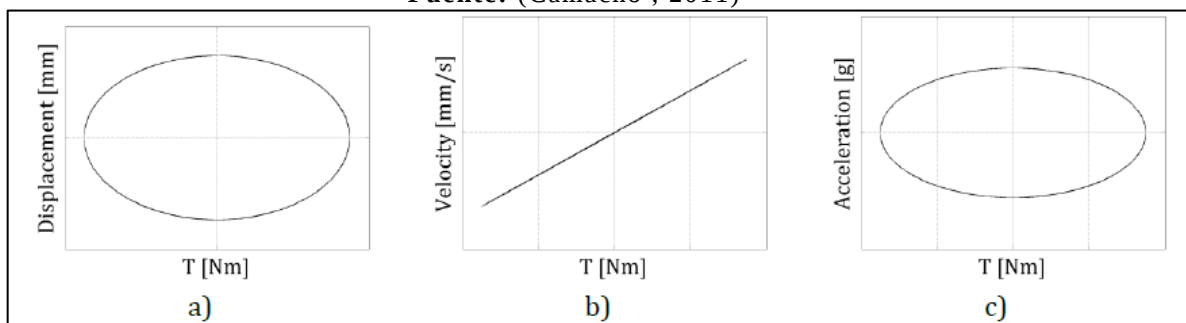


Ilustración 3.3: Figuras de Lissajous de un sistema de columna resonante en resonancia: a) desplazamiento; b) velocidad; c) aceleración.
Fuente: (Camacho , 2011)



4. Equipo para el ensayo de columna resonante

Es un dispositivo usado para medir propiedades dinámicas del suelo a bajas deformaciones en laboratorio. Existen varias versiones del equipo, pero en general un equipo de columna resonante está compuesto por: una celda de presión, discos (activo y pasivo) para sostener la muestra dentro de la celda de presión, un dispositivo de vibración (motor que aplica torque), transductores para medir la respuesta y un equipo auxiliar para la preparación de especímenes. (ASTM D4015 , 2015).

De acuerdo con (Díaz, 2018), los primeros registros del equipo de columna resonante, “se remontan a Ishimoto e Iida (1937), posteriormente Bishop (1959), Hardin (1965), Drnevich, Hall y Richard (1967) y otros, fundamentaron la teoría en que se basa la interpretación de los resultados del equipo de columna resonante”. Se han diseñado distintas configuraciones del equipo para el ensayo de columna resonante, anteriormente, operar su sistema requería de un alto nivel de experiencia por parte del usuario, dado requería manipular dispositivos electrónicos complejos. Los aparatos de columna resonante modernos se han convertido en equipos fáciles de usar, pues implementan sensores y dispositivos electrónicos sofisticados y computarizados que realizan esta prueba automáticamente, sin embargo, la correcta adecuación de las muestras y la apropiada selección de rangos en los sensores son claves para obtener resultados coherentes y válidos. (GCTS , 2007)

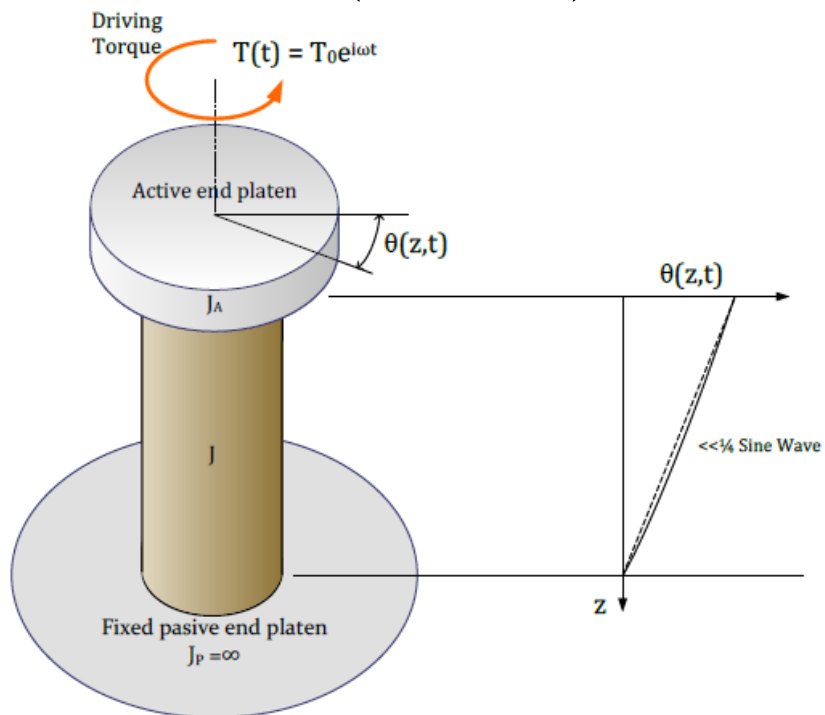
La universidad Santo Tomás cuenta con el equipo TSH-100, fabricado por la empresa GCTS, dicho equipo combina la configuración para los ensayos de columna resonante y corte torsional en un mismo dispositivo, estos ensayos se pueden realizar en muestras sólidas y huecas de suelo y asfalto, usando un software incluido con el equipo que permite la ejecución automática de dichos ensayos, además cuenta con dispositivos para la medición de

deformaciones angulares y axiales. La Ilustración 4.1 presenta el equipo de la referencia mencionada y en la Ilustración 4.2 se presenta de manera esquemática el sistema utilizado por el equipo TSH-100.

**Ilustración 4.1: Equipo TSH-100/200
Modificado: GCTS**



**Ilustración 4.2: Esquema del sistema Fixed-Free usado en el equipo TSH-100.
Fuente: (Camacho , 2011)**



4.1. Partes del equipo TSH-100

El equipo TSH-100 de GCTS cuenta con diferentes partes desmontables y el uso de algunas depende de las características de la muestra a ensayar, está conectado a una fuente de alimentación y a un equipo de cómputo, el cual, mediante el software CATS realiza y registra los resultados de los ensayos de forma automática. Para efectos de esta guía, se identificaron como partes, los componentes necesarios para la realización de ensayos en el equipo, los cuales a su vez se componen de piezas que pueden reemplazarse en caso de ser necesario. Las partes del equipo TSH-100 se presentan en la Ilustración 4.3 y en la Tabla 4.1.

Ilustración 4.3: Partes del equipo TSH-100
Fuente: Propia

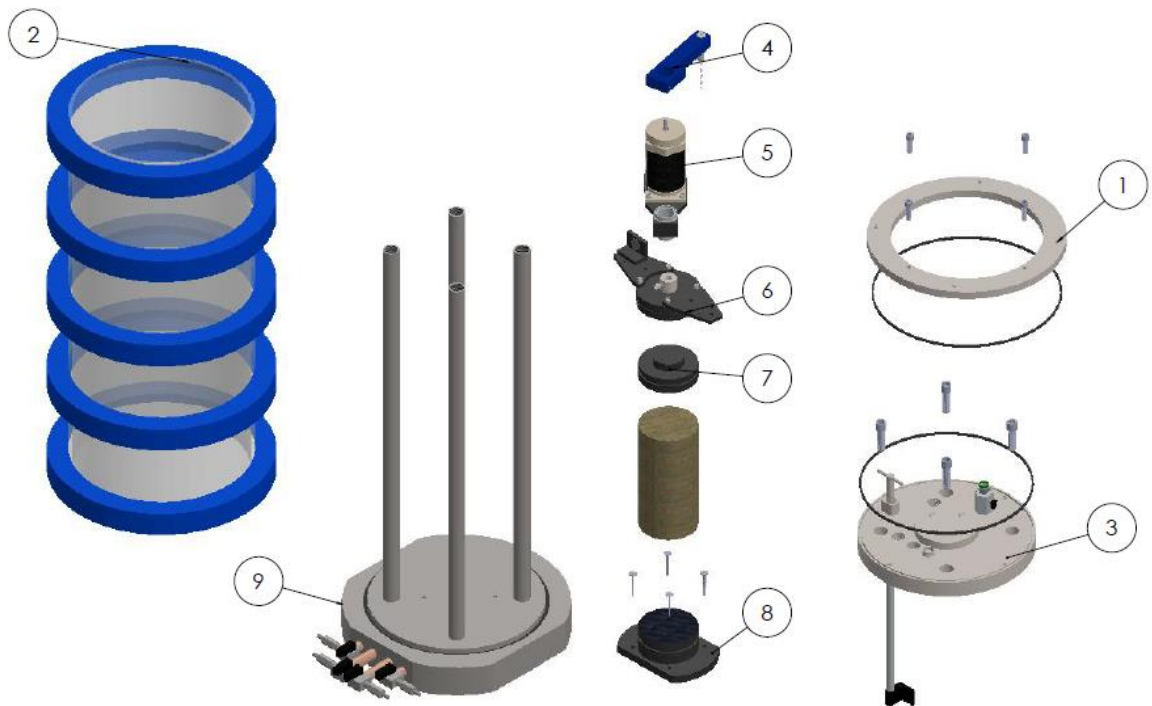


Tabla 4.1: Partes del equipo TSH 100.
Fuente: Propia

ID.	Parte
1	Anillo Superior
2	Celda Triaxial o celda de presión
3	Cubierta de conexiones
4	Sensor de desplazamientos inductivos LVDT
5	Motor para aplicación de torque
6	Base de motor con espejo reflector para sensor de proximidad
7	Disco activo para espécimen de ensayo
8	Disco pasivo para espécimen de ensayo
9	Base fija con soportes

A continuación, se realiza una breve descripción de las partes y su función en el equipo.

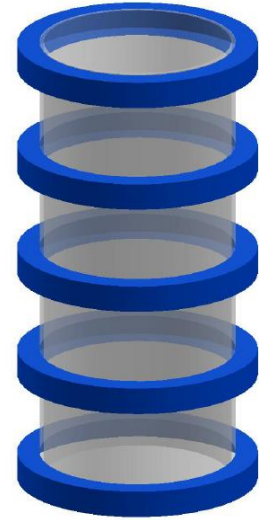
Anillo Superior



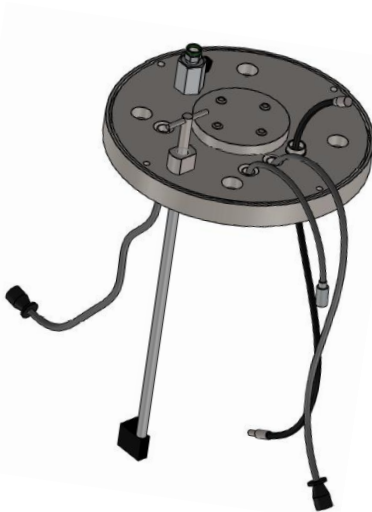
Es un anillo con 4 orificios que sirven para asegurar la celda triaxial a la cubierta de conexiones mediante tornillos Bristol, además cuenta con un empaque de caucho, el cual genera un sello hermético en la celda que evita la salida o entrada de aire.

Celda Triaxial o celda de presión

Es una celda con paredes celulares de plástico acrílico, usada para generar un confinamiento lateral a la muestra de suelo a ensayar, tiene una capacidad de confinamiento lateral de hasta 1000 KPa o 150 psi (GCTS , 2007). Es usada para la realización de ensayos de laboratorio, pero no se requiere para calibrar el equipo.



Cubierta de conexiones

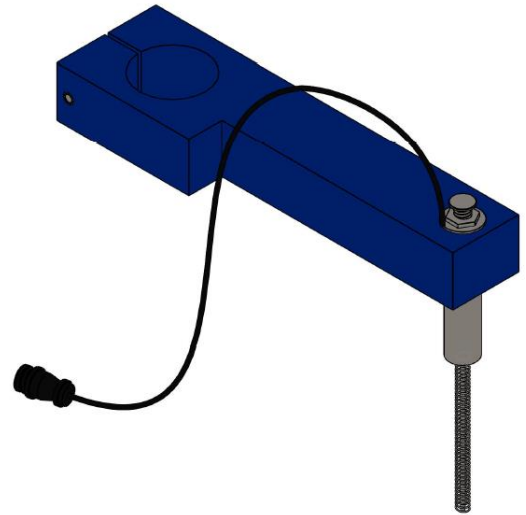


Es un disco que se ubica sobre los soportes de la base fija del equipo, contiene conectores tanto en la parte superior (externa a la cámara) e inferior (interna a la cámara), los detalles de los conectores se presentan en el apartado de conexiones, dichos conectores permiten el funcionamiento del equipo y envían los datos de ensayo hacia el software CATS, uno de ellos permite la entrada de aire presurizado a la cámara. Además, tiene un soporte inferior que sirve como anfitrión o base para el sensor de proximidad. La cubierta tiene un empaque de caucho para garantizar el sello hermético junto con el anillo superior, y se asegura a la base fija a través de los soportes de la misma mediante tonillos Bristol.

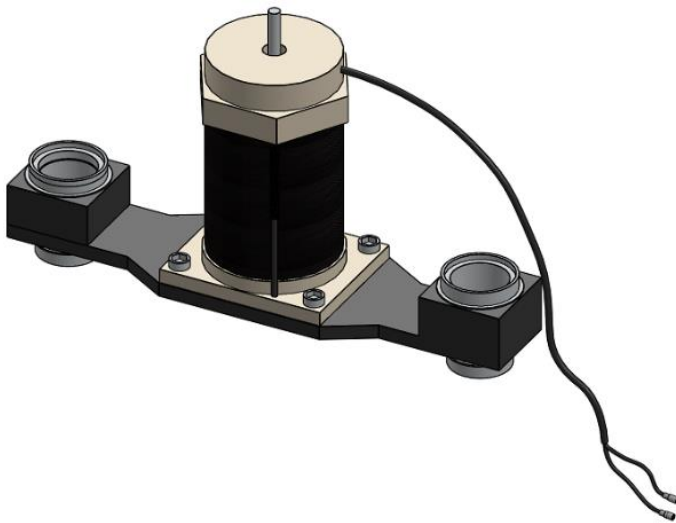
Sensor de desplazamientos inductivos LVDT

También conocido como transformador diferencial de variación lineal, LVDT, por sus siglas en inglés. “Es un tipo de transformador eléctrico que se utiliza para medir los cambios de volumen en condiciones edométricas con relación a la altura” (Rodríguez , 2017). El sensor posee un rango de medida de ± 6 mm (Pineda, Cruz, &

Ávila , 2018) Cuenta con elemento de apoyo para ajustarse mediante un tornillo Bristol y sujetarse en cualquiera de los soportes de la base fija, se conecta con uno de los conectores de la cubierta de conexiones mediante el conector de rosca incorporado.



Motor



Es un motor eléctrico que genera una excitación torsional y permite variar la fuerza torsional cíclica que se aplica sobre la parte superior del espécimen (Torres, 2017). Cuenta con una capacidad de 2.33 N-m (GCTS , 2007). Está sobre una base flotante que ingresa al equipo a

través de los soportes de la base fija y en la cual el eje del motor queda prisionero apretándolo mediante un tornillo Bristol, tiene dos conectores, macho y hembra, ambos conectados a la parte inferior de la cubierta de conexiones.

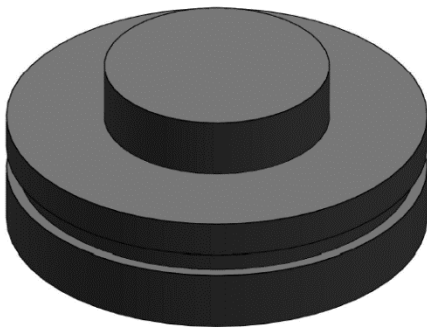
Base de motor

Es un elemento compuesto por varias piezas que sirve como base y contrapeso, el eje del motor entra en el cilindro central de la base y se aprieta mediante un tornillo Bristol. La base también contiene el espejo reflector



para el sensor de proximidad o *proximeter* en uno de sus extremos, en la parte inferior, cuenta con un orificio que encaja con el disco activo y se ajusta mediante tornillos Bristol.

Disco activo

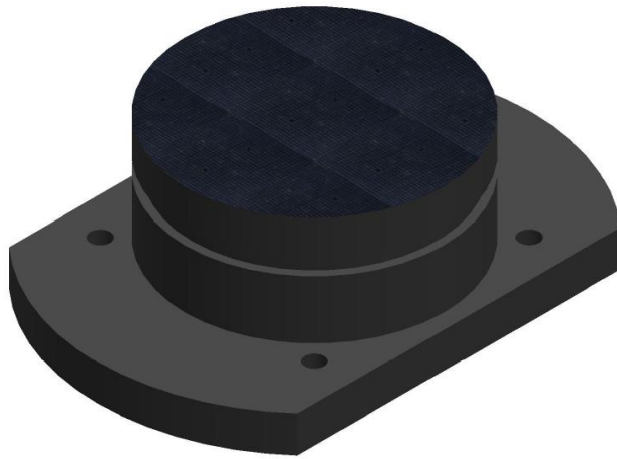


Es un elemento usado para el espécimen a ensayar, su diámetro varía en función del diámetro del espécimen, su función es transmitir la excitación torsional. Como su nombre lo indica, en este disco se permite movimiento, en su parte inferior tiene una textura rugosa que garantiza

que la torsión transmitida desde motor se aplique directamente sobre la muestra. Existen discos activos tanto para muestras sólidas como para muestras huecas, en la universidad Santo Tomás se cuentan con discos activos para muestras sólidas de 2.8" y 1.4" de diámetro.

Disco pasivo

Es un elemento usado para el espécimen a ensayar, su diámetro varía en función del diámetro del espécimen, además de servir como base para el espécimen, su función es mantenerlo fijo en su extremo inferior. Al igual que los discos activos, tiene una textura rugosa en la cara que



tiene contacto directo con el espécimen, existen discos pasivos tanto para muestras sólidas como para muestras huecas. En la universidad Santo Tomás se cuentan con discos pasivos para muestras sólidas de 2.8" y 1.4" de diámetro. El disco pasivo se atornilla a la base fija mediante tornillos Bristol.

Base fija



Es un elemento conformado por cuatro soportes en forma de columna y una base, los soportes se pueden desenroscar de la base, pero hacerlo no es necesario, ambos pueden formar una pieza fija, juntos constituyen la estructura física del equipo. Tanto los soportes como la base tienen empaques para garantizar el sello hermético, con la cubierta de conexiones en el caso de los soportes, y con la celda de presión en el caso de la base. La base es anfitriona del disco pasivo de forma directa y de los demás componentes de forma indirecta, los soportes son anfitrión del motor y del sensor de desplazamientos inductivos LVDT.

Sensor de proximidad

Es un dispositivo que produce una señal eléctrica cuando detecta la proximidad de un objeto en su alrededor (McGraw-Hill Companies , 2003), y “mide el ángulo de giro en la parte superior de la muestra” (Pineda, Cruz, & Ávila , 2018). El sensor se encuentra colgando en la parte inferior de la cubierta de conexiones y permanece fijo a esta, se conecta externamente a la fuente de alimentación del equipo.



4.2. Conectores del equipo TSH-100

El equipo TSH-100 cuenta con diferentes conectores que son necesarios para el funcionamiento y la recolección de datos del equipo, de manera general, se podrían clasificar como conectores internos y conectores externos, siendo los internos aquellos cuyas conexiones se realizan bajo la cubierta de conexiones y una vez culminado el montaje quedan dentro de la celda de presión, mientras que los externos son aquellos cuyas conexiones se realizan en la parte superior de la cubierta de conexiones y exteriores a la celda de presión. A continuación, se presentan dichos conectores.

4.2.1. Conectores interiores

Entre los conectores interiores del equipo se encuentran los conectores del sensor LVDT, el motor y la parte inferior de la cubierta de conexiones. Los conectores internos de la cubierta de conexiones se presentan en la Ilustración 4.4, las convenciones se presentan en la Tabla 4.2, la numeración de los conectores del motor y del sensor LVDT, presentados en la Ilustración 4.5 y la Ilustración 4.7 respectivamente, corresponden con sus conexiones a la parte inferior de la cubierta de conexiones, por ejemplo, el conector 2A de la cubierta de conexiones se conecta con el conector 2A, que corresponde a uno de los conectores del motor. La Tabla 4.3 y la Tabla 4.4 presentan las convenciones de las partes del motor y del sensor LVDT respectivamente.

Ilustración 4.4: Conectores interiores de cubierta de conexiones.
Fuente: Propia

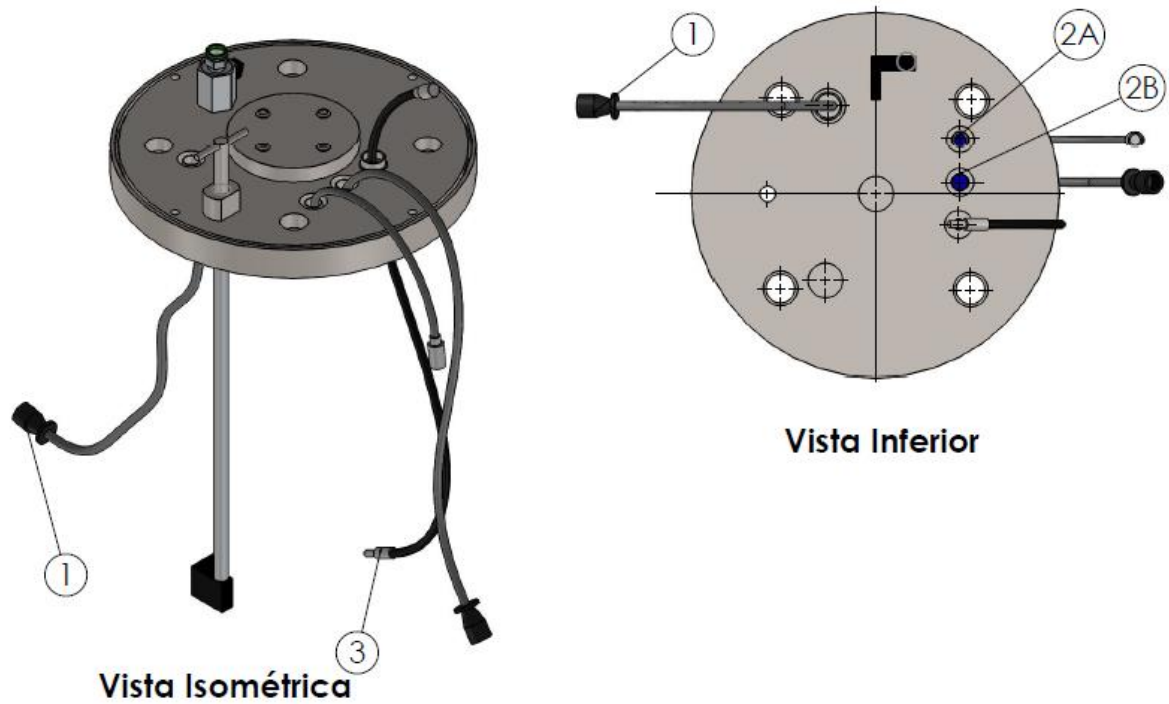


Tabla 4.2: Convenciones conectores interiores de cubierta de conexiones.
Fuente: Propia

ID.	Conector
1	Conector de cubierta de conexiones con sensor LVDT.
2A	Conector Hembra de cubierta de conexiones con Motor.
2B	Conector Macho de cubierta de conexiones con Motor.
3	Sensor de proximidad.

Ilustración 4.5: Conectores del motor a la cubierta de conexiones.
Fuente: Propia

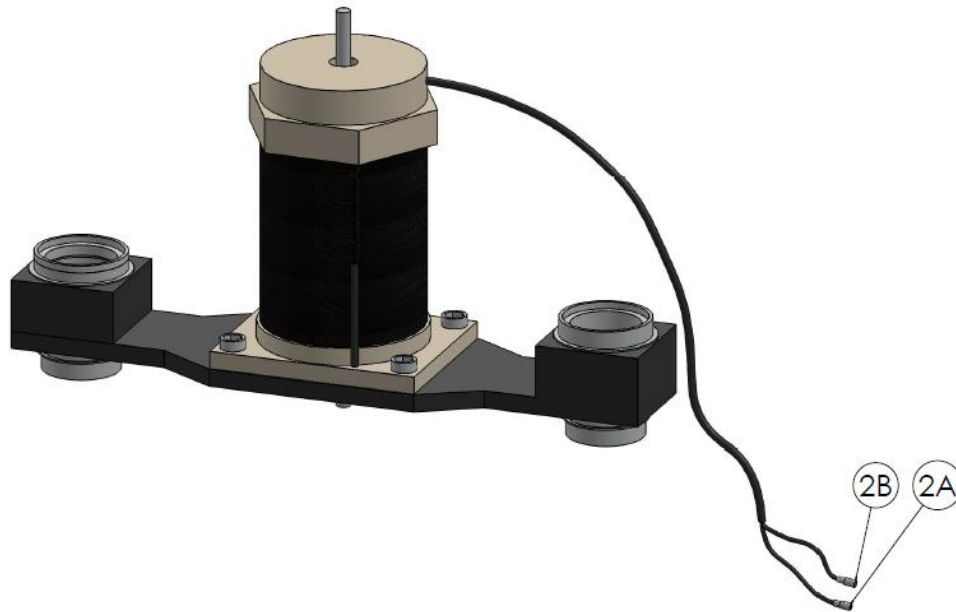


Ilustración 4.6: Conectores del motor a la cubierta de conexiones.
Fuente: Propia

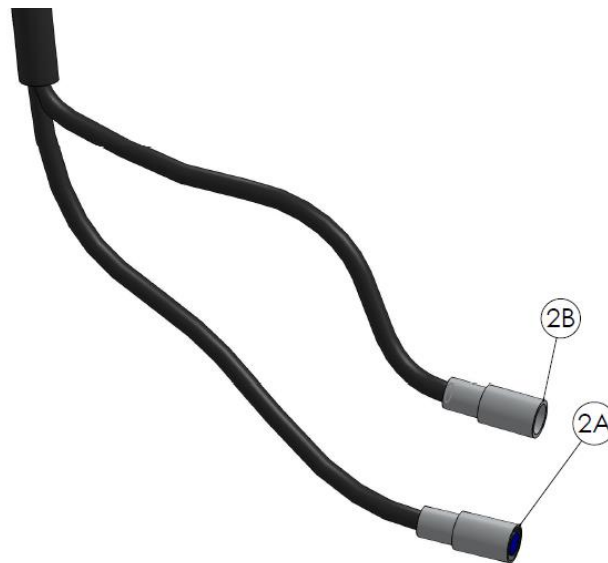


Tabla 4.3: Convenciones conectores de motor.
Fuente: Propia

ID.	Conector
2A	Conector Macho de motor a cubierta de conexiones.
2B	Conector Hembra de motor a cubierta de conexiones.

Ilustración 4.7: Conector de sensor LVDT.
Fuente: Propia

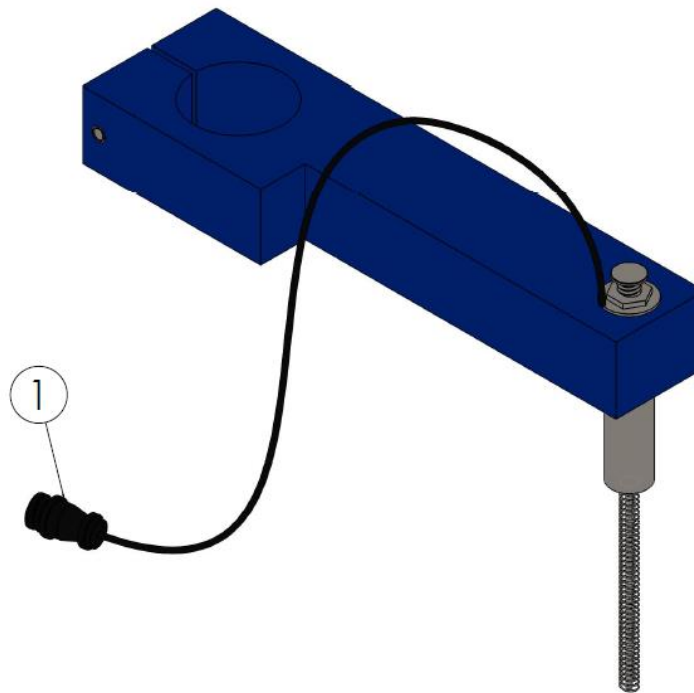


Tabla 4.4: Convenciones conectores del sensor LVDT.
Fuente: Propia

ID.	Conector
1	Conector de sensor LVDT a conector de cubierta de conexiones con sensor LVDT.

4.2.2. Conectores exteriores

Los conectores exteriores del equipo TSH-100 corresponden a los conectores de la parte superior de la cubierta de conexiones con la fuente de alimentación. La Ilustración 4.8 presenta los conectores exteriores del equipo y la Tabla 4.5 presenta las convenciones.

Ilustración 4.8: Conectores exteriores de la cubierta de conexiones.
Fuente: Propia

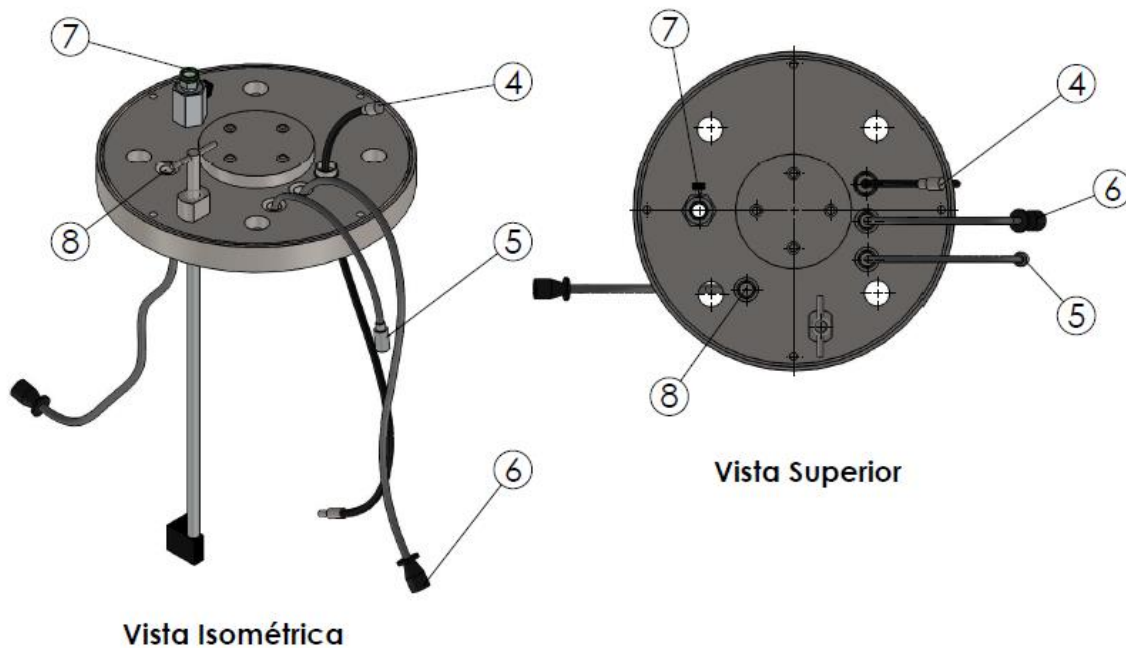


Tabla 4.5: Convenciones conectores exteriores de cubierta de conexiones.
Fuente: Propia

ID.	Conector
4	Conector de sensor de proximidad a fuente de alimentación
5	Conector de motor a fuente de alimentación (Datos)
6	Conector de motor a fuente de alimentación (Energía)
7	Conector para compresor (entrada de aire)
8	Conector de sensor LVDT a fuente de alimentación

Para la utilización del equipo TSH-100, es necesario contar con un equipo de cómputo en el cual ejecutar el software CATS, de GCTS y también con la fuente de alimentación del equipo, en la cual se conectan todos los dispositivos que lo conforman. La Ilustración 4.9 presenta el montaje completo.

Ilustración 4.9: Montaje completo del equipo TSH-100.
Fuente: Propia



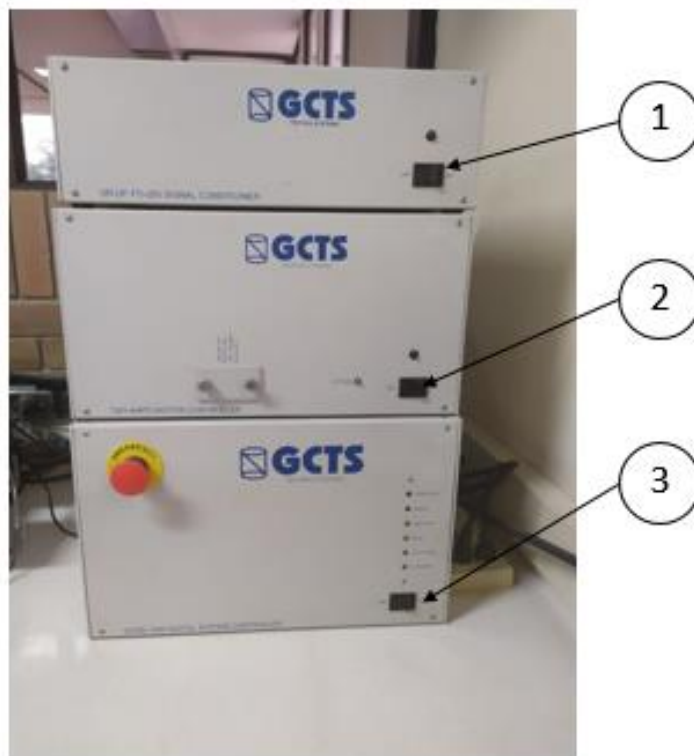
En el Anexo B de este documento, se presenta un inventario de las partes del equipo TSH-100, sus implementos auxiliares y repuestos disponibles hasta la fecha en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Santo Tomás, sede Bogotá.

5. Desmonte del equipo TSH-100

Para la realización de cualquier ensayo en el equipo TSH-100, es necesario realizar el montaje de una muestra, para ello resulta imprescindible realizar el desmonte del equipo casi en su totalidad, proceso que es dispendioso y un poco difícil si no se ha trabajado anteriormente con el equipo. A continuación, se realizará una descripción del procedimiento paso a paso para realizar el desmonte del equipo.

Paso 1: Verificar que la fuente de alimentación esté apagada, si no lo está, se debe apagar de arriba hacia abajo. La Ilustración 5.1 presenta la fuente de alimentación y el orden numérico representa el orden en que debe apagarse.

Ilustración 5.1: Orden de apagado de fuente de alimentación.
Fuente: Propia



Paso 2: Verificar que la válvula de entrada de aire esté cerrada, de no estarlo, cerrarla y proceder a desconectar todos los conectores exteriores. Se recomienda seguir el siguiente orden para la desconexión:

- ✓ Conector de motor a fuente de alimentación energía (6)
- ✓ Conector de motor a fuente de alimentación datos (5)
- ✓ Conector de sensor de proximidad a fuente de alimentación (4)
- ✓ Conector para compresor (entrada de aire) (7)
- ✓ Conector de sensor LVDT a fuente de alimentación (8)

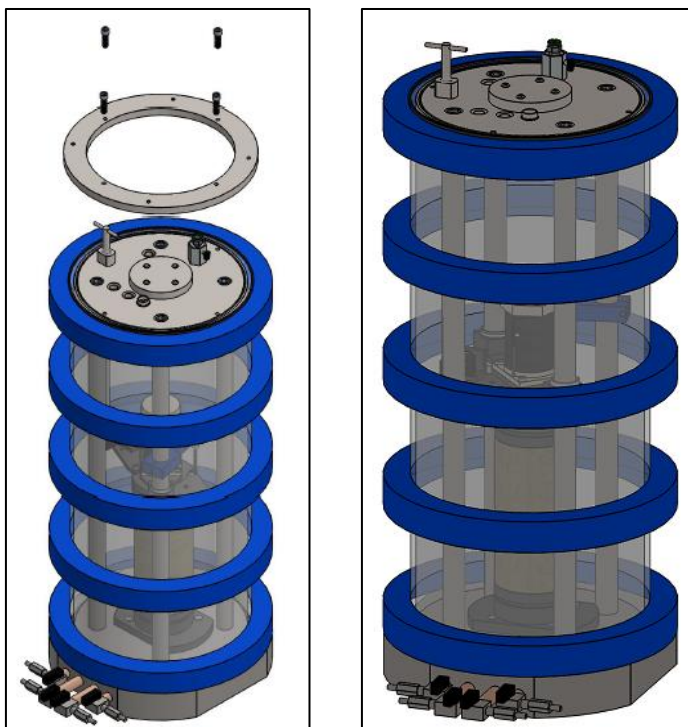
Paso 3: Abrir las válvulas ubicadas en la parte inferior de la base fija para que salga todo el aire comprimido que pueda haber dentro de la celda de presión, como se presenta en la Ilustración 5.2.

Ilustración 5.2: Desmonte de equipo TSH-100 paso 3.
Fuente: Propia



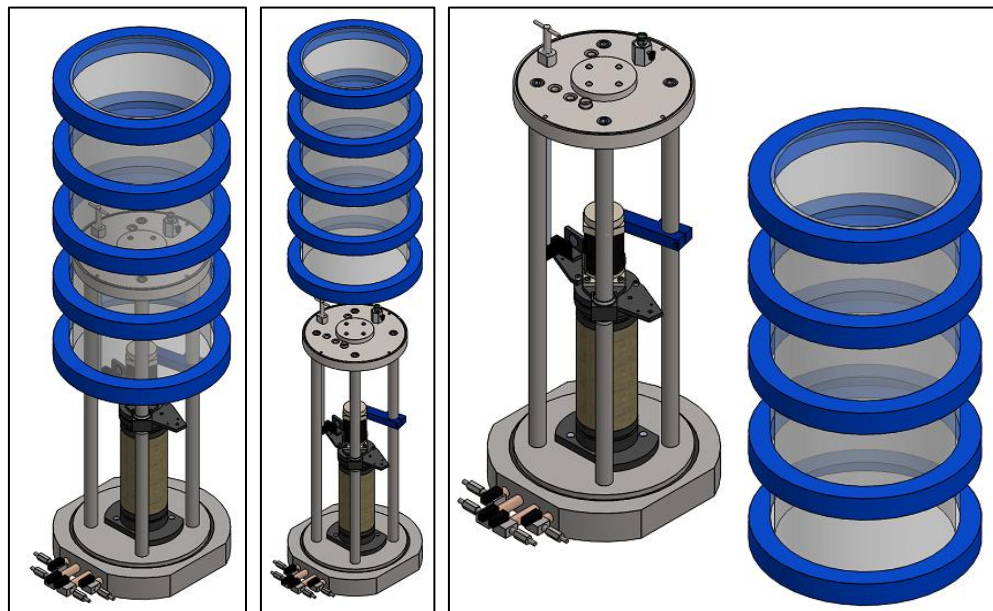
Paso 4: Desatornillar los pernos del anillo superior y retirarlo junto con su empaque como se indica en la Ilustración 5.3. Se recomienda que todas las piezas retiradas del equipo se ubiquen sobre un mantel limpio para evitar que se contaminen.

Ilustración 5.3: Desmonte de equipo TSH-100 paso 4.
Fuente: Propia



Paso 5: Retirar la celda de presión. Es recomendable realizar este paso con ayuda de alguien, debido al peso de la celda y a que se debe levantar hasta una altura considerable, además algunos de los conectores exteriores de la cubierta de conexiones pueden obstruir. La Ilustración 5.4 presenta el proceso a seguir.

Ilustración 5.4: Desmonte de equipo TSH-100 paso 5.
Fuente: Propia



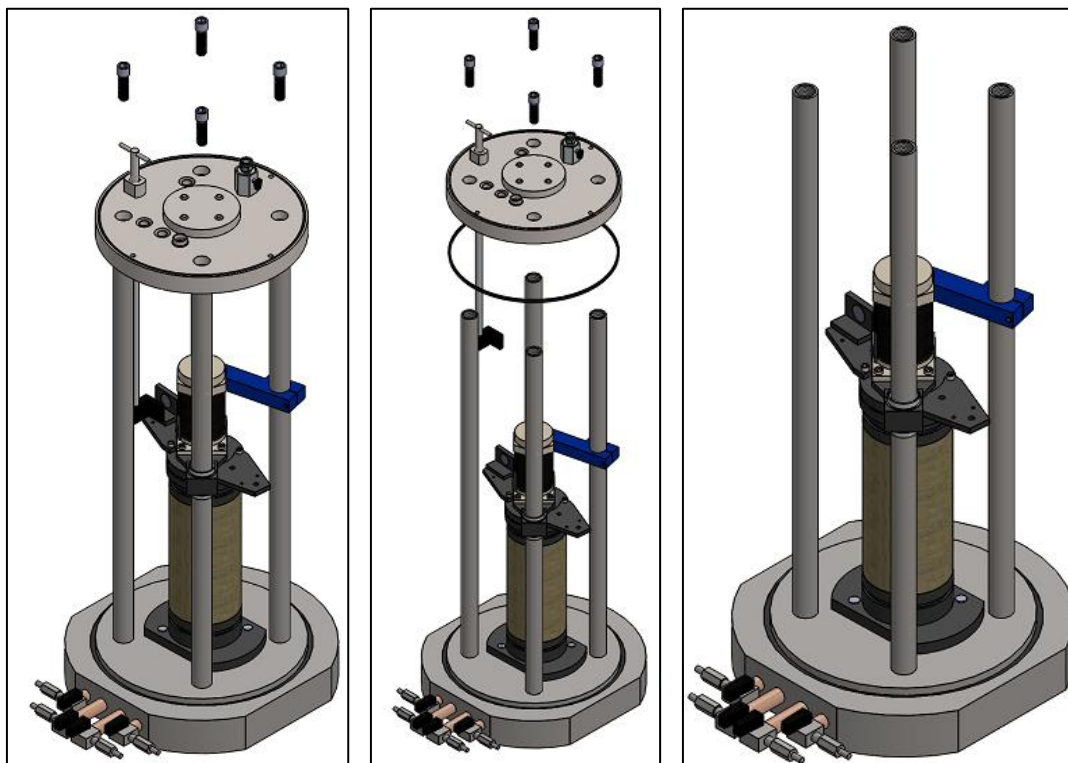
Paso 6: Colocar protector al sensor de proximidad y desconectar todas las conexiones interiores de la cubierta de conexiones. Se recomienda seguir el siguiente orden en la desconexión:

- ✓ Colocar protector al sensor de proximidad. (3)
- ✓ Desconectar Conector de cubierta de conexiones con sensor LVDT. (1)
- ✓ Desconectar Conector Hembra de motor a cubierta de conexiones. (2A)
- ✓ Desconectar Conector Macho de motor a cubierta de conexiones. (2B)

*Los números entre paréntesis son la representación de cada conector, presentados en la Ilustración 4.4.

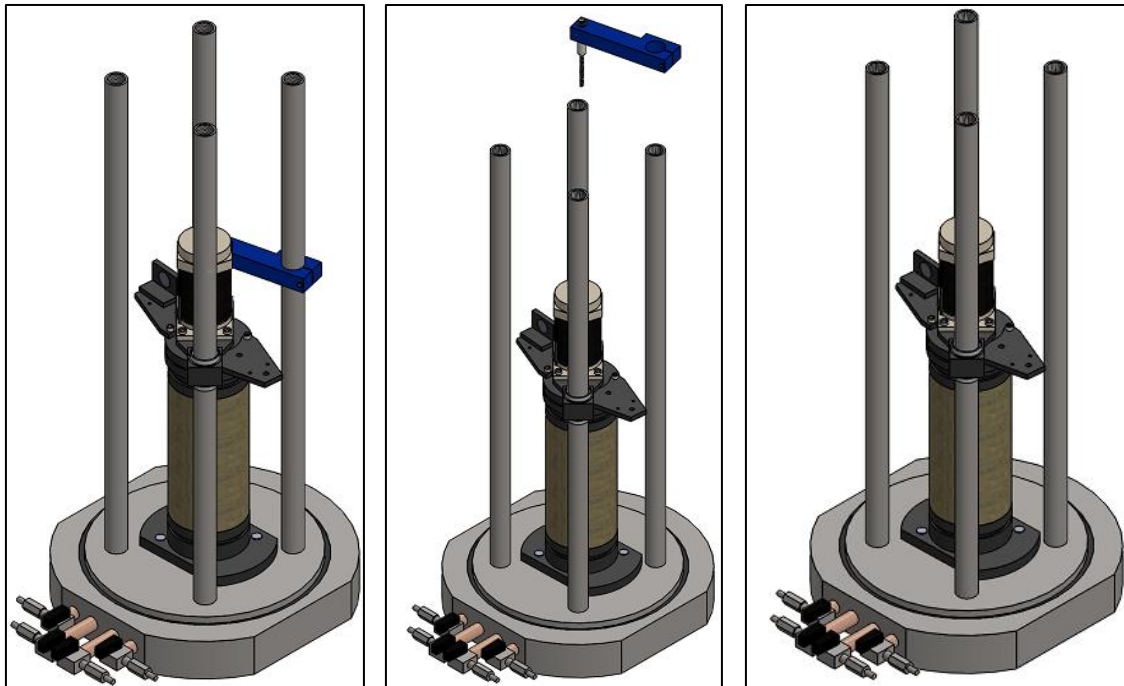
Paso 7: Desatornillar los pernos que aseguran la cubierta de conexiones a los soportes de la base fija, asegurarse de que ningún cable esté enredado de manera que pueda obstruir la salida de la cubierta, retirar la cubierta de conexiones teniendo especial cuidado con el soporte que sostiene la base para el sensor de proximidad. Se recomienda verificar que ningún empaque de los soportes se quede adherido a la cubierta de conexiones, esto para evitar su pérdida. La Ilustración 5.5 presenta el procedimiento a seguir.

Ilustración 5.5: Desmonte de equipo TSH-100 paso 7.
Fuente: Propia



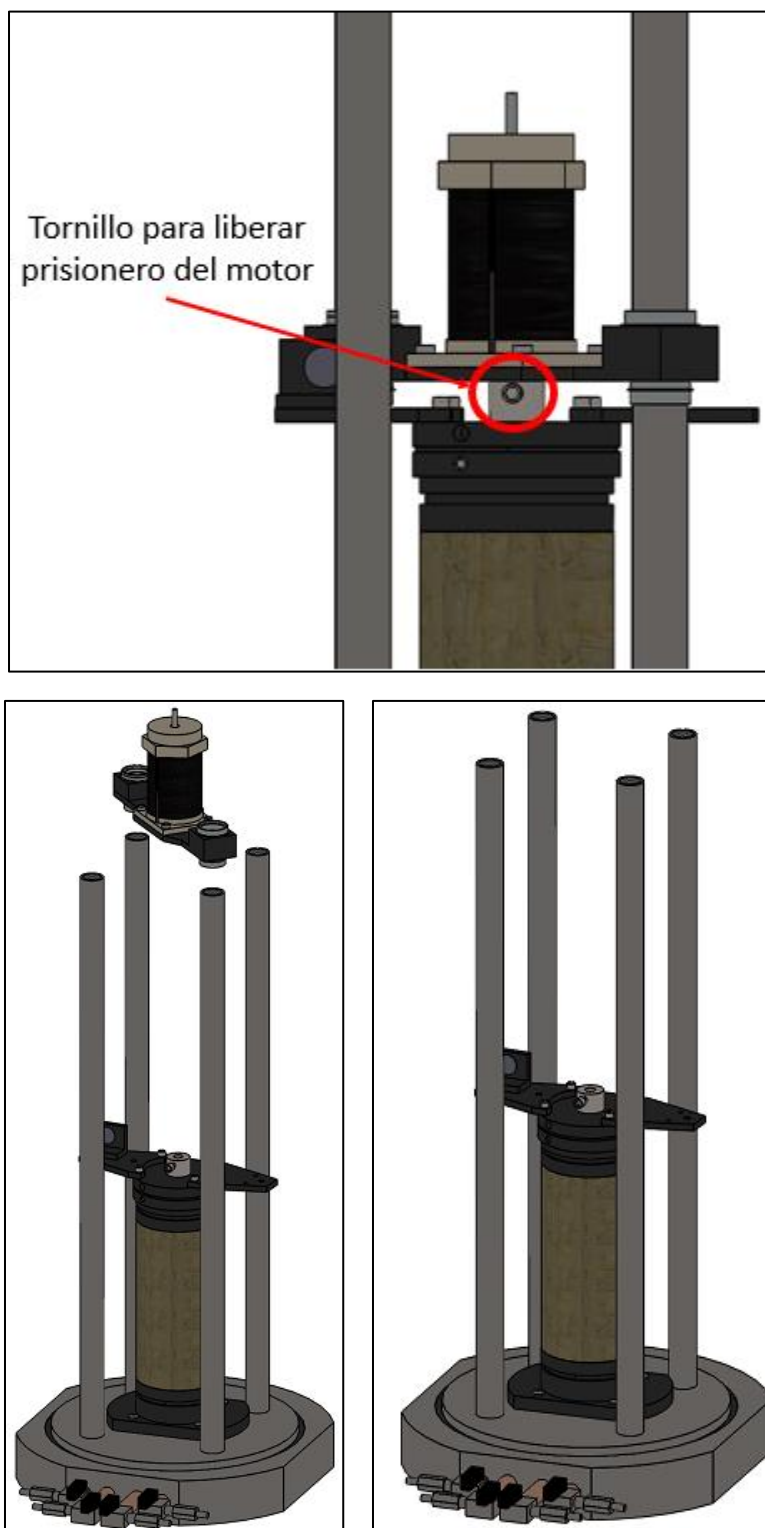
Paso 8: Retirar el sensor LVDT desajustándolo del soporte en el que se encuentre, esto, desapretando el tornillo Bristol ubicado en el costado de la base del sensor. La Ilustración 5.6 presenta el procedimiento a seguir.

Ilustración 5.6: Desmonte de equipo TSH-100 paso 8.
Fuente: Propia



Paso 9: Liberar el prisionero desapretando el tornillo bristol que sujeta la parte inferior del eje del motor, ubicado en la base del motor. En caso de haber una muestra montada en el equipo, y que esta se requiera para algún otro ensayo, se recomienda sujetar el motor ya que al liberar el prisionero, el motor cae sobre la base y el golpe podría dañar la muestra. La Ilustración 5.7 presenta el procedimiento a seguir.

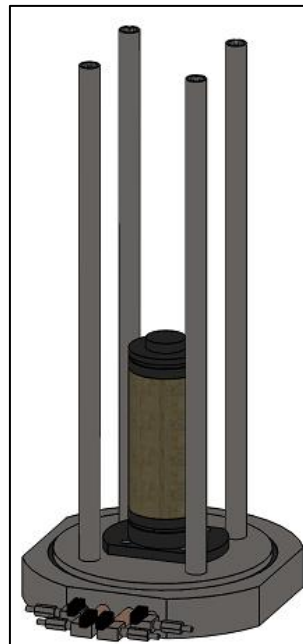
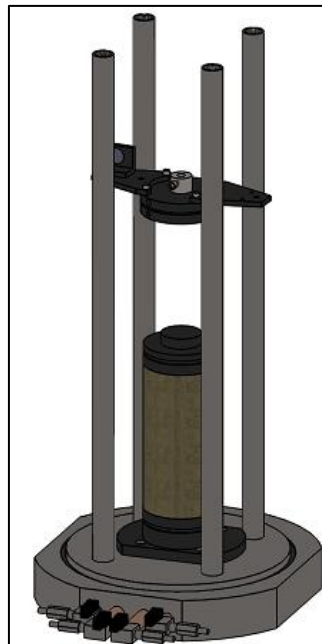
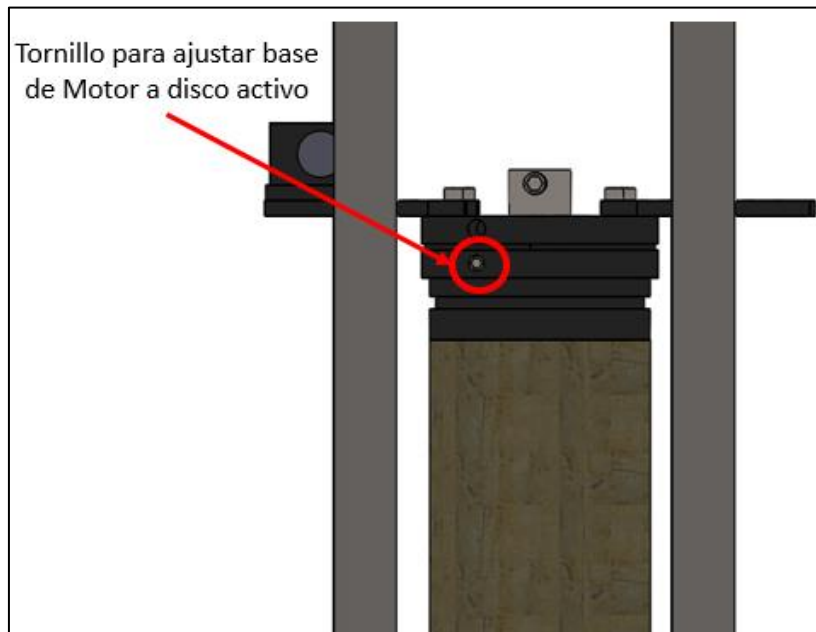
Ilustración 5.7: Desmonte de equipo TSH-100 paso 9.
Fuente: Propia



Paso 10: Desapretar los tornillos bristol que sujetan la base del motor con el disco activo.

En caso de haber una muestra montada en el equipo, y que desee recuperarse, se recomienda tener cuidado especial al desapretar los tornillos, ya que cualquier movimiento brusco podría dañar la muestra. La Ilustración 5.8 presenta el procedimiento a seguir.

Ilustración 5.8: Desmonte de equipo TSH-100 paso 10.
Fuente: Propia



Nota: En caso de que en el equipo esté montada una muestra que se desee recuperar, diríjase al apartado **Recuperación de una** muestra, de lo contrario, continúe con la secuencia.

Paso 11: Retire el disco activo. En caso de que esté montada la barra de calibración, retire la barra desde la base, retirando los torinillos que la sujetan. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 5.9 para muestras no recuperables y en la Ilustración 5.10 para la barra de calibración.

Ilustración 5.9: Desmonte de equipo TSH-100 paso 11 (Muestras no recuperables).
Fuente: Propia

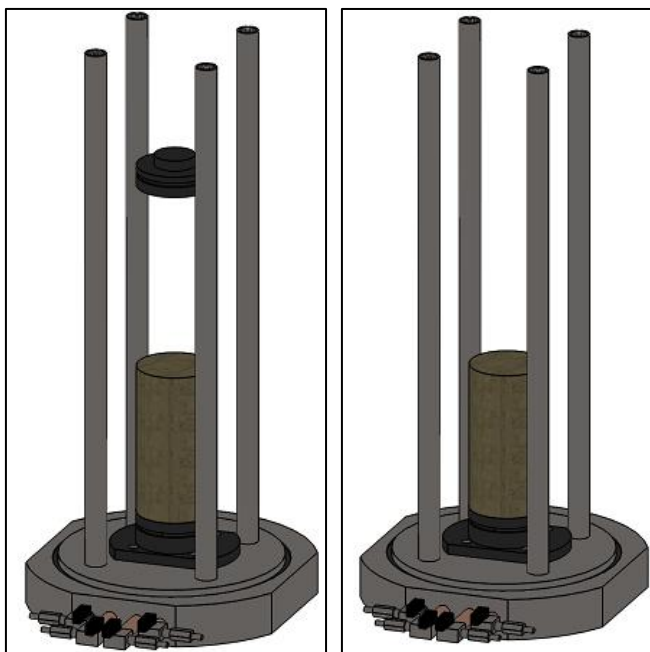
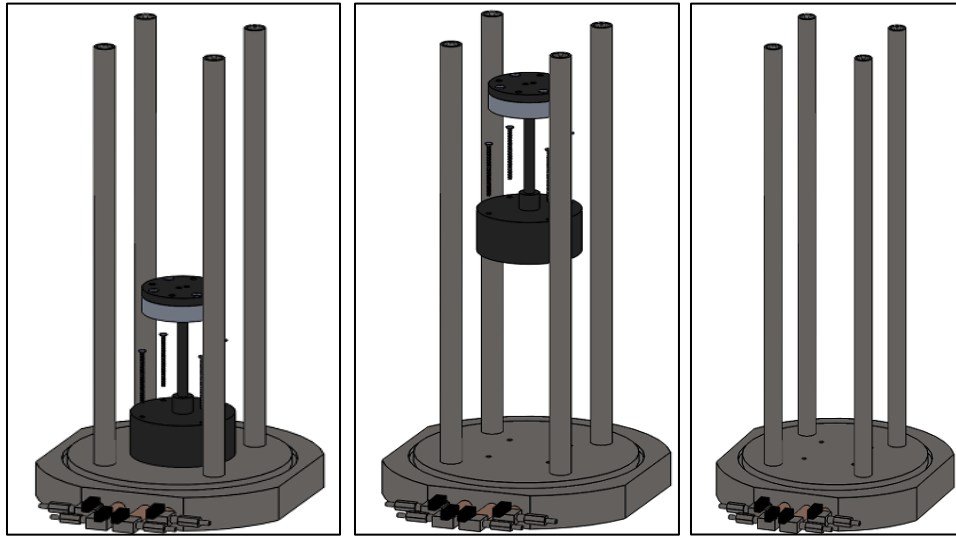


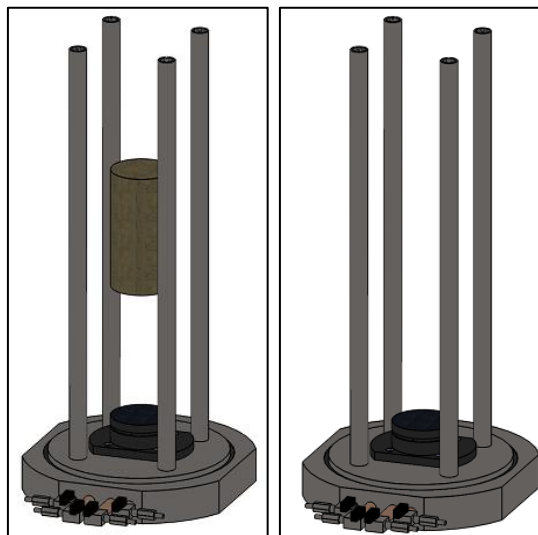
Ilustración 5.10: Desmonte de equipo TSH-100 paso 11 (Barra de calibración).
Fuente: Propia



Nota: En caso de que la barra de calibración estuviera montada, el proceso de calibración culminaría en el paso 11, de lo contrario, continuar con la secuencia.

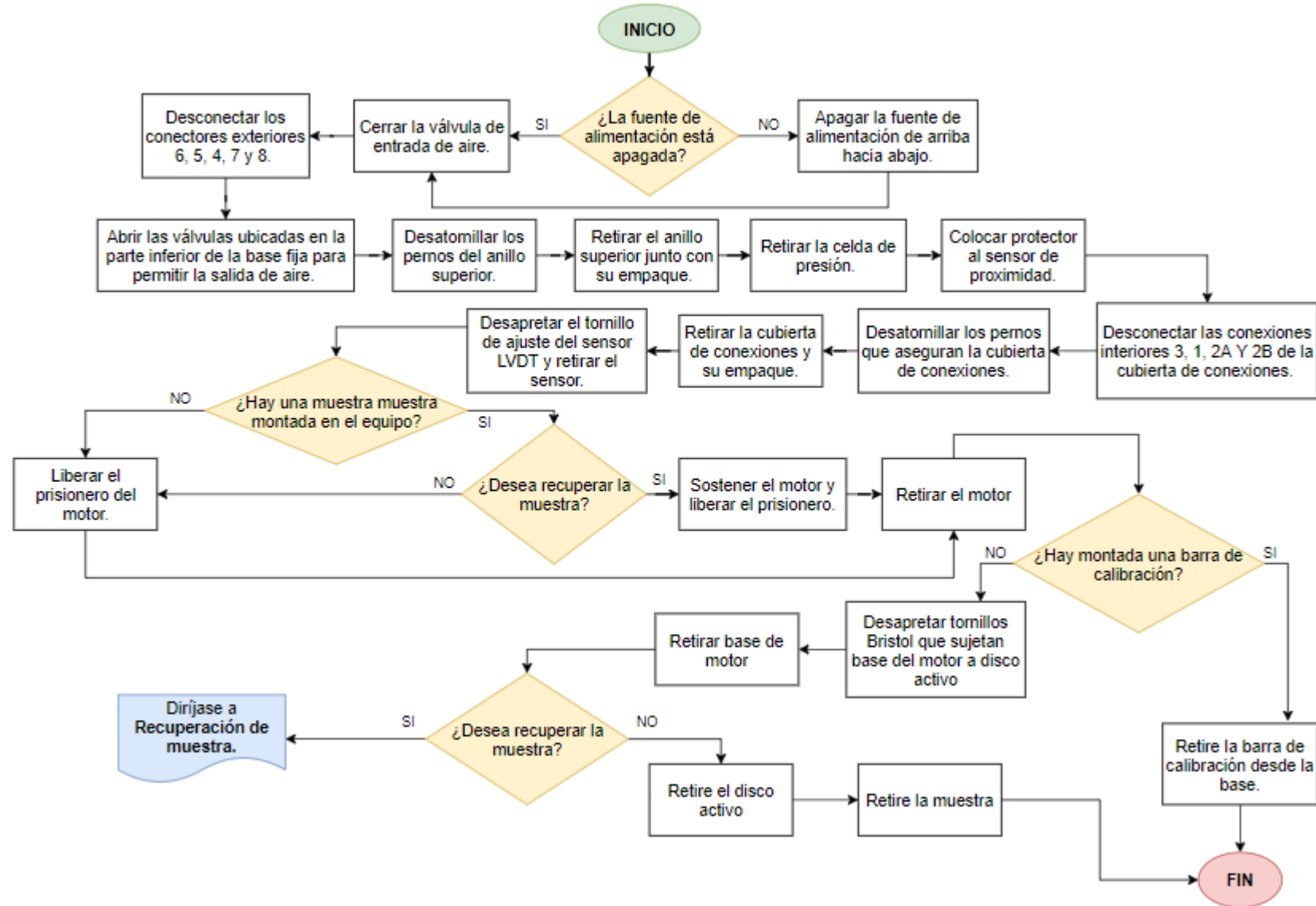
Paso 12: Retirar la muestra no recuperable, se recomienda no retirar el disco pasivo a menos que se vaya a cambiar el diámetro de las muestras para futuros ensayos. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 5.11.

Ilustración 5.11: Desmonte de equipo TSH-100 paso 12.
Fuente: Propia



Una vez se culmina el procedimiento de desmonte del equipo TSH-100, se recomienda realizar una limpieza de cada una de las partes desmontadas usando estopa o un limpión, en ambos casos, completamente limpios. Esto se debe hacer debido a que durante el proceso de montaje es necesario lubricar algunas piezas ya sea con gliserina o con vasenila, para evitar fugas en la celda de presión. En el Diagrama 1 se presenta a modo de resumen el procedimiento a seguir para el desmonte del equipo.

Diagrama 1:Desmante del equipo TSH-100
Fuente: Propia



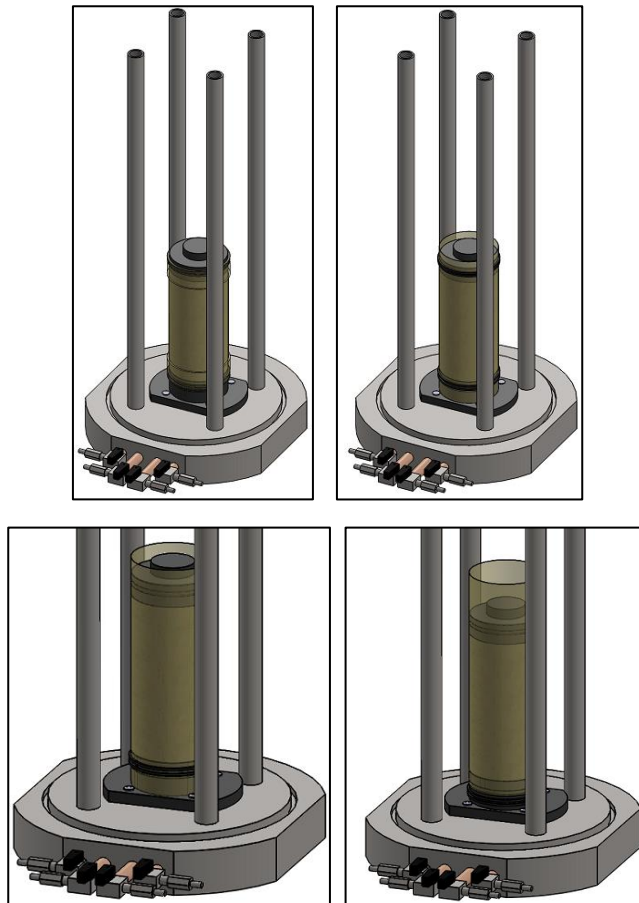
*Los números en los procesos, son la representación de cada conector, como se presentan en la Ilustración 4.4 y la Ilustración 4.8

5.1. Recuperación de una muestra

En caso de que en el equipo haya una muestra montada y que desee recuperarse para realizar con ella algún otro ensayo, se deben seguir los pasos expuestos a continuación con la mayor delicadeza posible para evitar daños en el espécimen.

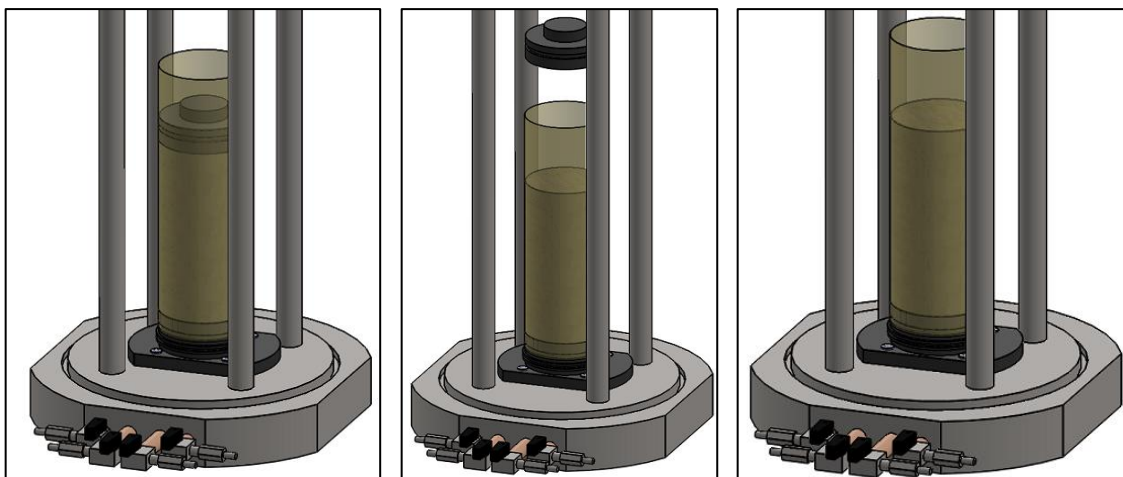
Paso 1: Despliegue los dobleces de la membrana que cubren los O’rings en cada extremo de la muestra y desplace los O’rings ubicados en el disco pasivo hacia la base del disco, de manera que hagan contacto directo con el disco sin aprisionar la membrana, los O’rings ubicados en el disco activo desplácelos hacia arriba y retírelos. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 5.12.

Ilustración 5.12: Recuperación de una muestra paso 1.
Fuente: Propia



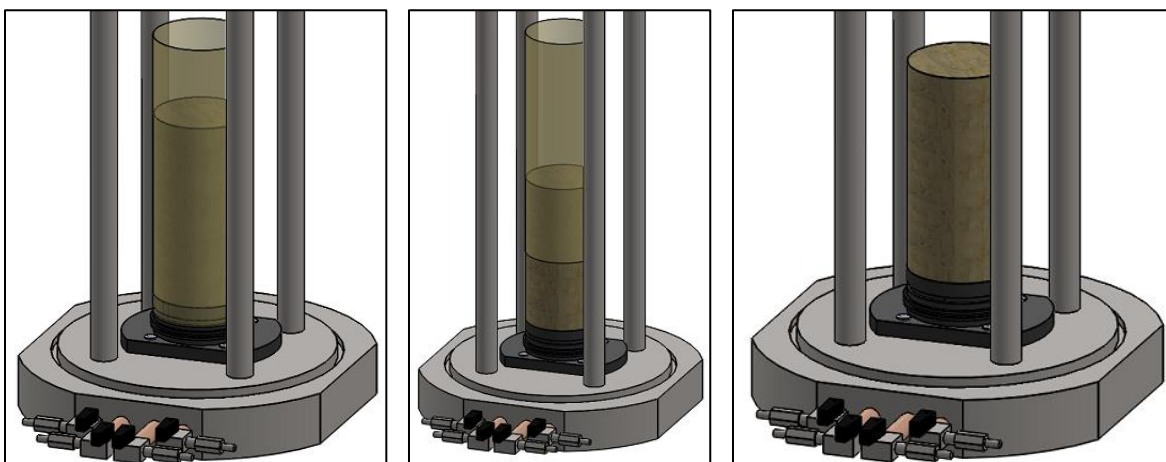
Paso 2: Retirar el disco activo sujetando con una fuerza leve la muestra en su parte superior, para evitar que el grabado del disco desprenda parte de la muestra. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 5.13.

Ilustración 5.13: Recuperación de una muestra paso 2.
Fuente: Propia



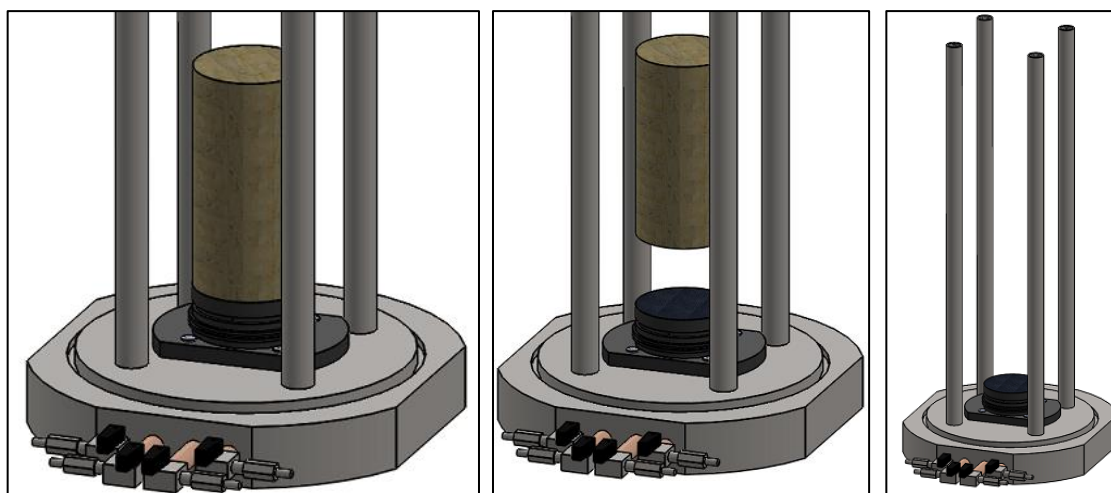
Paso 3: Retire suavemente la membrana, halando hacia arriba mientras sostiene la muestra en diferentes puntos y con fuerza leve para evitar que salga con la membrana. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 5.14.

Ilustración 5.14: Recuperación de una muestra paso 3.
Fuente: Propia



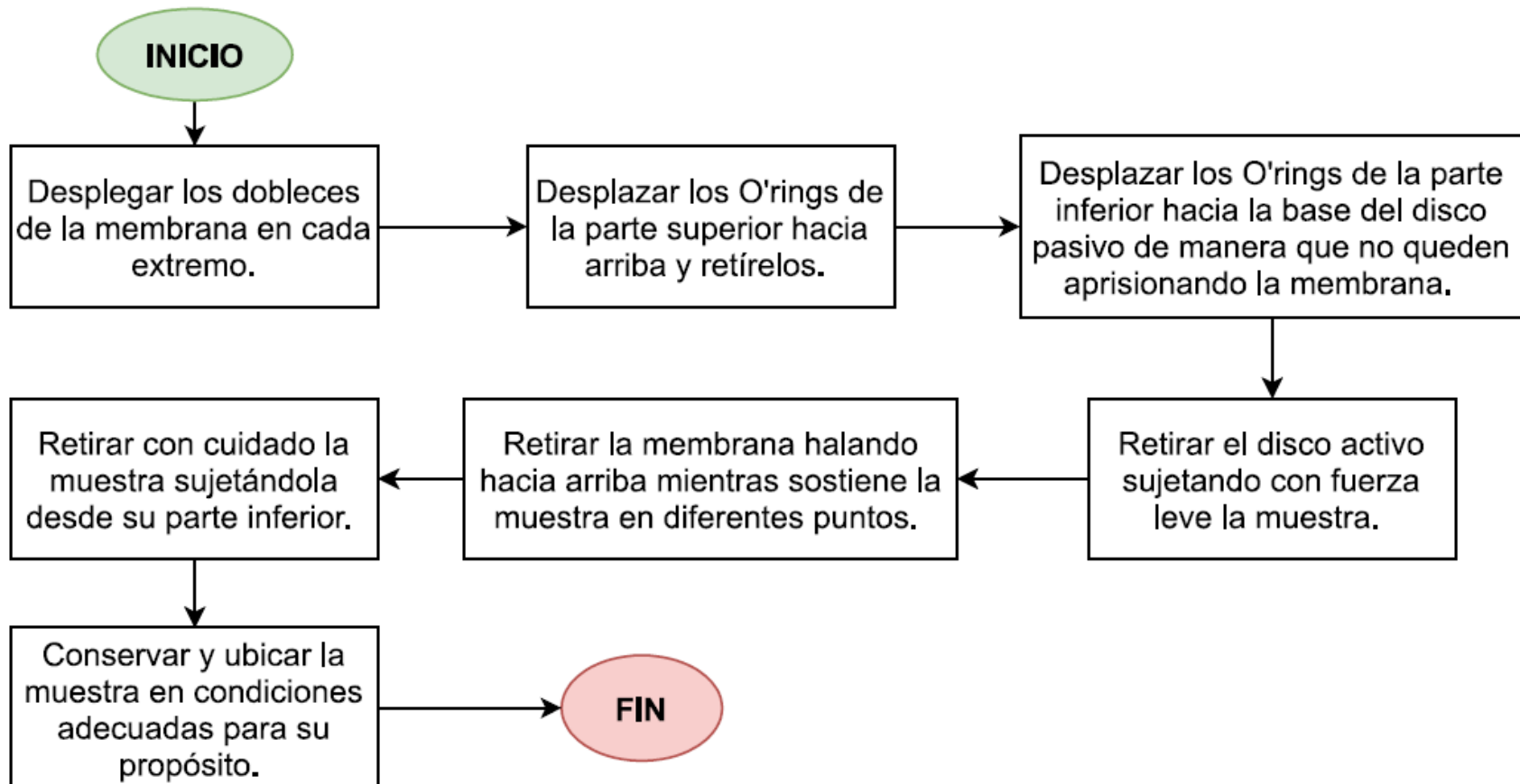
Paso 4: Retire con cuidado la muestra sujetándola desde su parte inferior, consérvela y ubíquela en condiciones adecuadas para su propósito. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 5.15.

Ilustración 5.15: Recuperación de una muestra paso 4.
Fuente: Propia



Una vez se culmina el procedimiento de recuperación de muestra, se da por terminado el desmonte del equipo TSH-100, se recomienda realizar una limpieza de cada una de las partes desmontadas usando estopa o un limpión, en ambos casos, completamente limpios. Esto se debe hacer debido a que durante el proceso de montaje es necesario lubricar algunas piezas ya sea con glicerina o con vaselina, para evitar fugas en la celda de presión. El Diagrama 2 presenta a modo de resumen el procedimiento a seguir para la recuperación de una muestra.

Diagrama 2: Recuperación de una muestra.
Fuente: Propia.



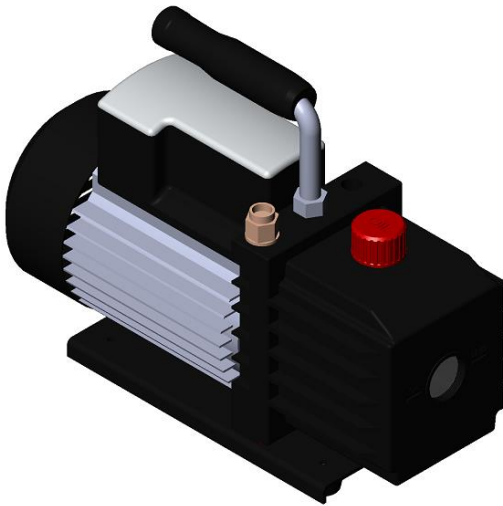
6. Montaje del equipo TSH-100

6.1. Montaje de una muestra en equipo TSH-100

6.1.1. Accesorios necesarios

Para realizar el montaje de una muestra en el equipo TSH-100, se hace necesario contar con algunos accesorios, el uso de estos accesorios resulta fundamental para que el montaje de la muestra se lleve a cabo de la manera adecuada. Algunos de estos accesorios dependen del diámetro de la muestra a usar, a continuación, se presentan de manera general los accesorios requeridos.

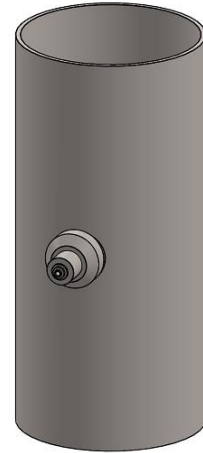
Bomba de vacío



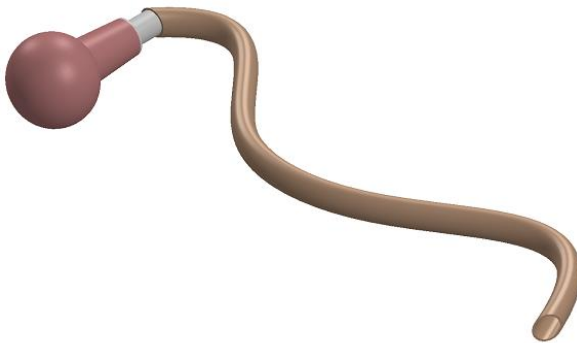
La bomba de vacío, es un equipo utilizado para extraer el aire contenido entre la membrana para la muestra y la cámara para el montaje, esto con el fin de evitar la existencia de burbujas de aire en la membrana y facilitar que se ajuste de manera correcta a las paredes internas de la cámara.

Cámara para montaje de muestra

Elemento cilíndrico hueco utilizado durante el montaje de la muestra para facilitar la colocación de la membrana alrededor del espécimen a ensayar. Cuenta con un orificio lateral en el cual se conecta una manguera plástica para la extracción del aire usando la bomba de vacío.



Manguera para extracción de aire



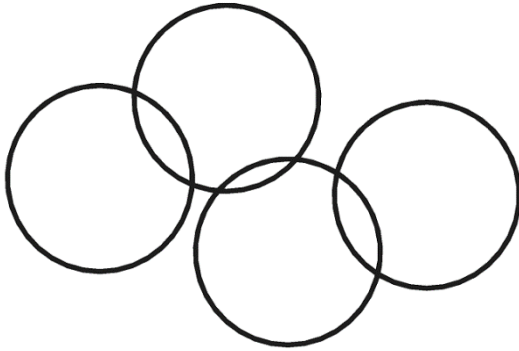
Manguera plástica usada durante el proceso de extracción de aire entre la cámara y la membrana. Cuenta con una pera de succión, para los casos en que no se cuente con una cámara de vacío.

Membrana para muestra

Membrana de caucho o látex, utilizada durante el ensayo para recubrir la muestra. El diámetro y longitud de la membrana, varían en función del diámetro de la muestra a ensayar.



O'rings



Anillos de caucho utilizados para asegurar la membrana que recubre la muestra, tanto al disco activo como al disco pasivo. Pueden usarse en muestras de diferentes diámetros, siempre y cuando su flexibilidad lo permita.

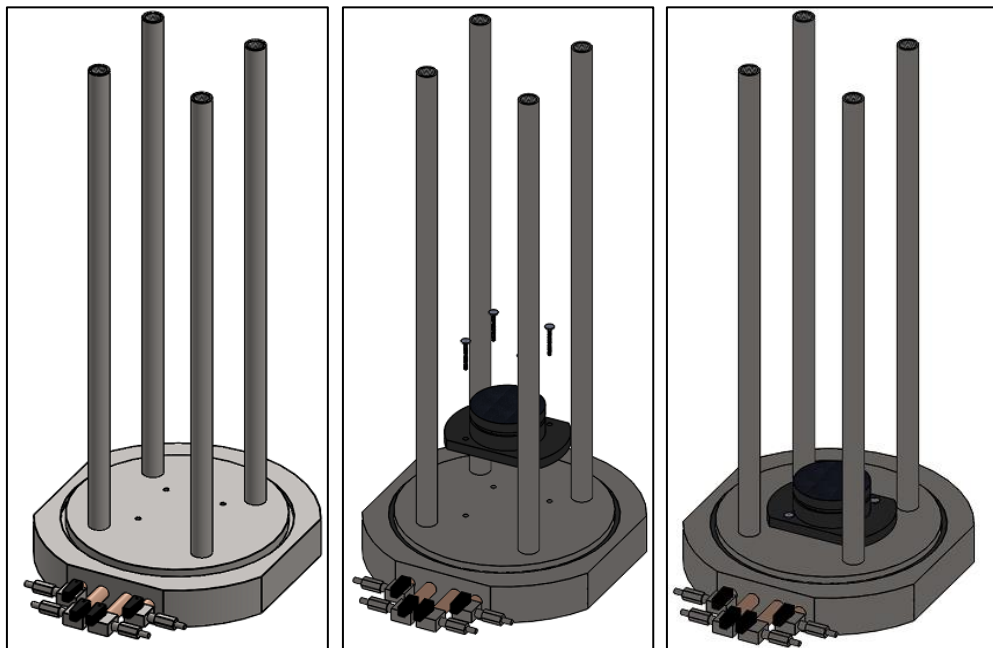
6.1.2. Procedimiento para montaje de una muestra

Antes de empezar con el procedimiento de montaje, se recomienda haber realizado los laboratorios de caracterización necesarios para un correcto reconocimiento del material de la muestra, laboratorios como contenido de agua, gravedad específica y límites de Atterberg serán útiles para posteriormente realizar relaciones de fase y obtener datos como contenido de agua y relación de vacíos iniciales, que son parámetros requeridos por el software CATS para iniciar el ensayo de columna resonante, esto en caso de que la muestra a ensayar sea un material arcilloso. Además, son parámetros importantes y necesarios para el ensayo, la altura, el peso y el diámetro de la muestra.

Una vez se cuente con los datos mencionados anteriormente, se puede proceder con el montaje de la muestra, a continuación, se presenta el procedimiento paso a paso y algunas recomendaciones para ello.

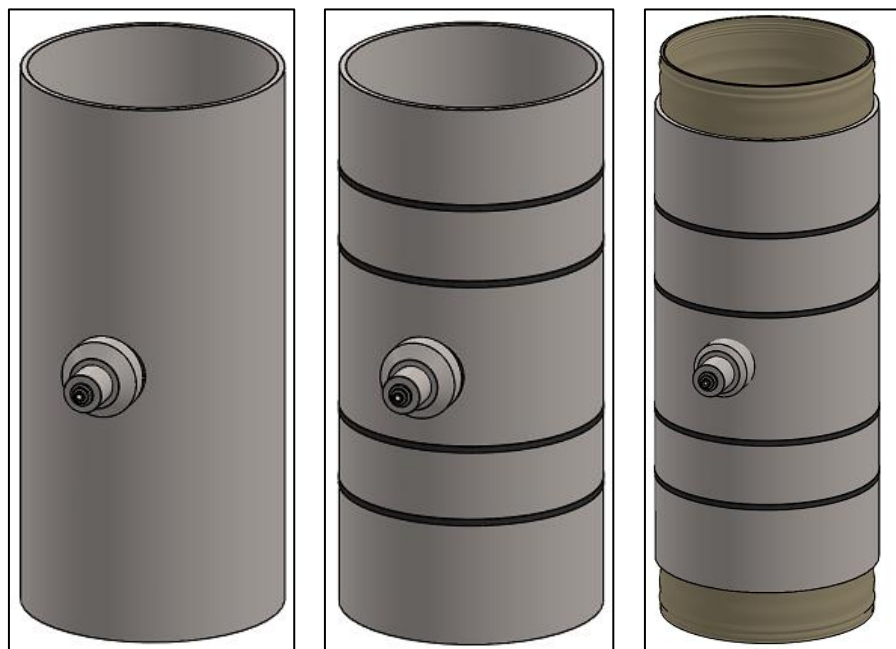
Paso 1: Seleccionar el disco pasivo adecuado para el diámetro de la muestra a ensayar y ubicarlo en la base fija. La universidad Santo Tomás cuenta con discos pasivos para muestras de 1.4” y 2.8” suministrados por el fabricante del equipo GCTS, adicionalmente, se cuenta con un disco pasivo para muestras con diámetro de 50 mm (aproximadamente 2.0”), que fue fabricado y donado por estudiantes. Se recomienda, por facilidad y comodidad desenroscar de la base fija los soportes que se considere necesarios para el montaje de la muestra. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 6.1

Ilustración 6.1: Procedimiento para montaje de muestra paso 1.
Fuente: Propia



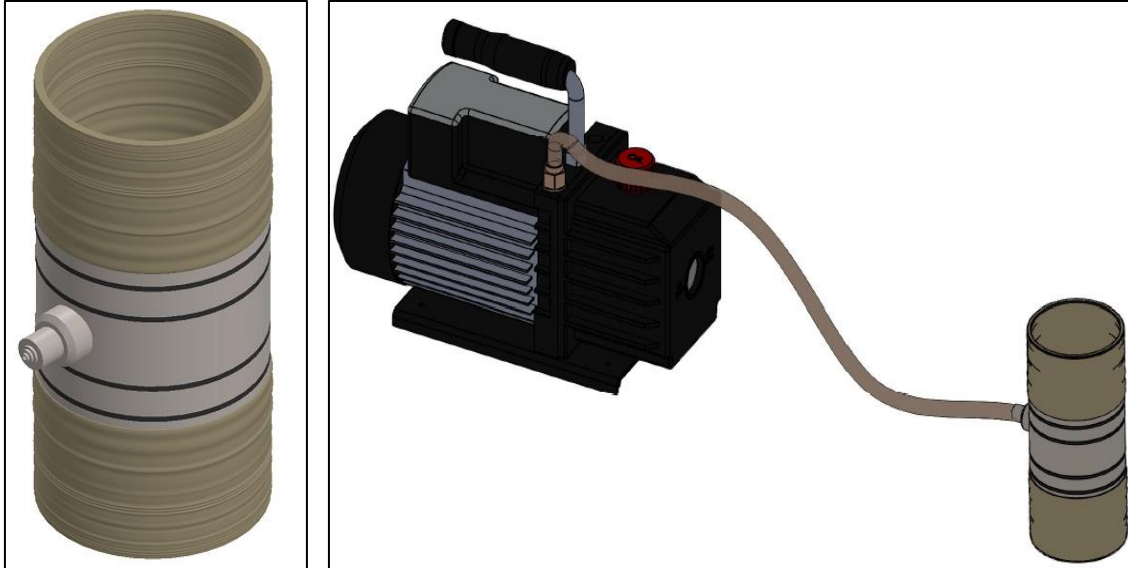
Paso 2: Seleccionar la cámara para montaje y la membrana más adecuada para el diámetro de la muestra a ensayar. Ubicar cuatro o’rings en la cámara para montaje, dos en la parte superior y dos en la parte inferior, luego ubique la membrana lo más centrado posible dentro de la cámara de manera que los excedentes en cada extremo sean aproximadamente iguales. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 6.2.

Ilustración 6.2: Procedimiento para montaje de muestra paso 2.
Fuente: Propia



Paso 3: Doble hacia afuera el excedente de la membrana en cada extremo de la cámara y conectae la bomba de vacío con la cámara a través de la manguera para extracción de aire. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 6.3.

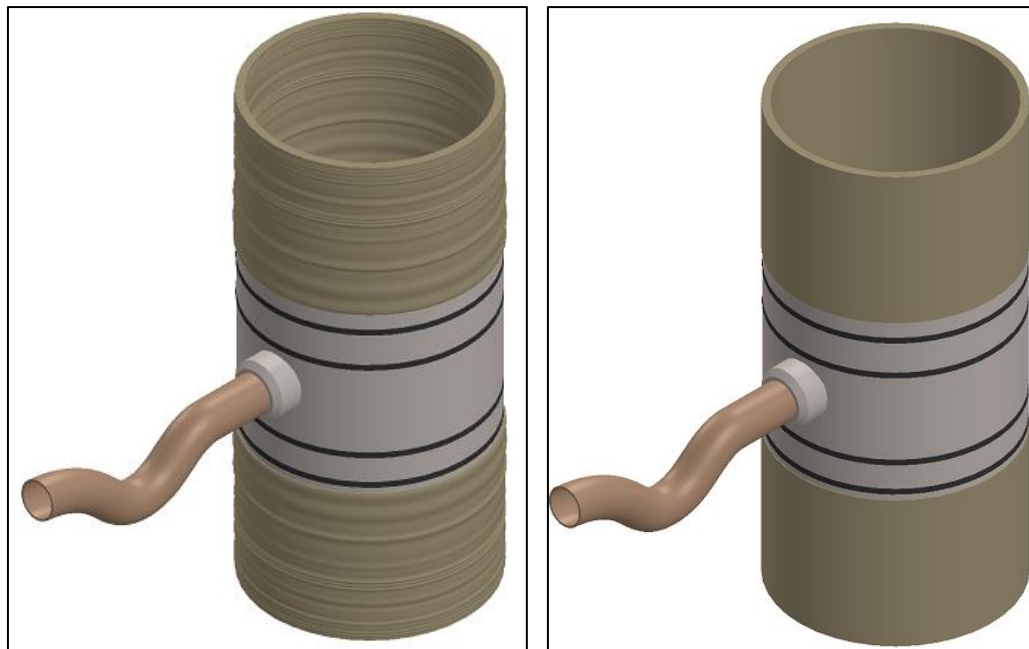
Ilustración 6.3: Procedimiento para montaje de muestra paso 3.
Fuente: Propia



Paso 4: Extraiga el aire atrapado entre la membrana y las paredes interiores de la cámara usando la bomba de vacío, asegurándose de que la membrana se adhiera completamente a las paredes internas de la cámara. Es importante que la membrana en la parte interior de la cámara no tenga ningún pliegue ni burbuja de aire, pues esto podría afectar los resultados al momento de ejecutar el ensayo. El procedimiento a seguir se presenta en la

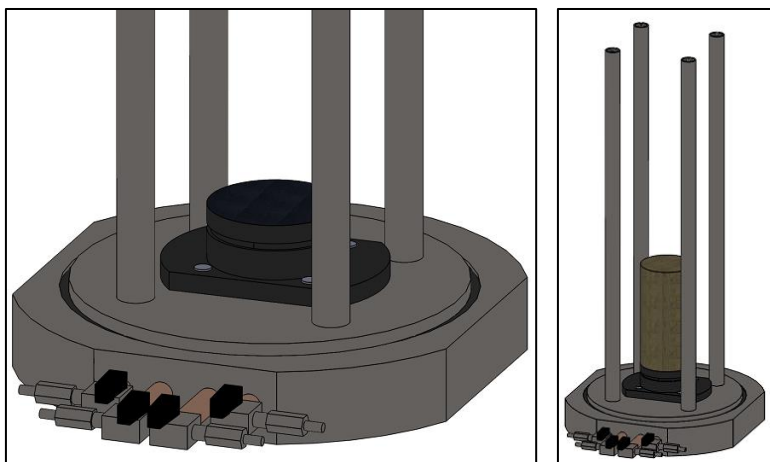
Ilustración 6.4

Ilustración 6.4: Procedimiento para montaje de muestra paso 4.
Fuente: Propia



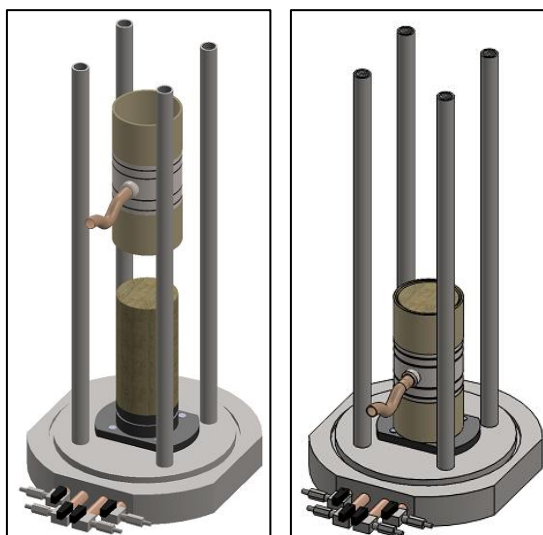
Paso 5: Ubicar la muestra de suelo a ensayar sobre el disco pasivo de manera que el labrado rugoso haga contacto directo con el espécimen. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 6.5

Ilustración 6.5: Procedimiento para montaje de muestra paso 5.
Fuente: Propia



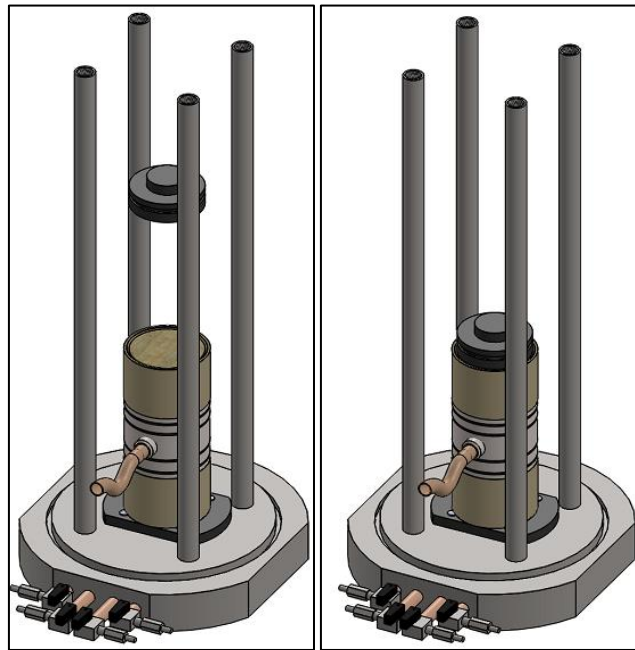
Paso 6: Hacer pasar cuidadosamente la cámara alrededor de la muestra, sin haber liberado la presión, evitando que las paredes la rocen, esto hasta que la cámara repose en el disco pasivo, tal como se presenta en la Ilustración 6.6.

Ilustración 6.6: Procedimiento para montaje de muestra paso 6.
Fuente: Propia



Paso 7: Ubicar el disco activo sobre la parte superior de la muestra y dentro de la cámara sin haber liberado aún la presión, tener cuidado de que al ubicar el disco activo, este no pise o genere algún pliegue en la membrana, pues esto podría afectar los resultados del ensayo. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 6.7

Ilustración 6.7: Procedimiento para montaje de muestra paso 7.
Fuente: Propia



Paso 8: Liberar la presión, apagando la bomba de vacío y retirando la manguera de la cámara, luego desdoble la membrana en cada extremo asegurándose de que los o’rings permanezcan en la cámara. Desplace los o’rings de la parte superior hacia el disco activo y los de la parte inferior al disco pasivo de manera que en ambos casos los o’rings aseguren la membrana al respectivo disco sin haber realizado ningún doblez, descuide los excedentes de la membrana en cada extremo. Puede ayudarse desplazando cuidadosamente hacia arriba o hacia abajo la cámara mientras ubica los o’rings. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 6.8.

Ilustración 6.8: Procedimiento para montaje de muestra paso 8.
Fuente: Propia



Paso 9: Retire la cámara, cuidando que no se rocen sus paredes internas con el montaje realizado previamente. Realice dobleces en los excedentes de la membrana en cada extremo, siempre hacia afuera, de manera que cubran los o’rings, asegurese de que en ningún caso la membrana sobrepase el cabezal del disco activo, pues no dejaría encajar la base del motor con el disco. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 6.9.

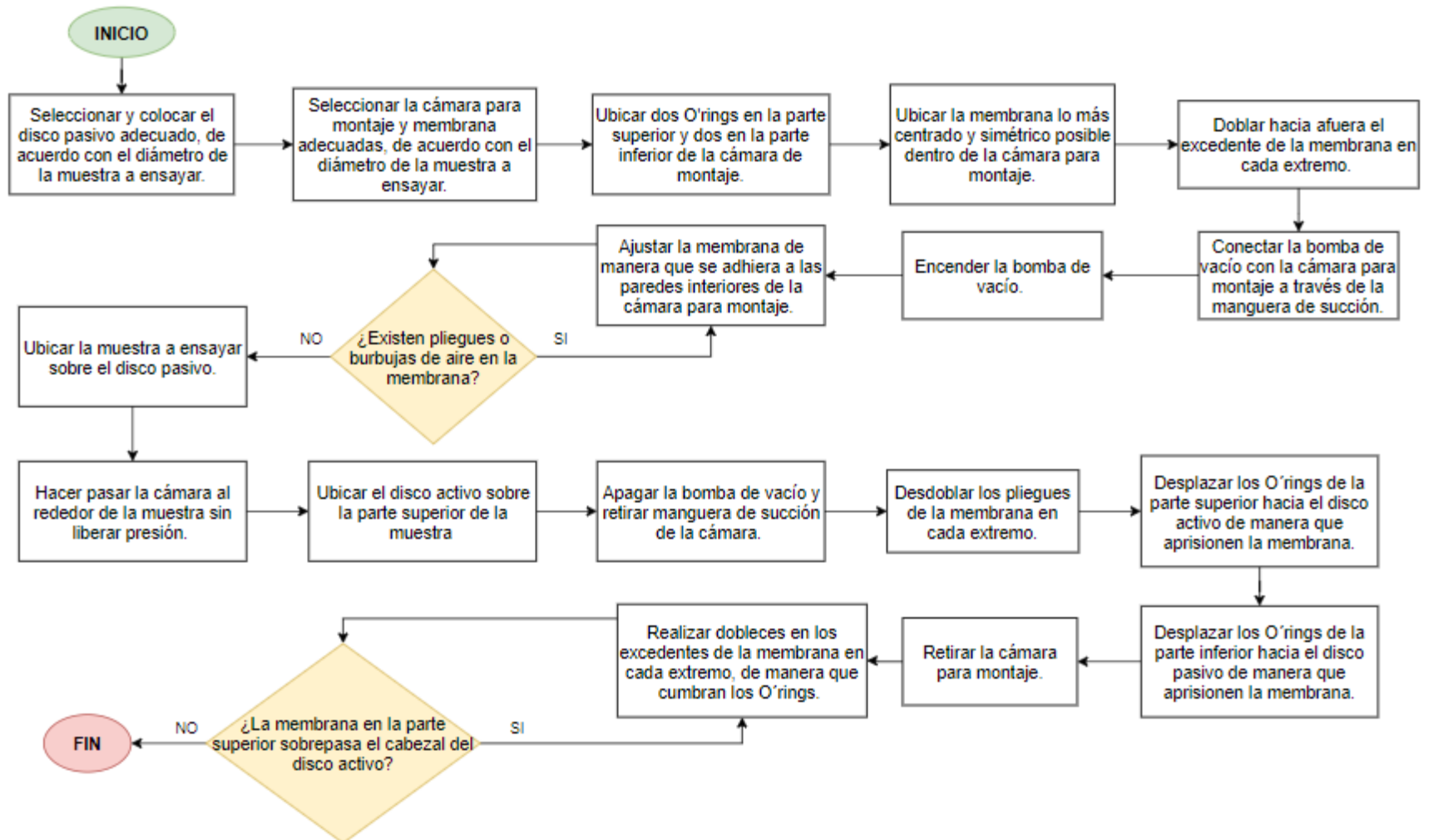
Ilustración 6.9: Procedimiento para montaje de muestra paso 9.
Fuente: Propia



Una vez realizado este paso se da por culminado el montaje de la muestra, se debe continuar con el montaje del equipo para poder realizar el ensayo de columna resonante. El Diagrama 3 presenta a modo de resumen el procedimiento a seguir para el montaje de una muestra.

Diagrama 3:Montaje de una muestra en el equipo TSH-100.

Fuente: Propia.

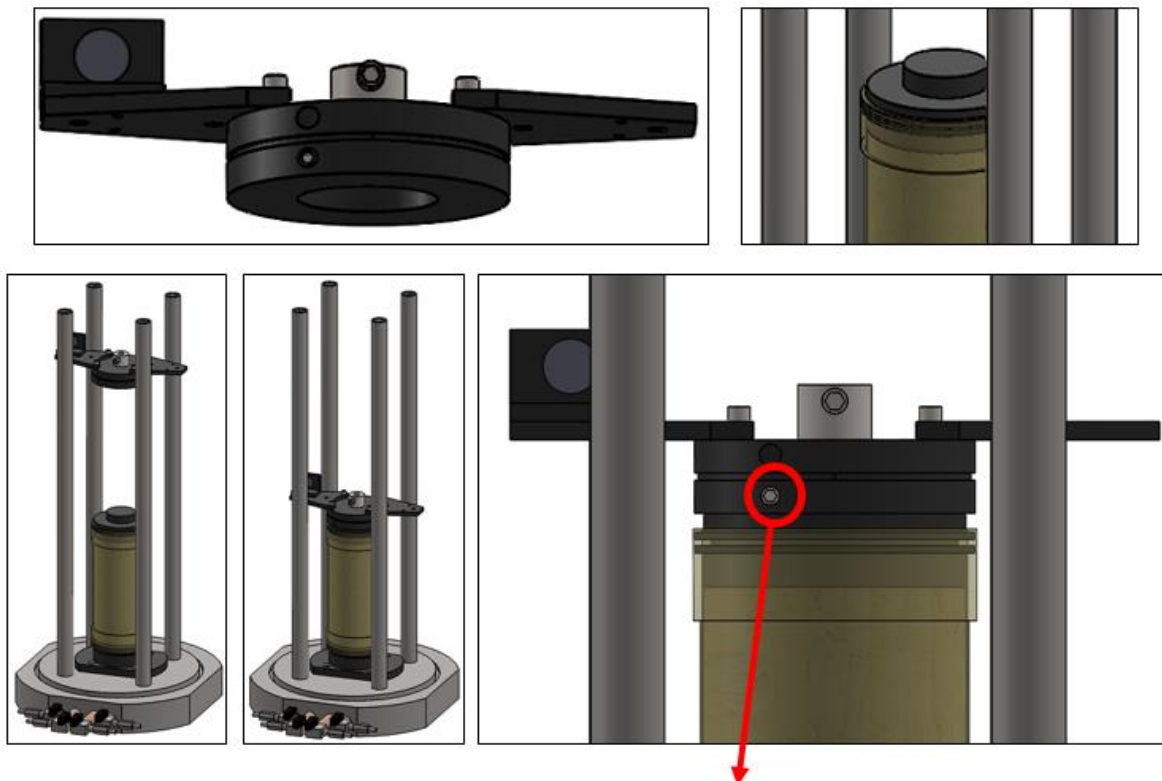


6.2. Posterior al montaje de la muestra

Si durante el procedimiento para montaje de la muestra retiró uno o más soportes de la base fija, colóquelos nuevamente, para continuar con el montaje del equipo, verifique que la fuente de alimentación esté totalmente apagada, de lo contrario apáguela y continúe.

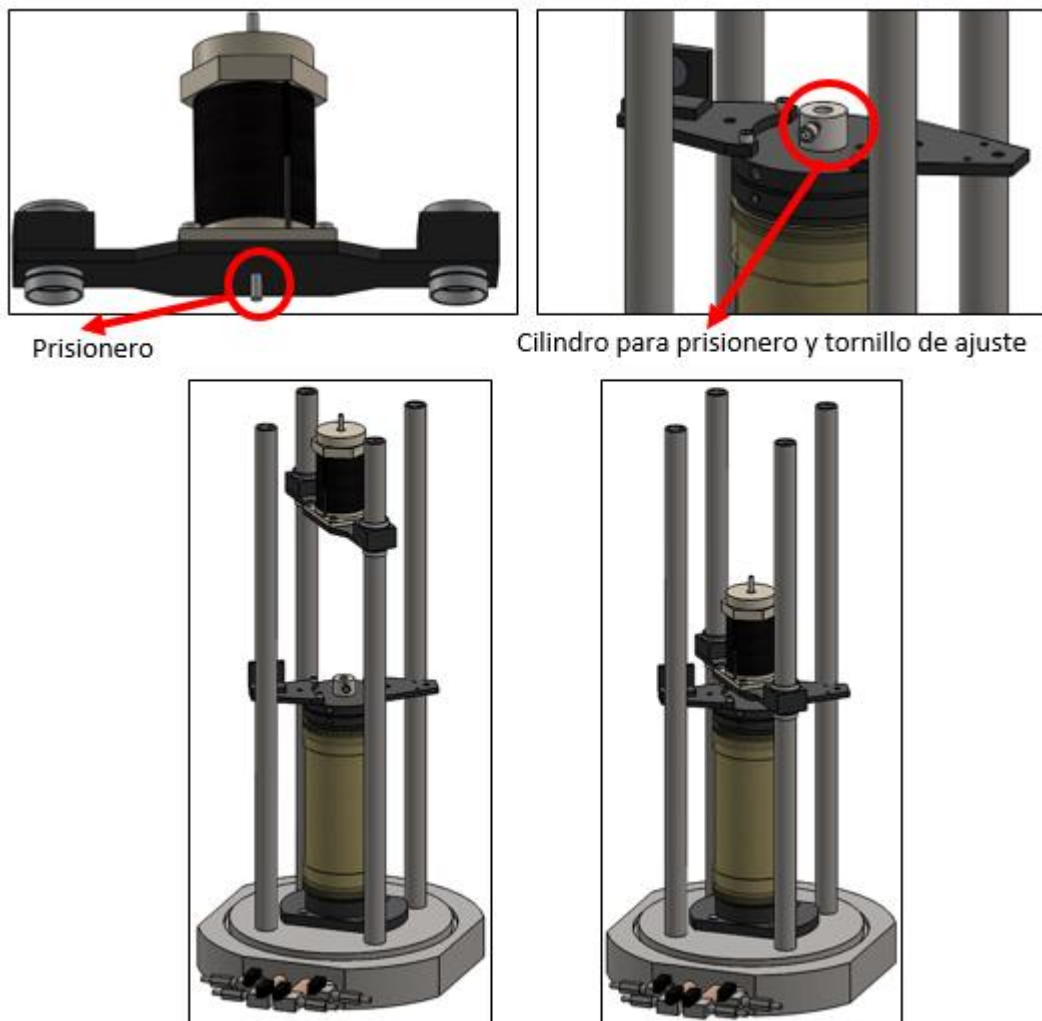
Paso1: Ubicar la base del motor de manera que el orificio de su parte inferior coincida y encaje con el cabezal del disco activo, una vez esté bien ubicado, ajustar con los tornillos Bristol que tiene la base en sus laterales, apretando con fuerza moderada. Es importante que la base no quede suelta, pues ésta transmitirá el torque desde el motor hasta el disco activo. El procedimiento descrito se presenta en la Ilustración 6.10.

Ilustración 6.10: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 1.
Fuente: Propia



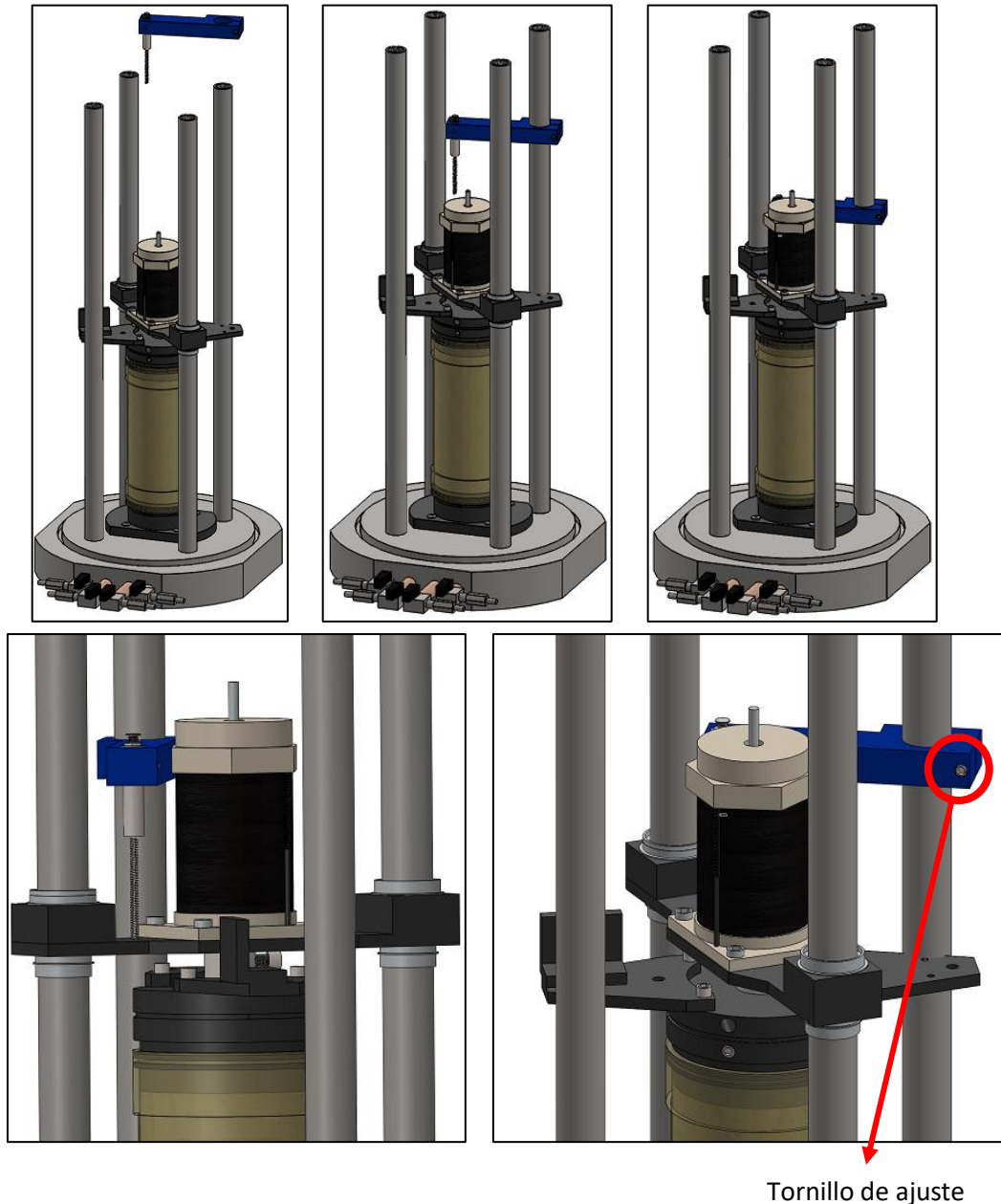
Paso 2: Ubicar el motor sobre la base, de manera que el prisionero (ubicado en la parte inferior del motor) coincida y encaje con el cilindro dispuesto en la base para este. Una vez esté bien ubicado, ajustar apretando el tornillo Bristol que sobresale del cilindro aplicando fuerza moderada. Es importante que el prisionero quede bien ajustado con la base ya que de esto depende la correcta transmisión del torque. El procedimiento descrito se presenta en la Ilustración 6.11.

Ilustración 6.11: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 2.
Fuente: Propia



Paso 3: Ubicar el sensor LVDT en cualquiera de los dos soportes de la base fija en los que no se ubicó el motor, bajarlo hasta que haga contacto con la platina del motor, una vez esté bien ubicado, ajustarlo apretando el tornillo Bristol ubicado en su costado. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 6.12

Ilustración 6.12: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 3.
Fuente: Propia



Paso 4: Ubicar la cubierta de conexiones teniendo como referencia el espejo ubicado en la base del motor, de tal manera que el soporte para el sensor de proximidad y el espejo queden uno en frente al otro, luego asegure la cubierta a los soportes de la base fija usando los tornillos Bristol. Una vez asegurada, ubique el sensor de proximidad en el agujero dispuesto en el soporte, de tal manera que entre el sensor y el espejo exista una distancia aproximada de 4 mm. El procedimiento a seguir se presenta en la Ilustración 6.13, el montaje del sensor de proximidad se presenta en la Ilustración 6.14

Ilustración 6.13: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 4.
Fuente: Propia

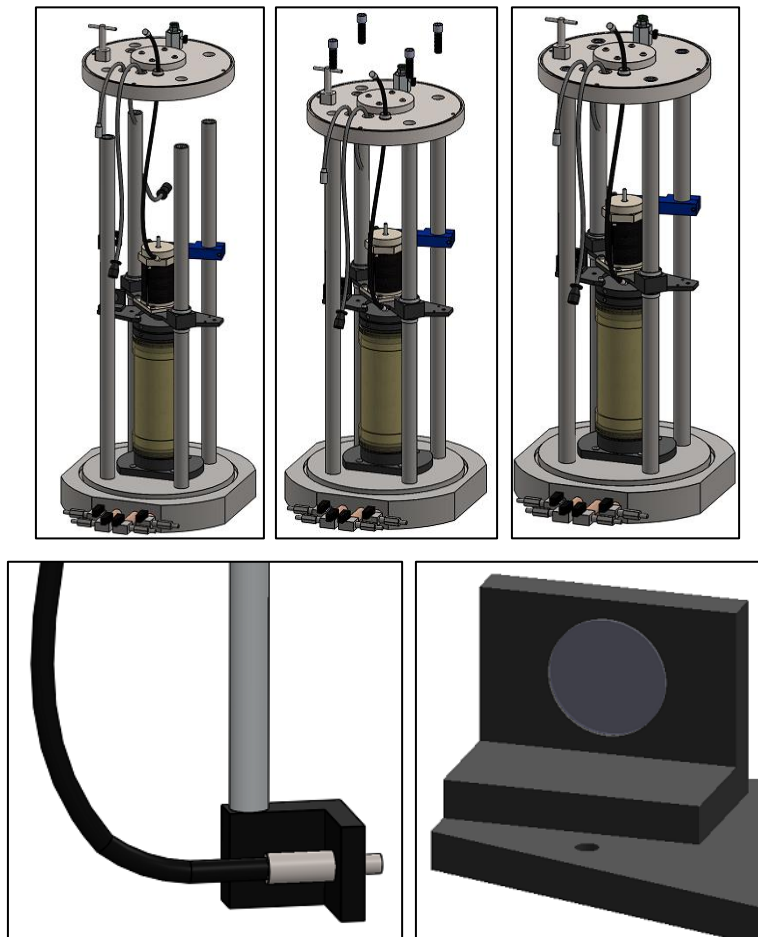
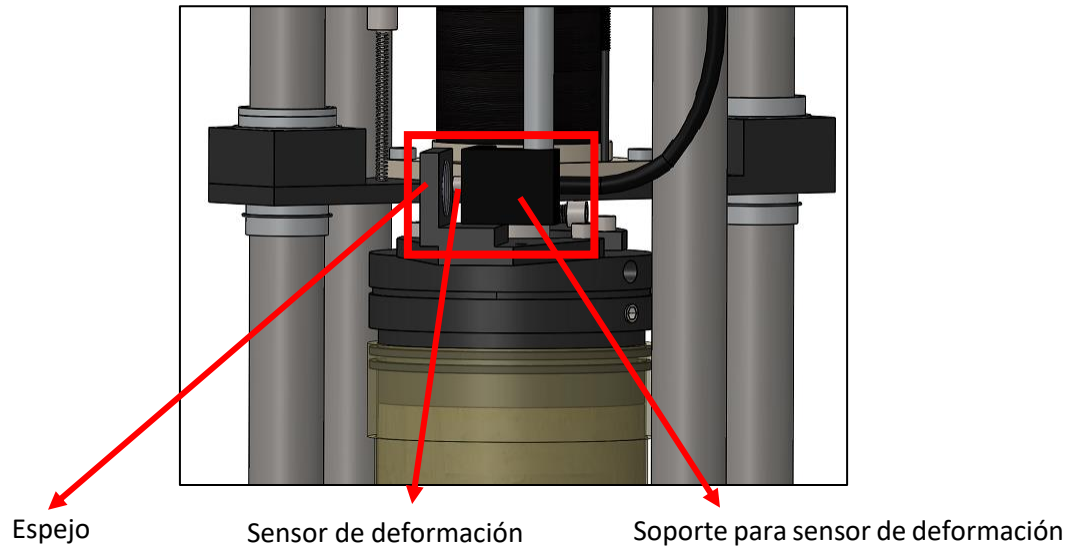


Ilustración 6.14: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 4 (Montaje del sensor de proximidad).
Fuente: Propia



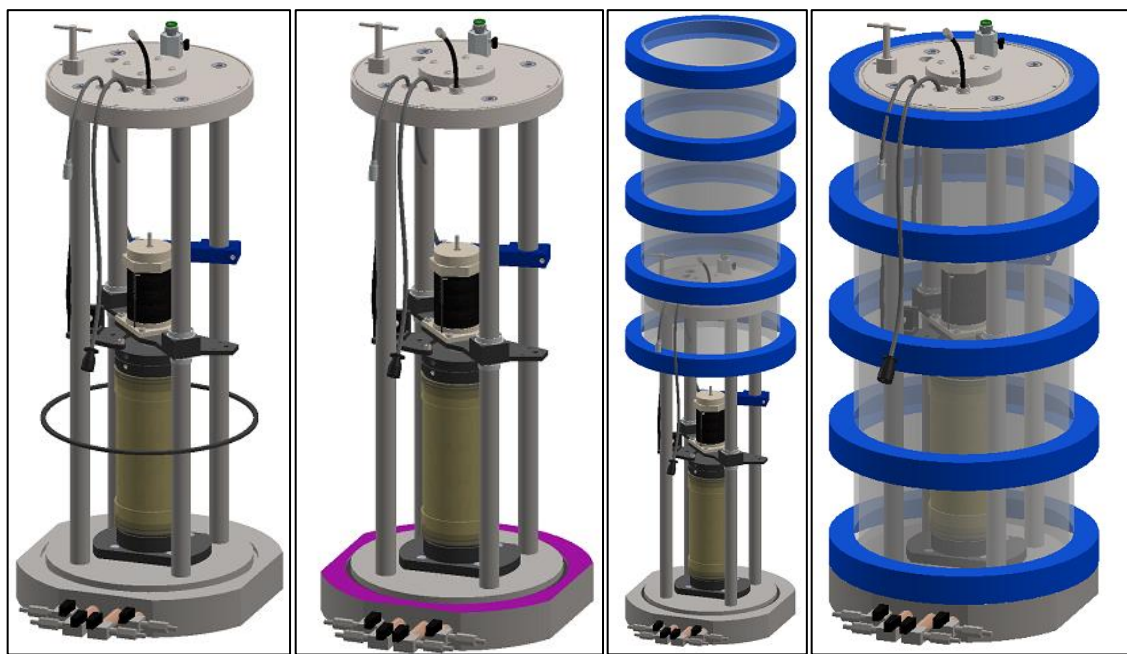
Paso 5: Realizar las conexiones interiores del motor y del sensor LVDT a la cubierta de conexiones, procurando que los cables no obstruyan el montaje ya realizado, para ello se recomienda hacer pasar los cables por fuera de los soportes de la base fija. Para realizar las conexiones se recomienda seguir el siguiente orden:

- ✓ Conector de sensor LVDT a conector de cubierta de conexiones con sensor LVDT
(1)
- ✓ Conector macho de motor a conector hembra de cubierta de conexiones (2A)
- ✓ Conector hembra de motor a conector macho de cubierta de conexiones (2B)

*Los números entre paréntesis son la representación de cada conector, como se presenta en la Ilustración 4.4, la Ilustración 4.5 y la Ilustración 4.7.

Paso 6: Colocar el empaque de la base fija y lubricar con glicerina o vaselina sobre la superficie dispuesta para el apoyo de la cámara, esto para garantizar que no existan fugas de aire al momento de realizar el ensayo. Luego, colocar la celda de presión teniendo cuidado especial con los cables que sobresalen de la cubierta de conexiones. La Ilustración 6.15 presenta el procedimiento a seguir, se presenta en color magenta la superficie a lubricar.

Ilustración 6.15: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 6
Fuente: Propia



Paso 7: Colocar el empaque de la cubierta de conexiones y lubricar con vaselina o glicerina la zona dispuesta para la colocación del anillo superior. Luego, colocar el empaque al anillo superior y lubricar con vaselina o glicerina la superficie que tendrá contacto directo con la cubierta de conexiones, una vez ubicado el anillo, asegurarlo con tornillos Bristol. La Ilustración 6.16 presenta el procedimiento a seguir, se presentan en color magenta las superficies a lubricar.

Ilustración 6.16: Procedimiento posterior al montaje de muestra paso 7
Fuente: Propia



Paso 8: Realizar las conexiones exteriores del sensor de proximidad, del motor, del compresor de aire y del sensor LVDT, se recomienda seguir el siguiente orden:

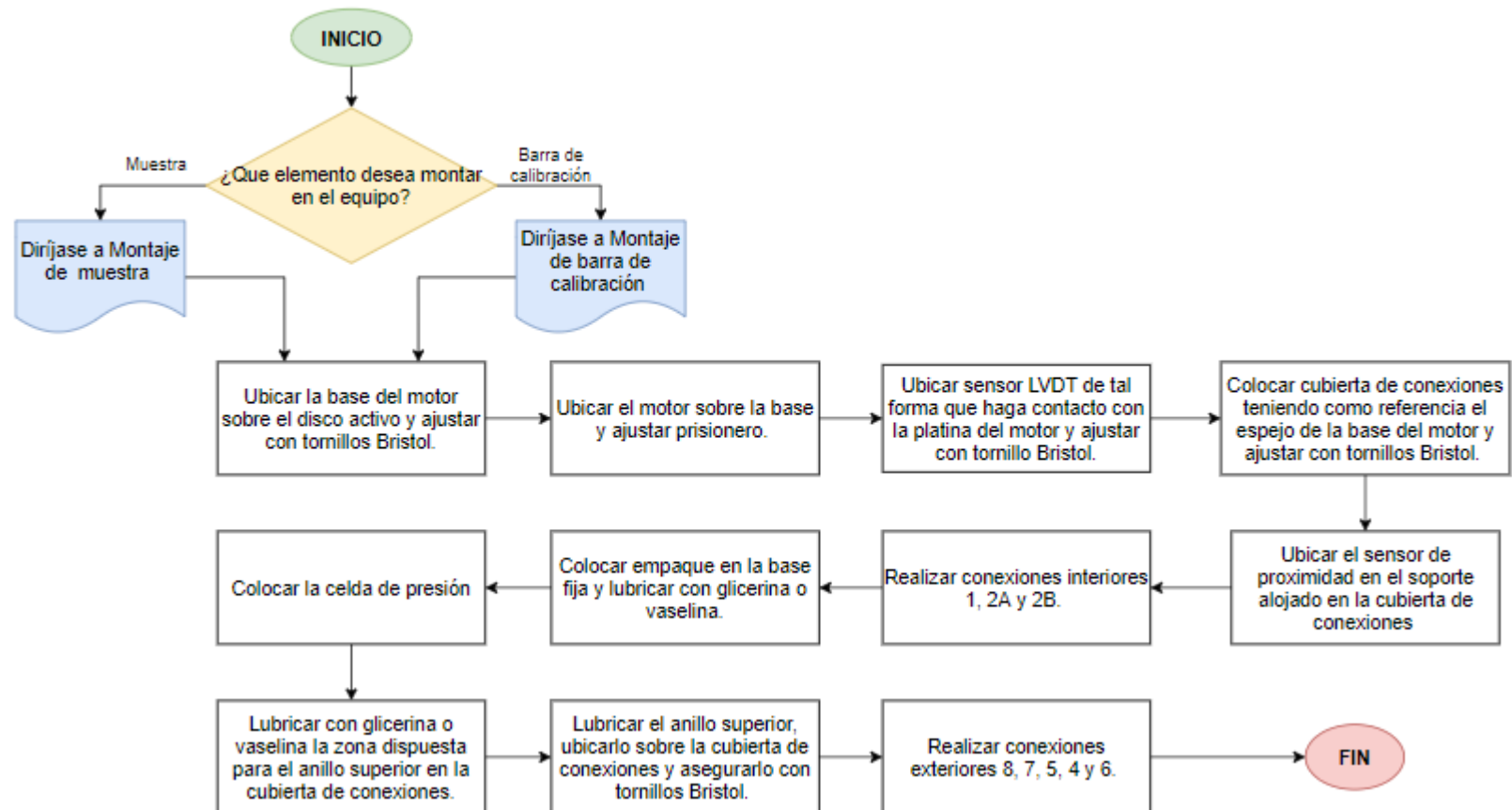
- ✓ Conector del sensor LVDT a fuente de alimentación (8).
- ✓ Conector para compresor de aire (7).
- ✓ Conector de motor con fuente de alimentación (datos) (5).
- ✓ Conector del sensor de proximidad a la fuente de alimentación (4).
- ✓ Conector de motor con fuente de alimentación (energía) (6).

Una vez realizado este paso, se da por terminado el montaje del equipo y se puede proceder a realizar el ensayo de columna resonante. El Diagrama 4 presenta a modo de resumen el procedimiento a seguir para el montaje del equipo.

En el Anexo A de este documento se presenta registro fotográfico del procedimiento para el montaje de una muestra y posterior a este en el equipo TSH-100.

*Los números entre paréntesis son la representación de cada conector, presentados en la Ilustración 4.8.

Diagrama 4: Montaje del equipo TSH-100.
Fuente: Propia.



*Los números en los procesos, son la representación de cada conector, como se presenta en la Ilustración 4.4 (conexiones interiores), la Ilustración 4.5, la Ilustración 4.7 y la Ilustración 4.8 (conexiones exteriores).

7. Procedimiento experimental en el equipo TSH-100

Para la realización del ensayo de columna resonante en el equipo TSH-100 se debe realizar el montaje de una muestra de acuerdo con el procedimiento explicado en el apartado **Montaje de una muestra en equipo TSH-100** y posteriormente dirigirse al software CATS Standard de GCTS para desde allí realizar el ensayo y obtener resultados.

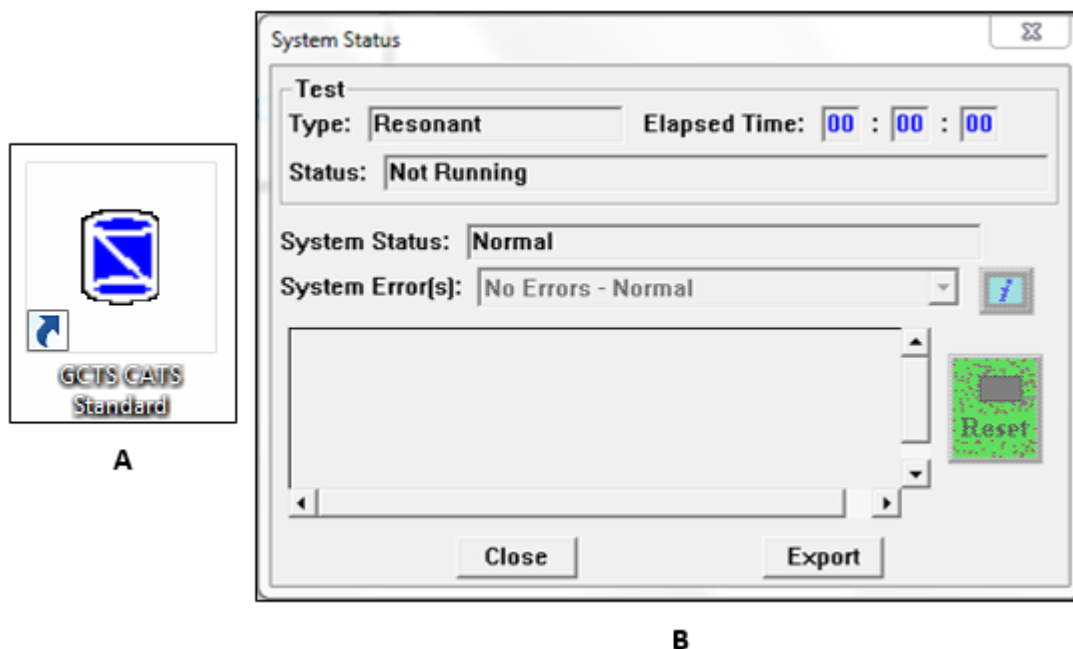
Antes de iniciar el ensayo, es necesario contar con los datos de contenido de agua, grado de saturación, gravedad específica, relación de vacíos y tipo de material de la muestra a ensayar, así como datos de la geometría del espécimen como diámetro y altura, también debe conocerse la masa de la muestra. En el Anexo C de este documento se presenta un formato sugerido para el registro de datos antes, durante y después del ensayo de columna resonante.

7.1. Procedimiento en software CATS de GCTS

Una vez realizado el montaje de la muestra en el equipo TSH-100, debe ingresarse al software CATS standard el cual una vez se ejecute dará un informe del estado de los componentes electrónicos del equipo y del estado del sistema e informará de cualquier error. En caso de presentar algún error, el software advertirá en qué componente se encuentra el error y este deberá corregirse para poder continuar con el ensayo. En caso de que no se encuentre ningún error, el software permitirá la continuidad del ensayo y presentará la ventana mostrada en la Ilustración 7.1.

Ilustración 7.1: A) Ícono del software CATS Standard; B) Estado del sistema en software CATS de GCTS.

Fuente: Propia



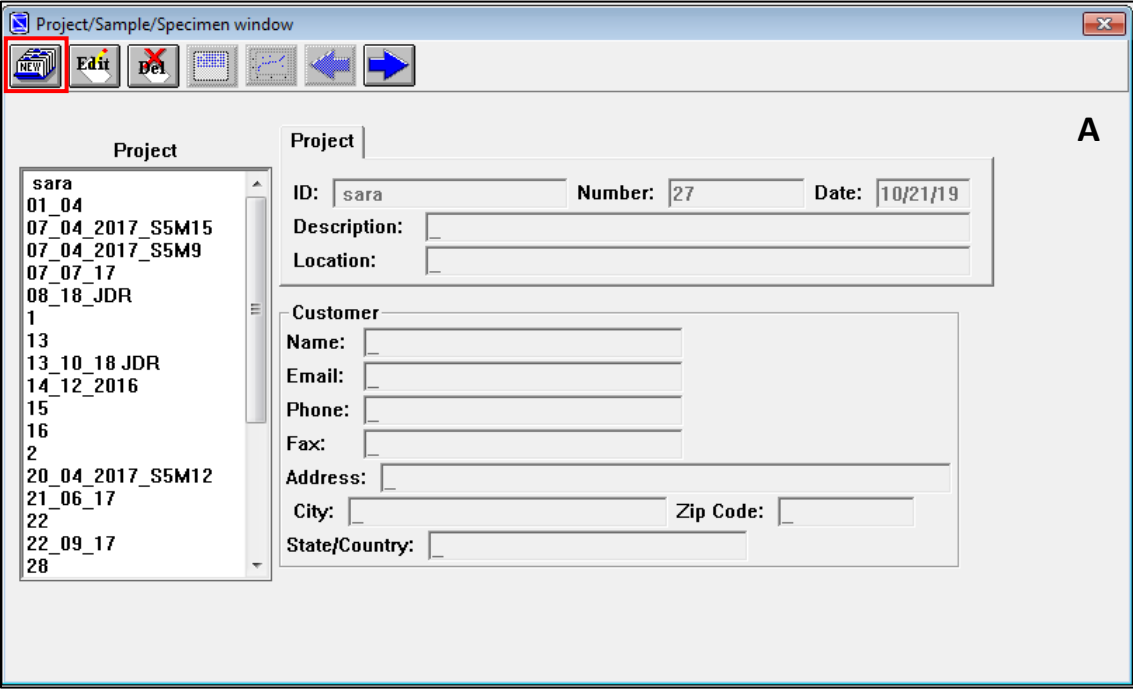
Paso 1: Para iniciar un ensayo, es necesario crear un nuevo proyecto, los proyectos dentro del software funcionan como carpetas en las cuales es posible guardar varios ensayos de una o más muestras con las mismas o diferentes características de ensayo. Para la creación de un nuevo proyecto debe dirigirse a la cinta de opciones y seguir la ruta **File/Projects** la cual abrirá la ventana presentada en la

Ilustración 7.2 A, en esta ventana se presentan todos los proyectos creados con anterioridad y desde allí se pueden crear nuevos proyectos e ingresar a los  ya creados. Otra opción, es acceder mediante el ícono rápido  ubicado en la barra de herramientas superior del software, al dar click sobre este se abrirá la ventana para la creación de proyectos/muestras/especímenes. Para la creación de un nuevo proyecto debe seleccionar la opción **New**, la cual permitirá la edición de la pestaña **Project**, presentada en la

Ilustración 7.2 B y le permitirá la creación del nuevo proyecto, en esta pestaña, el único campo obligatorio es el ID, sin embargo se recomienda completar los demás campos para tener una mejor identificación del proyecto.

Ilustración 7.2: Ventana de proyectos.
Fuente: Propia

A



Project/Sample/Specimen window

NEW Edit Del [Grid Icon] [Chart Icon] [Left Arrow] [Right Arrow]

Project

sara
01_04
07_04_2017_S5M15
07_04_2017_S5M9
07_07_17
08_18_JDR
1
13
13_10_18_JDR
14_12_2016
15
16
2
20_04_2017_S5M12
21_06_17
22
22_09_17
28

Project

ID: sara Number: 27 Date: 10/21/19

Description:

Location:

Customer

Name:

Email:

Phone:

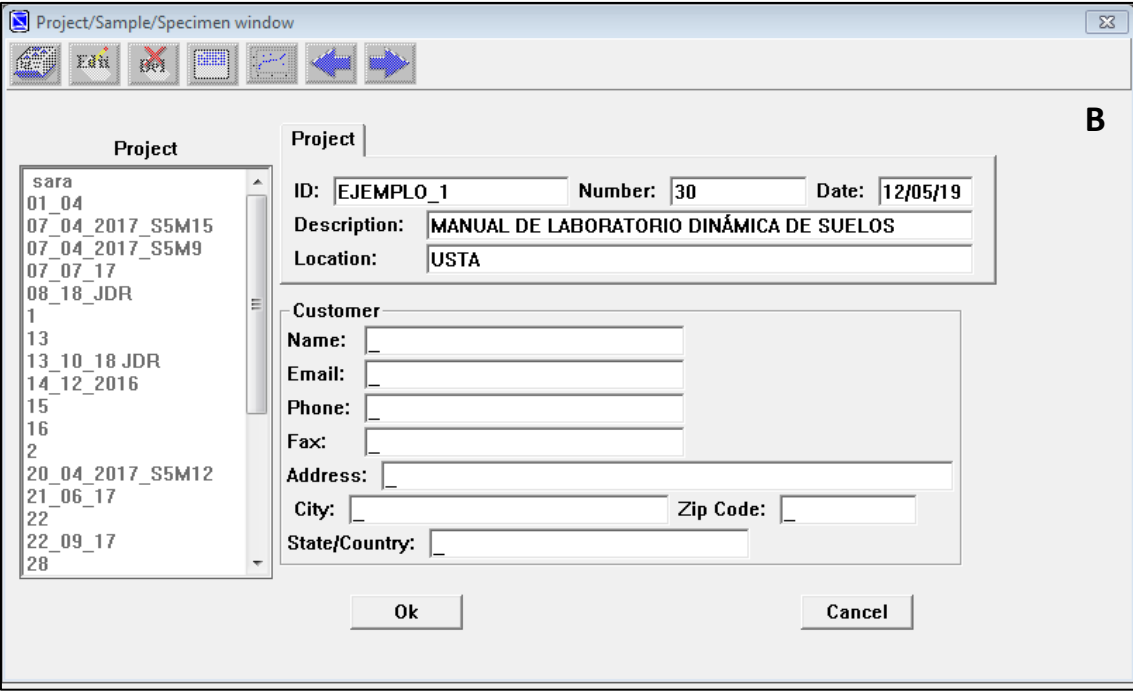
Fax:

Address:

City: Zip Code:

State/Country:

B



Project/Sample/Specimen window

NEW Edit Del [Grid Icon] [Chart Icon] [Left Arrow] [Right Arrow]

Project

sara
01_04
07_04_2017_S5M15
07_04_2017_S5M9
07_07_17
08_18_JDR
1
13
13_10_18_JDR
14_12_2016
15
16
2
20_04_2017_S5M12
21_06_17
22
22_09_17
28

Project

ID: EJEMPLO_1 Number: 30 Date: 12/05/19

Description: MANUAL DE LABORATORIO DINÁMICA DE SUELOS

Location: USTA

Customer

Name:

Email:

Phone:

Fax:

Address:

City: Zip Code:

State/Country:

Ok Cancel

Al crear un nuevo proyecto, la pestaña Project se divide en dos partes, una parte correspondiente a información del proyecto y la otra correspondiente a la información del cliente, completar los campos de esta última es opcional. En cuanto a la información del proyecto, el único campo que se debe completar necesariamente es el ID, el cual no debe contener ninguno de los siguientes caracteres; /, *,", <, >, |, o \.

Paso 2: Una vez creado el nuevo proyecto, debe procederse con la creación de una nueva muestra, el software CATS interpreta las palabras Sample y Specimen como dos términos diferentes, entendiendo el término Sample como la muestra tomada en campo, con sus condiciones naturales y el Specimen como una parte de la muestra tomada para realizar un ensayo. Para la creación de una nueva muestra, estando en la pestaña **Project**, dar click en la opción **New** y completar los datos que allí se solicitan. La ventana de muestras se presenta en la Ilustración 7.3.

Ilustración 7.3: Ventana de muestra.
Fuente: Propia

La ventana de muestra se divide en dos partes, una parte correspondiente a información general de la muestra, como su identificación (ID), descripción, fecha de extracción, etc. Y la otra, información acerca de la perforación y profundidad de extracción de la muestra, para introducir la profundidad de extracción existen dos opciones, mediante un único valor en la opción **Sample Depth** y mediante los límites máximos y mínimos de profundidad en las opciones **Max** y **Min** respectivamente, si se opta por la segunda opción, el software calculará la profundidad como el promedio entre los dos límites.

Paso 3: Una vez creada la muestra, debe procederse con la creación de un nuevo espécimen, como ya se mencionó, el espécimen hace parte de la muestra creada con anterioridad, para la creación de un nuevo espécimen debe darse click en **New** y completar los campos requeridos. Es posible avanzar o retroceder entre las pestañas Project/Sample/Specimen usando los íconos de avanzar y retroceder.



La

ventana de espécimen se presenta en la Ilustración 7.4.

Ilustración 7.4: Ventana de espécimen.

Fuente: Propia

Project/Sample/Specimen window

Specimen

Project Sample Specimen

ID: MUESTRA_1_0.5PFS Number: 001 Date: 12/05/19

Description:

Container ID:

Information Results

Resonant Column/Torsional Shear Test Specimen Information

Height: (mm) Top Specimen cap: Other

Mass: (gr) MPMI of Specimen cap: 0 (kg-mm²)

Type: ☒ Solid ☐ Hollow Initial Water Content: 0 (%)

Diameter: 0 (mm) Degree of Saturation: 0 (%)

Equivalent Radius Factor: 0 Specific Gravity: 0

Material Type Other Type: Medium Initial Void Ratio: 0

Ok Cancel

Se recomienda nombrar el espécimen de tal manera que sea posible distinguirlo de otros especímenes de la misma muestra, una opción puede ser nombrarlo incluyendo la magnitud del torque que se aplicará en el ensayo.

La opción **Top Specimen Cap**, se refiere al diámetro del disco activo y la opción **MPMI of Specimen cap** al momento de inercia del disco activo, para completar este campo existen dos opciones, la primera, seleccionando el disco activo de la lista desplegable, el software tiene guardados los momentos de inercia de cada uno de los discos allí disponibles, los cuales se presentan en la Tabla 7.1. La segunda opción es ingresar de forma manual el momento polar de inercia del disco activo, cuando se use esta opción se debe considerar que al valor calculado se le deben sumar 80.2 kg*mm² correspondientes al anillo que permite el acoplamiento del motor y el disco activo. En caso de utilizar los discos de 50 mm de diámetro, adaptados y donados por los estudiantes de maestría Jon Páez y Luis Díaz, el valor a introducir en dicho campo debe ser 204.11 kg*mm².

Tabla 7.1: Discos activos disponibles por defecto en el software CATS.
Modificado de: (GCTS , 2007)

Tamaño del disco		Momento polar de inercia (I)
"	mm	kg*mm ²
Especímenes sólidos		
2.8	71.1	214.0
2.76	70.0	206.7
2.0	50.8	118.0
1.5	38.1	94.9
1.4	35.6	92.3
Especímenes huecos		
2.8	71.1	376.0

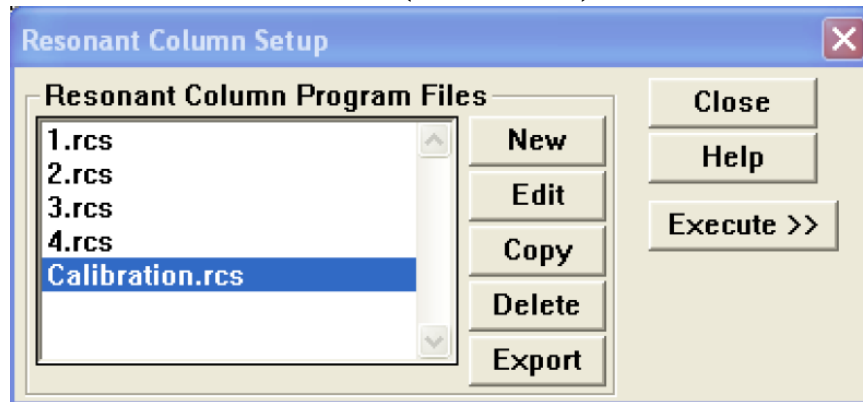
El campo **Equivalent Radius Factor**, corresponde al factor del diámetro que será usado para los cálculos de esfuerzo cortante, este es un valor adimensional y por defecto es $\frac{\sqrt{2}}{2}$ o 0.707.

Los campos **Initial Water Content**, **Degree of saturation**, **Specific Gravity** e **Initial Void Ratio**, son campos opcionales y en el caso de no conocerlos, se puede colocar 0 como valor.

No se requiere gravedad específica cuando valores de contenido de agua y relación de vacíos son suministrados. Si los valores de gravedad específica y contenido de agua se suministran, no es necesario completar el campo de relación de vacíos.

Paso 4: Una vez seleccionado el espécimen para el ensayo, el siguiente paso es crear o seleccionar una configuración de prueba para el ensayo. En la configuración de prueba para el ensayo se establecen el rango de frecuencias en el que será ensayada la muestra, el paso de frecuencia, el número de ciclos, la magnitud del torque a aplicar y la máxima deformación por corte esperada. El software tiene grabada una lista de configuraciones para seleccionar, sin embargo, el usuario puede crear nuevas configuraciones o editar las ya existentes. La ventana de configuración de prueba se presenta en la Ilustración 7.5, para crear una nueva configuración, hacer click en **New**, para editar una configuración ya existente seleccionar **Edit**, para crear una nueva configuración con base en una ya existente seleccionar **Copy**, para borrar una configuración debe seleccionarse y dar click en **Delete** y para exportar datos de una configuración desde un archivo externo, seleccionar **Export**.

Ilustración 7.5: Ventana de configuración de prueba.
Fuente: (GCTS , 2007)



En caso de crear o editar una configuración de prueba, se abrirá la ventana de edición de configuración de pruebas, presentada en la Ilustración 7.6 en esta ventana se editarán o establecerán, el rango o barrido de frecuencia, el cual se compone de dos frecuencias, la frecuencia de inicio y la frecuencia de parada y establece a qué frecuencias se ensayará el espécimen, es posible asignar barridos de frecuencia crecientes y decrecientes, de igual manera se puede probar una única frecuencia, esto asignando a la frecuencia de inicio y frecuencia de parada el mismo valor con un paso de frecuencia igual a cero.

También se establecerá el paso de frecuencia, el cual es el incremento o disminución que habrá partiendo desde la frecuencia de inicio hasta la frecuencia de parada, en caso de querer un barrido de frecuencia decreciente, no es necesario asignar un paso negativo, bastará con asignar a la frecuencia de inicio un valor mayor que el de la frecuencia de parada. Para el ensayo de columna resonante, es posible ensayar un máximo de 101 frecuencias separadas, por lo que es importante tener en cuenta el paso que se asigna en función del rango de frecuencias para que la configuración sea válida. El valor mínimo del paso de frecuencia es 0.01 Hz.

Por ejemplo, si se selecciona como frecuencia de inicio 10 Hz y como frecuencia de parada 110 Hz, el usuario deberá asignar un paso de frecuencia de 1 Hz para que de esta forma las frecuencias ensayadas sean 100 y varíen de la siguiente forma: 11 Hz, 12 Hz, ..., 109 Hz y 110 Hz.

Ilustración 7.6: Ventana de edición de configuración de pruebas.

Fuente: Propia

The screenshot shows a software window titled "Resonant Column Setup Program window". Inside, there is a section titled "Resonant Column Setup Program" which contains a "Test Program" sub-section. The "Test Program" section has two input fields: "ID:" with the value "1.20PFS" and "Description:" with the value "1.20PFS". Below this is a "Frequency Sweep:" section with three input fields: "Start:" (20.00 Hz), "Stop:" (120.00 Hz), and "Frequency Step:" (1.00 Hz). Further down are two more input fields: "Number of Cycles to Obtain Steady State:" (10) and "Torque Output Amplitude to drive System:" (1.20 pfs). At the bottom is an input field for "Maximum Expected Shear Strain:" (0.100 %). On the right side of the window, there are three buttons: "Ok", "Cancel", and "Save Objects".

El número de ciclos establece cuántos ciclos se completarán para cada frecuencia hasta alcanzar el estado estacionario, el número de ciclos para obtener el estado estacionario está limitado a no menos de 6 y tiene un valor predeterminado de 10 ciclos. (GCTS , 2007)

El campo de Torque de salida corresponde al torque que aplicará el sistema de columna resonante al espécimen durante el ensayo, “la unidad que utiliza el equipo para la configuración de Torque se denomina *Percent Full Scale* (pfs) y 1 pfs equivale a 0.023 N*m permitiendo un máximo de 200 pfs”. (Páez & Díaz , 2019)

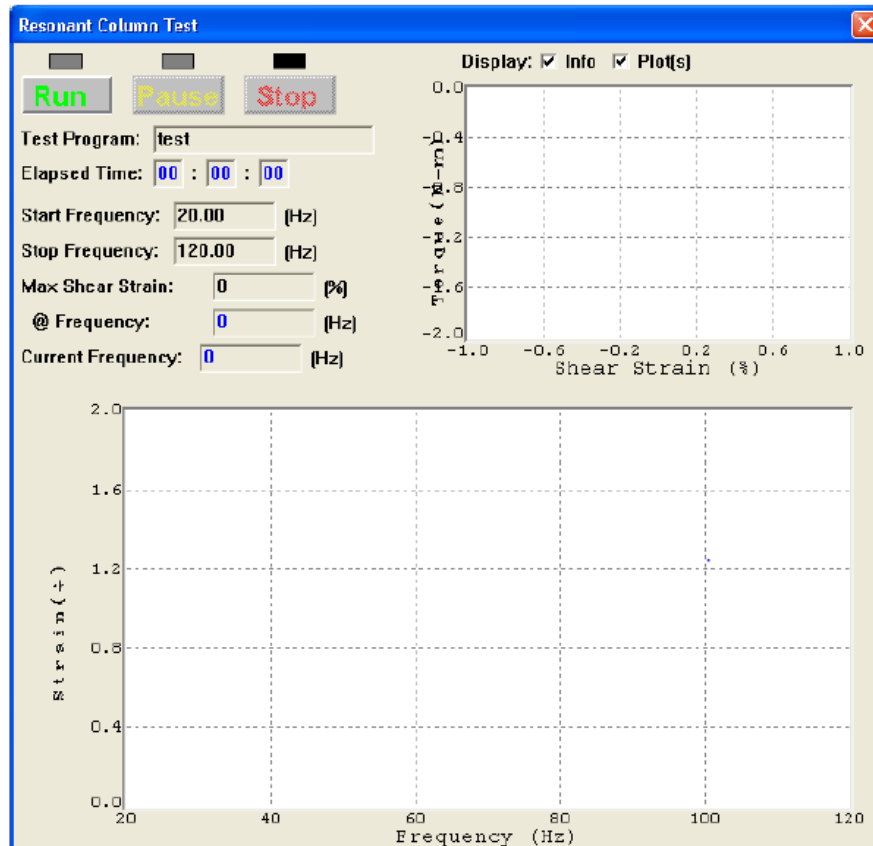
La máxima deformación por corte esperada corresponde a la deformación que se espera alcance la muestra en el rango de frecuencias ensayadas, este valor no modifica nada en el ensayo, sino que establece el límite del eje de deformación por corte en la gráfica que presenta el software.

Finalmente, se recomienda asignar un ID a la configuración, que proporcione información detallada de la misma, por ejemplo, la cantidad de torque a aplicar o el barrido de frecuencia, de esta manera será de fácil reconocimiento para futuros ensayos bajo la misma configuración.

Una vez se ha elegido la configuración de prueba a usar, basta con seleccionarla y dar click en el botón **Execute** para abrir la ventana de ejecución del ensayo de columna resonante.

Paso 5: Una vez abierta la ventana de ejecución, el siguiente paso es ejecutar el ensayo. La ventana de ejecución del ensayo de columna resonante contiene los botones de control del ensayo, estos son los botones **Run**, **Pause** y **Stop**. La ventana presenta dos gráficas de la ejecución de la prueba en tiempo real, la gráfica en la esquina superior derecha presenta la deformación por corte (%) vs Torque (pfs), entre más se acerque la forma de esta gráfica a la figura de Lissajous presentada en la Ilustración 3.2 C, más cercana estará la frecuencia de resonancia. La gráfica en la parte inferior de la ventana presenta la deformación por corte vs frecuencia, a esto se le conoce como el barrido de frecuencia. La ventana de ejecución del ensayo se presenta en la Ilustración 7.7.

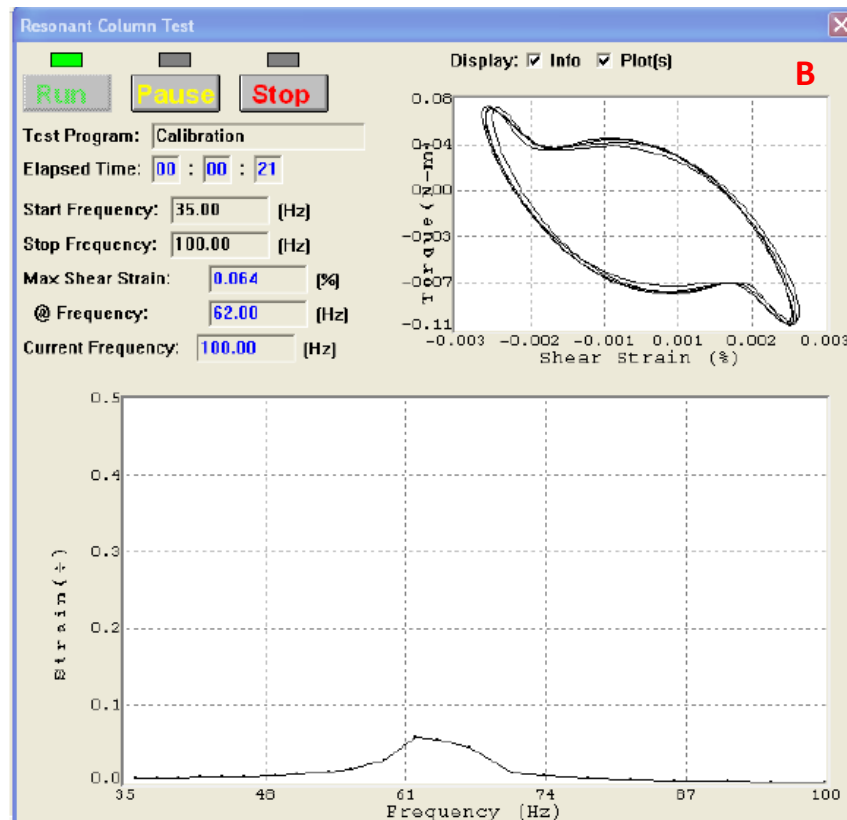
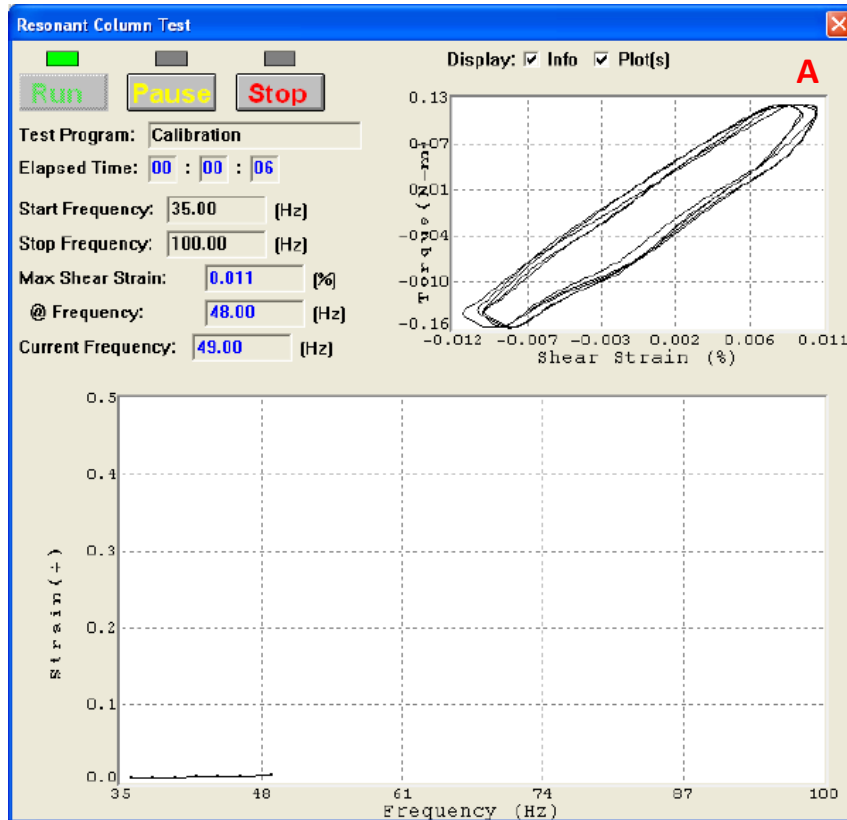
Ilustración 7.7: Ventana de ejecución del ensayo de columna resonante.
Fuente: (GCTS , 2007)



La ventana muestra algunas características de la configuración de prueba elegida, como la frecuencia de inicio y de parada, el campo **Max Shear Strain** presenta la máxima deformación por corte alcanzada, en tiempo real y el campo **@Frequency** presenta la frecuencia registrada para dicha deformación. El campo **Current Frequency** presenta la frecuencia de la prueba en tiempo real.

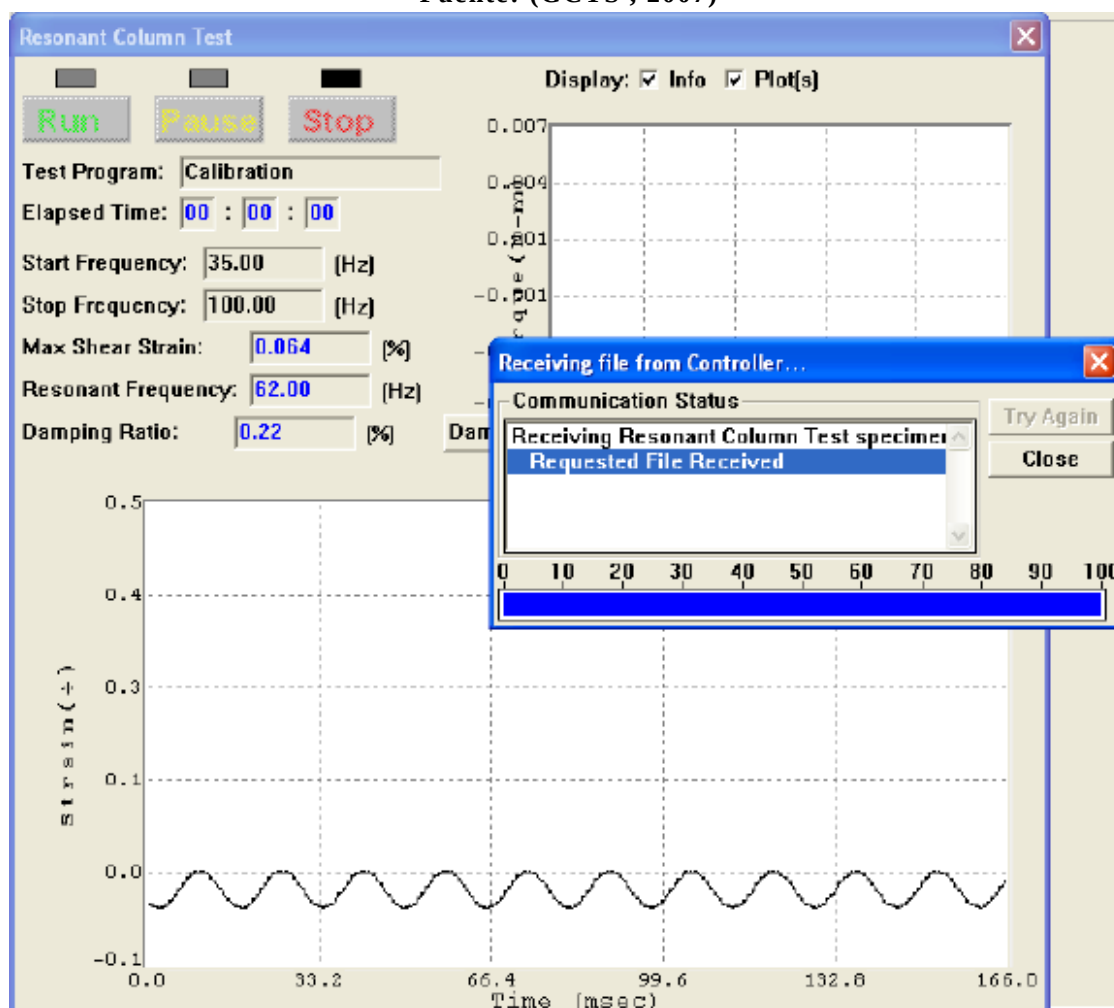
Para dar inicio al ensayo basta con dar click en el botón **Run** de la ventana de ejecución, se debe esperar hasta que el sistema realice el barrido de frecuencia y registre los datos obtenidos para cada frecuencia, mientras esto se logra, las gráficas mencionadas previamente cambiarán constantemente de forma, la Ilustración 7.8 presenta dos estados de la ventana durante la ejecución de un ensayo.

Ilustración 7.8: Ventana de ejecución durante el ensayo.
Fuente: (GCTS , 2007)



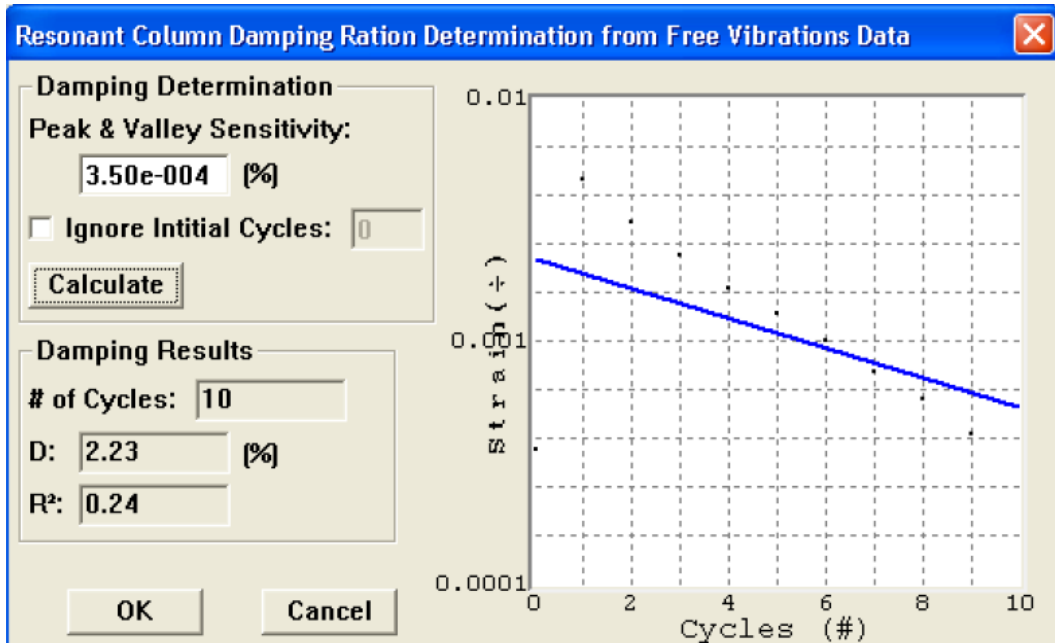
Una vez se completa el barrido de frecuencia, se completa también el ensayo de columna resonante y los datos son transferidos al controlador del software CATS, la ventana de finalización del ensayo se presenta en la Ilustración 7.9.

Ilustración 7.9: Ventana de finalización del ensayo.
Fuente: (GCTS , 2007)



Una vez finalizado el ensayo, el software calculará y presentará de forma automática la relación de amortiguamiento en el campo **Damping Ratio**, de igual manera, se habilitará el botón **Damping Det**, el cual le permitirá al usuario calcular la relación de amortiguamiento de forma manual, la ventana para la determinación de amortiguamiento de forma manual se presenta en la Ilustración 7.10.

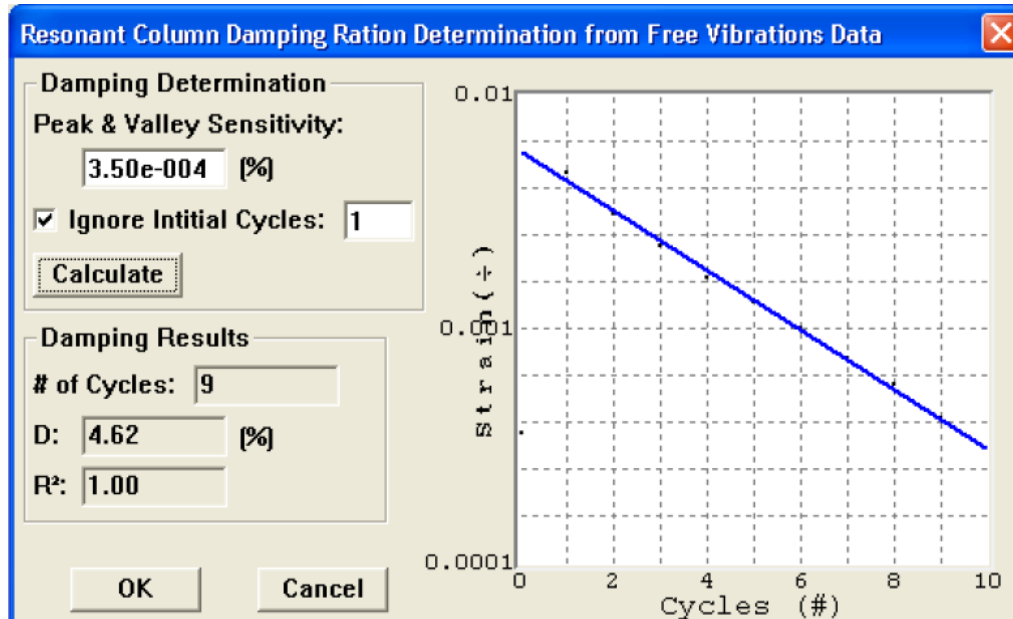
Ilustración 7.10: Ventana de determinación de amortiguamiento A.
Fuente: (GCTS , 2007)



En esta ventana es posible modificar los campos de sensibilidad y número de ciclos, el software calcula el amortiguamiento con una sensibilidad por defecto de $2\text{e-}3\%$, y para los ciclos se recomienda mínimo tres y máximo diez, dado que el software calcula el amortiguamiento mediante un análisis de mínimos cuadrados, lo ideal es alcanzar un R^2 lo más cercano posible a 1.0, en caso de querer ignorar algún punto para mejorar el análisis, deberá seleccionar la casilla **Ignore Initial Cycles**, e introducir el número del ciclo que desea ignorar.

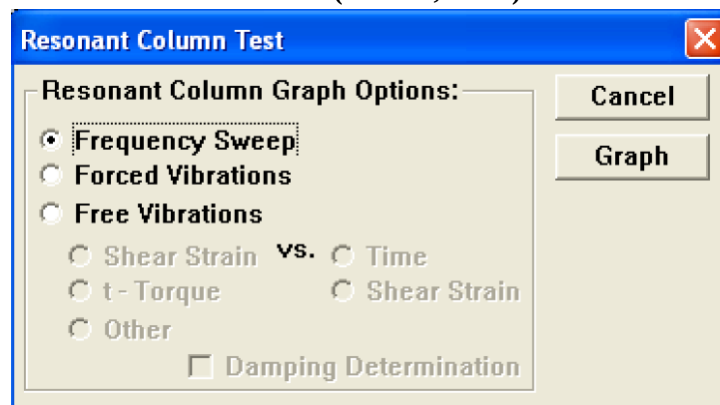
Por ejemplo, para ignorar el punto del primer ciclo en el análisis, seleccione la casilla **Ignore Initial Cycles**, e introduzca el número 1 en el campo habilitado, como se presenta en la Ilustración 7.11.

Ilustración 7.11: Ventana de determinación de amortiguamiento B.
Fuente: (GCTS , 2007)



Paso 6: Una vez terminado el ensayo, pueden verse los resultados representados gráficamente dando click sobre el ícono,  se debe seleccionar el espécimen que se ensayó e indicar en la ventana emergente qué datos se desean graficar. La ventana para la selección de gráficos se presenta en la Ilustración 7.12.

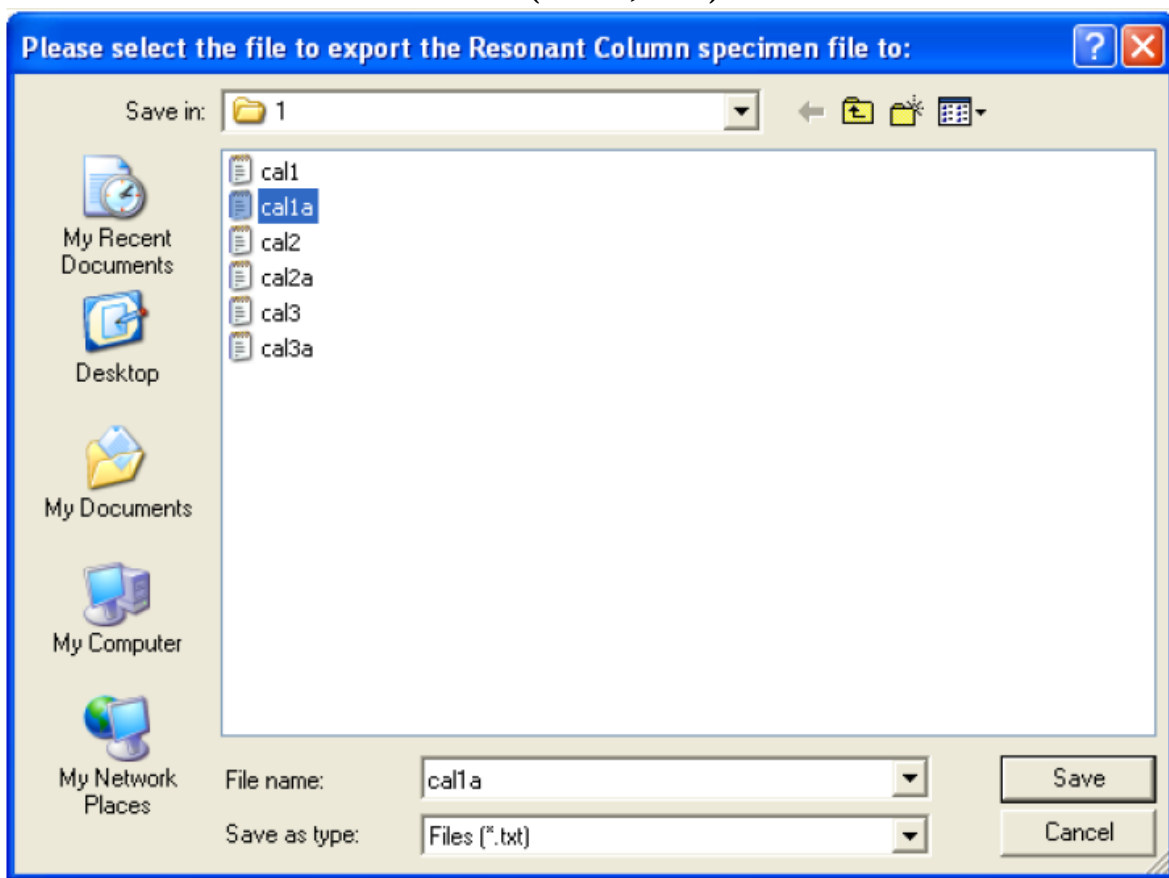
Ilustración 7.12: Ventana de selección de gráficos.
Fuente: (GCTS , 2007)



Finalmente, si se desean exportar los resultados a un archivo .txt para poderlos tratar en algún otro programa, se debe dar click sobre el ícono  y seleccionar en la ventana emergente el archivo (nombre del espécimen) a exportar, la ventana de exportación de archivos se presenta en la Ilustración 7.13.

Ilustración 7.13: Ventana de exportación de archivos.

Fuente: (GCTS , 2007)



8. Resultados del ensayo de columna resonante en el equipo TSH-100

A continuación, se presentan a modo de ejemplo los resultados obtenidos tras la realización de un ensayo de columna resonante en el equipo TSH-100, el ensayo se realizó en un espécimen con las características presentadas en la Tabla 8.1 tomado de una muestra identificada como laterita roja.

Tabla 8.1: Características del espécimen de ensayo.
Fuente: Propia

Altura	76.00 mm
Diámetro	38.00 mm
Masa	139.60 g
Tipo de material	Clay, Soft
W_0	32.50%
S_0	71.18%
Gs	2.78
e_0	1.27

Se realizó el montaje de la muestra, como se presenta en el capítulo **6.1. Montaje de una muestra en equipo TSH-100**, posteriormente se realizó el procedimiento en el software CATS de GCTS, como se presenta en el capítulo **7.1 Procedimiento experimental en el equipo TSH-100**, ensayando la muestra bajo diferentes condiciones de confinamiento, variando la presión en la celda desde 50 kPa hasta 400 kPa, manteniendo una amplitud de torque constante en cada ensayo de 1 pfs (0.023 N*m) y un barrido de frecuencia de 1 Hz a 100 Hz, con un paso de 1 Hz para un total de 100 frecuencias ensayadas en cada prueba.

Se exportaron los resultados, como se presenta en el **Paso 6** del capítulo **Procedimiento en software CATS de GCTS**, obteniendo archivos en formato .txt con la información obtenida en los ensayos. Entre los resultados obtenidos se encuentran, la velocidad de onda

de corte (V_s), el módulo de corte (G), el amortiguamiento (D), la máxima deformación por corte, frecuencia de resonancia (F_r), etc. También se encontrarán los datos de deformación por corte registrados por el software para cada frecuencia ensayada. Dependiendo de las necesidades del usuario se recomienda hacer el tratamiento de datos pertinente en Excel, para este ejemplo, se realizará la curva de variación del módulo de corte en función de la presión de confinamiento, por lo cual el único dato relevante será el módulo de corte obtenido en cada ensayo. Sin embargo, se recuerda que esto dependerá de las necesidades de investigación de cada usuario. La Ilustración 8.1 presenta los resultados exportados en formato .txt, los módulos de corte obtenidos para cada ensayo se presentan en la Tabla 8.2, la gráfica de la variación del módulo de corte en función de la presión de confinamiento se presenta en Ilustración 8.2.

Ilustración 8.1: Resultados en archivo .txt.
Fuente: (Torres, 2017)

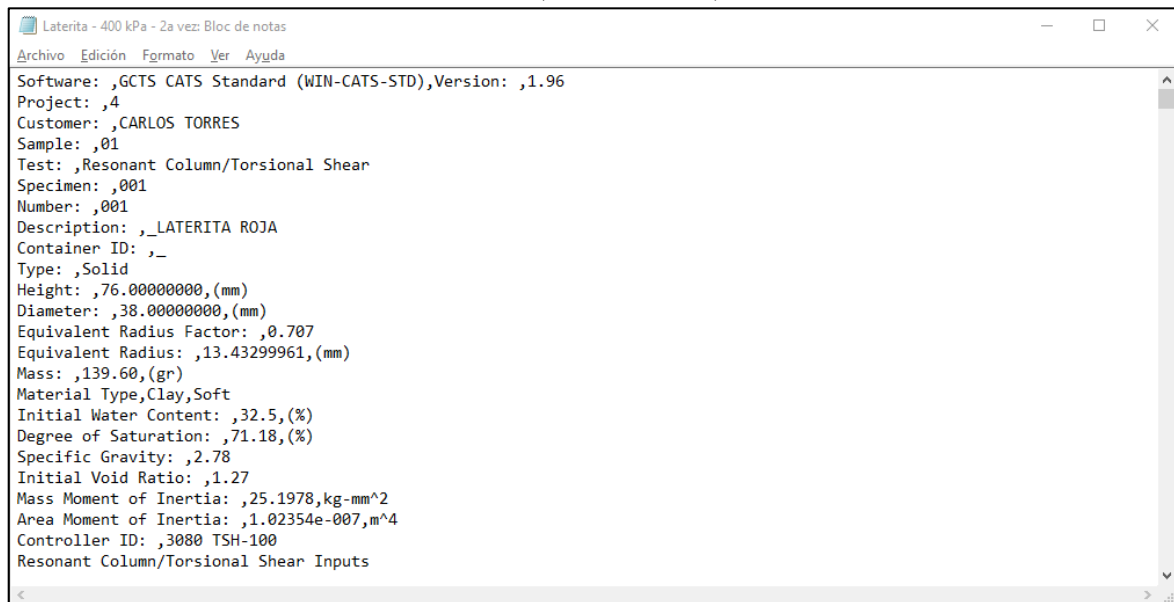


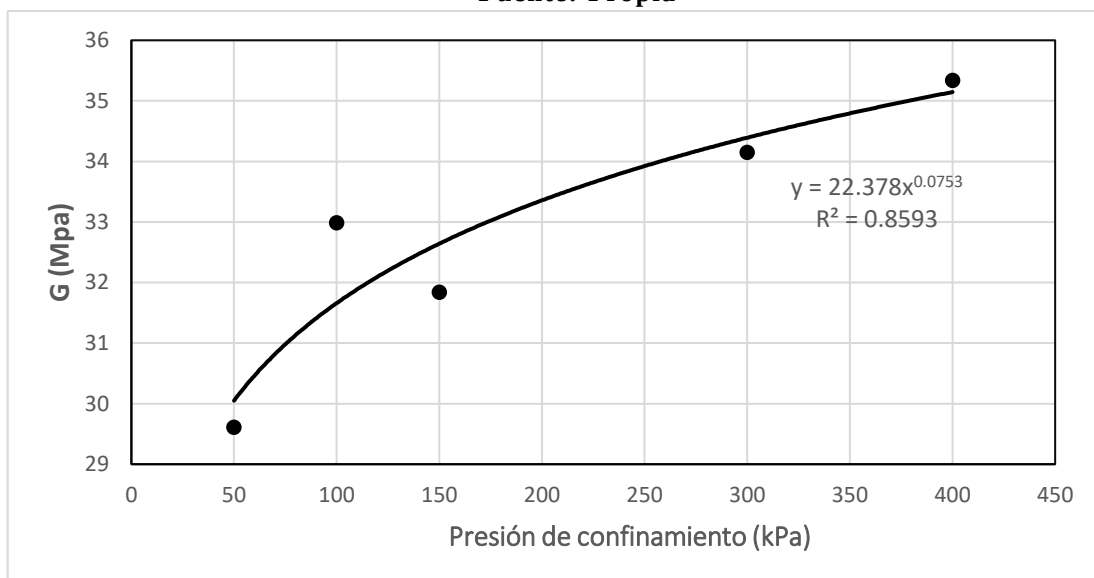
Tabla 8.2: Módulos de corte obtenidos mediante ensayo de columna resonante en equipo TSH-100.

Fuente: Propia

Confinamiento	G	G/G _{MAX}
50 kPa	29.61 MPa	0.84
100 kPa	32.99 MPa	0.93
150 kPa	31.84 MPa	0.90
300 kPa	34.15 MPa	0.97
400 kPa	35.34 MPa	1.00

Ilustración 8.2: Presión de confinamiento vs. Módulo de corte.

Fuente: Propia



De acuerdo con la Ilustración 8.2, el módulo de corte (G) aumenta en la medida que aumenta la presión de confinamiento, lo cual coincide con la teoría ya que según (Mitchell & Soga, 1976) el incremento en la presión de confinamiento aumenta el número de enlaces partícula-partícula proporcionando mayor resistencia a la deformación en el espécimen.

9. Calibración de sistema del equipo TSH-100

La calibración del equipo se realiza haciendo uso de una barra metálica (barra de calibración), como la presentada en la Ilustración 9.1 y un disco de calibración (masa agregada) como el presentado en la Ilustración 9.2, incluidos con el equipo, para la calibración, se asume que la barra de calibración tiene un amortiguamiento igual o cercano a cero y una constante torsional de rigidez (k). La ecuación que relaciona el momento polar de inercia (I) con la frecuencia de resonancia (ω) se obtiene a partir de la adaptación de la segunda ley de Newton para el movimiento rotacional presentada en la Ecuación 9.1.

$$I = \frac{k}{\omega^2} \quad \text{Ecuación 9.1}$$

Ilustración 9.1: Esquema de la barra de calibración y sus partes.

Fuente: Propia

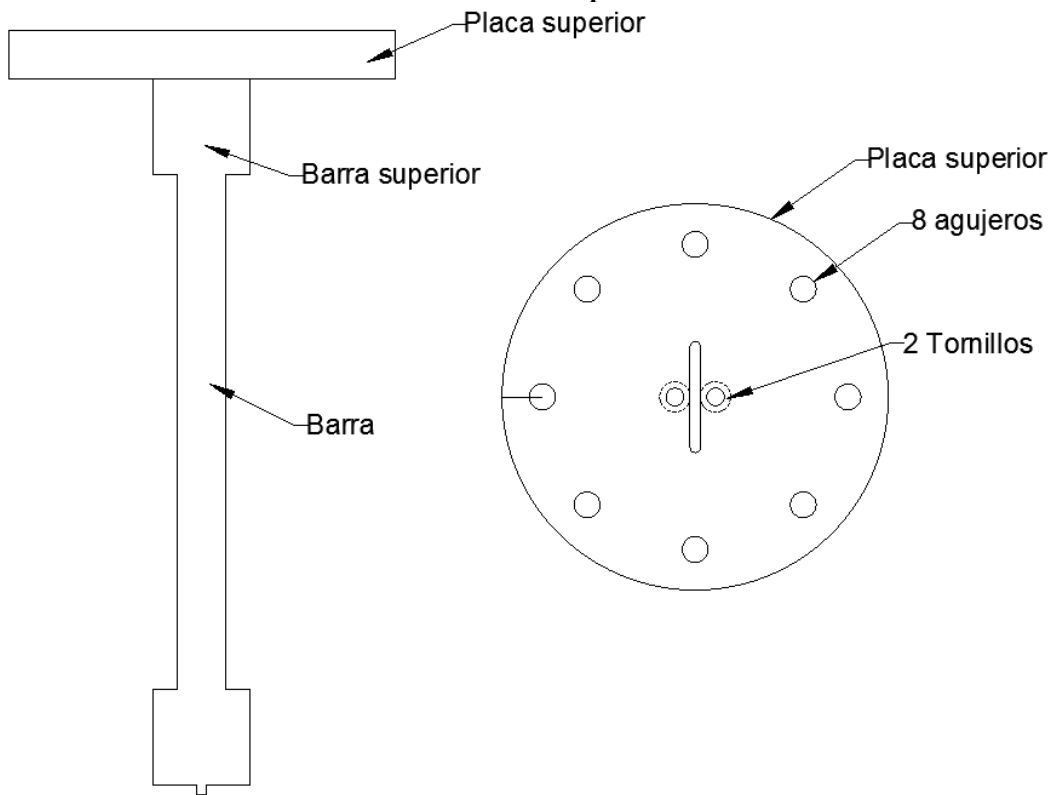
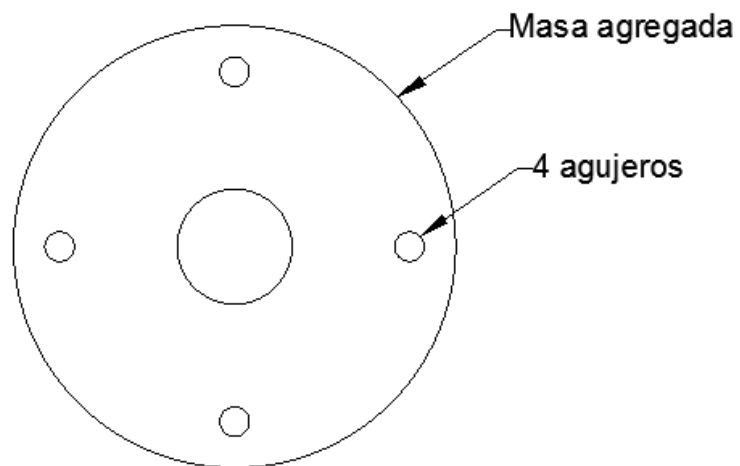


Ilustración 9.2: Esquema de masa agregada

Fuente: Propia



El procedimiento recomendado para la calibración del equipo es la realización de dos ensayos, el primero usando el espécimen de calibración para obtener la frecuencia de resonancia (ω_1) para esta configuración, el segundo, realizando el ensayo con el espécimen de calibración y la masa agregada para obtener la frecuencia de resonancia (ω_2). La Ilustración 9.3 presenta el espécimen de calibración y la masa agregada del equipo TSH-100 de GCTS. El montaje para la realización de los dos ensayos de calibración se presenta en la Ilustración 9.4, para la realización de dichos ensayos no es necesario usar la celda triaxial ya que no se aplicará ninguna presión de confinamiento.

Ilustración 9.3: Barra de calibración y masa agregada.
Fuente: Propia

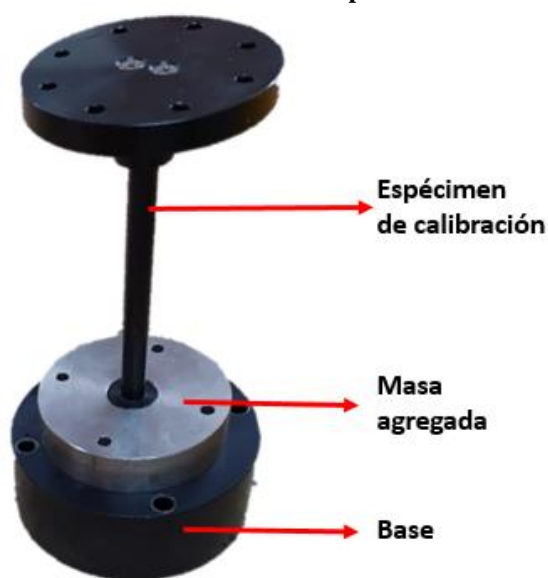
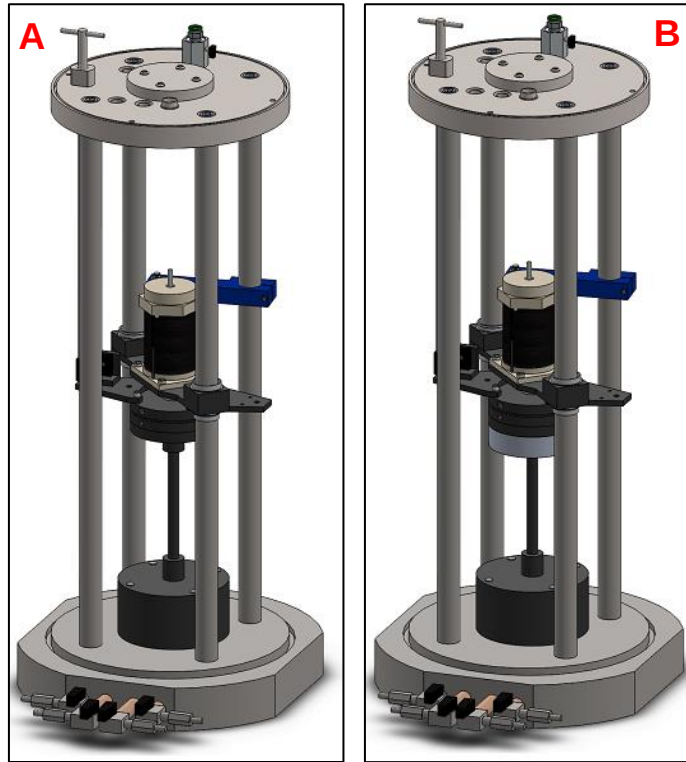


Ilustración 9.4: Montajes para calibración: A) Montaje con barra de calibración; B) Montaje con barra de calibración + Masa agregada.
Fuente: Propia



Adaptando la Ecuación 9.1 para la calibración de la columna resonante se obtiene, la Ecuación 9.2 para el ensayo inicial y la Ecuación 9.3 para el segundo ensayo.

$$I_0 + I_{calc} = \frac{k}{w_1^2} \quad \text{Ecuación 9.2}$$

$$I_0 + I_{calc} + I_{mass} = \frac{k}{w_2^2} \quad \text{Ecuación 9.3}$$

Donde:

I_0 : Momento polar de inercia del sistema a usar durante el ensayo.

I_{calc} : Momento polar de inercia del espécimen de calibración.

I_{mass}: Momento polar de inercia de la masa agregada.

W1: Frecuencia de resonancia del espécimen de calibración.

W2: Frecuencia de resonancia del espécimen de calibración con masa agregada.

Despejando la constante k de cada ecuación e igualándolas para encontrar I_0 se obtiene la Ecuación 9.4 que es la ecuación para encontrar el momento polar de inercia del sistema luego de haber realizado los dos ensayos.

$$I_0 = \frac{(I_{calc} + I_{mass})w_2^2 - I_{calc}w_1^2}{w_1^2 - w_2^2} \quad \text{Ecuación 9.4}$$

Los momentos de inercia I_{calc} e I_{mass} se pueden obtener a partir de la geometría de la barra de calibración y de la masa agregada, el detalle de la geometría de la barra de calibración se presenta en la Ilustración 9.5 y el detalle de la geometría de la masa agregada se presenta en la Ilustración 9.6.

Ilustración 9.5: Geometría de la barra de calibración (dimensiones en mm)
Fuente: Propia

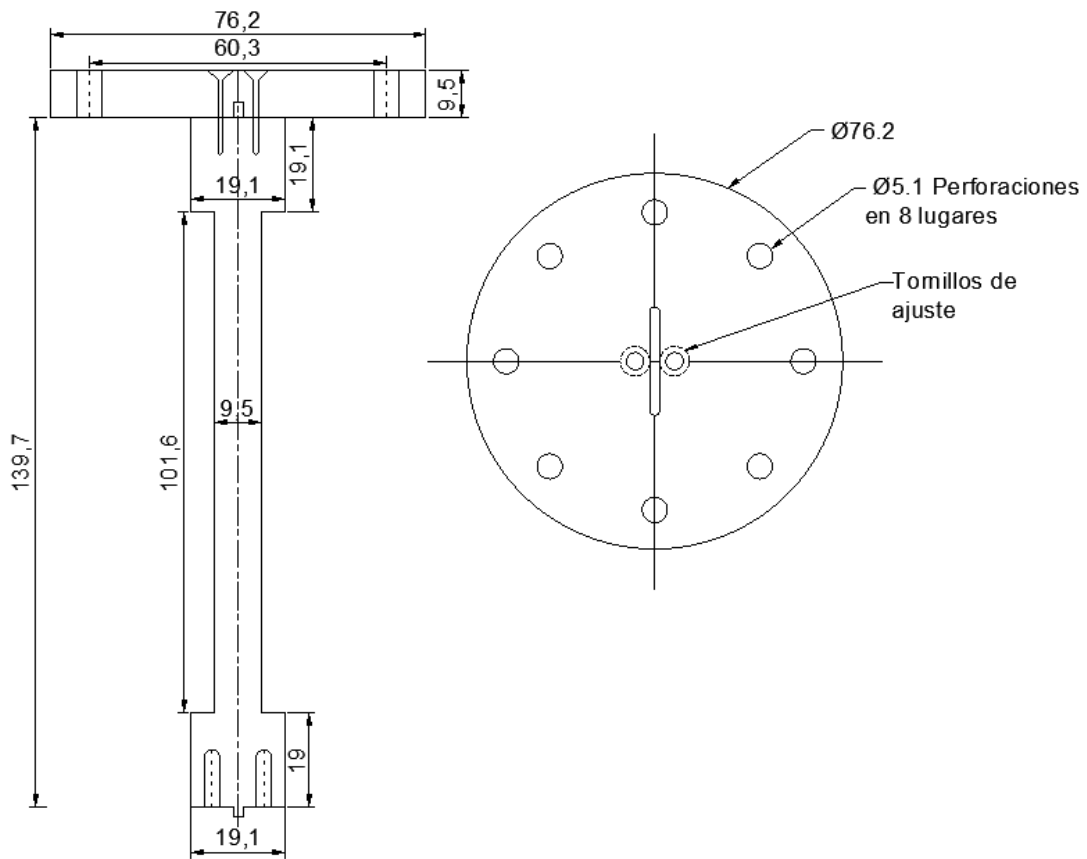
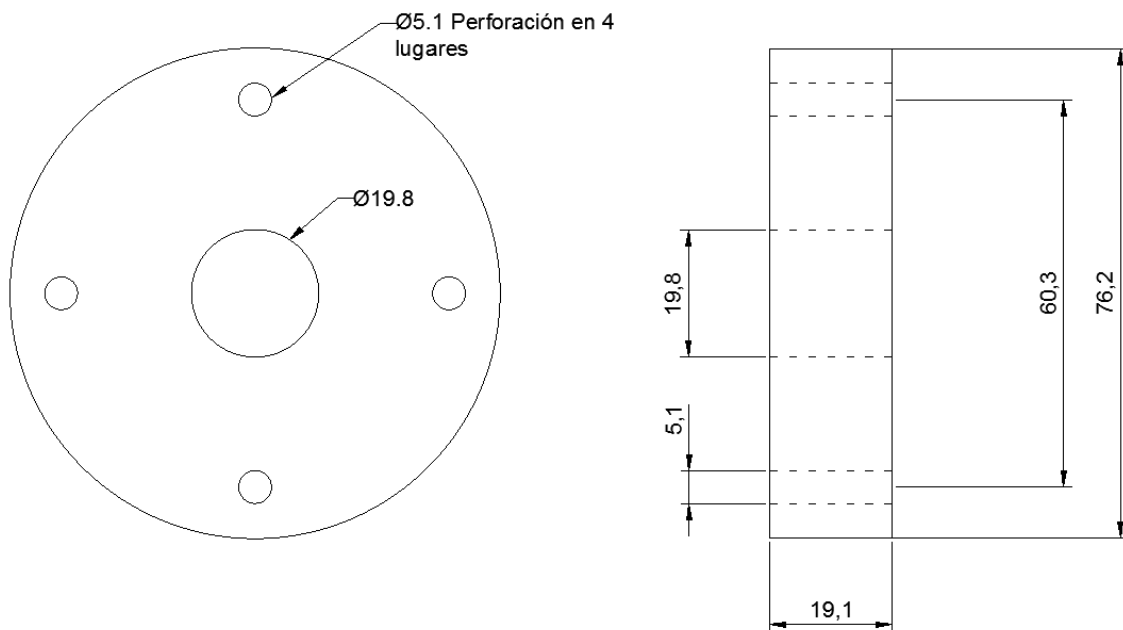


Ilustración 9.6: Geometría de la masa agregada (dimensiones en mm).
Fuente: Propia



A continuación, se calculará el momento de inercia polar de la barra de calibración (I_{calc}) y el momento de inercia polar de la masa agregada (I_{mass}) necesarios para encontrar el momento de inercia del sistema (I_0).

La barra de calibración está hecha en aluminio 6061-T6 con una densidad de 2.7 kg/cm^3 , con este dato y la geometría del espécimen se encontraron las masas correspondientes a cada parte del espécimen de calibración, las cuales se presentan en la Tabla 9.1

Tabla 9.1: Volumen y masa de las partes del espécimen de calibración.

Fuente: Propia		
	Volumen	Peso
Placa Superior	43,32 cm^3	117 g
Barra	7,20 cm^3	19 g
Barra superior	5,47 cm^3	15 g
Agujeros	0,19 cm^3	1 g

$$I_{calc} = I_{placa superior} + I_{Barra} + I_{Barra superior} - I_{orificios}$$

$$I_{placa superior} = \frac{1}{2}mR^2 = \frac{1}{2} * 0.117kg * (38.1mm)^2 = 84.9 \text{ kg} * mm^2$$

$$I_{barra} = \frac{1}{2}mR^2 = \frac{1}{2} * 0.019kg * (4.75mm)^2 = 0.2 \text{ kg} * mm^2$$

$$I_{barra superior} = \frac{1}{2}mR^2 = \frac{1}{2} * 0.015kg * (9.55mm)^2 = 0.7 \text{ kg} * mm^2$$

Para el cálculo del momento del momento de inercia de los orificios, se asumen los orificios como una distribución de masas puntuales, aplicando el teorema de Steiner y conociendo la distancia entre ejes paralelos (d) (eje de la barra y eje de los orificios) se tiene:

$$I_{orificios} = 8 * \left[\frac{1}{2}mR^2 + md^2 \right]$$

$$= 8 * \left[\frac{1}{2} * 0.001kg * (2.55mm)^2 + 0.001kg * (30.2mm)^2 \right] = 7.3 kg * mm^2$$

Entonces:

$$\begin{aligned} I_{calc} &= 84.9kg * mm^2 + 0.2kg * mm^2 + 0.7kg * mm^2 - 7.3kg * mm^2 \\ &= 78.5 kg * mm^2 \end{aligned}$$

Cabe resaltar que los orificios centrales estarán ocupados por los tornillos de ajuste, los cuales a pesar de no ser del mismo material que la barra de calibración y aunque tienen una densidad mayor a la del aluminio, el error que se genera en el cálculo es despreciable, por lo tanto, estos orificios no se tienen en cuenta en el cálculo del momento de inercia polar de la barra de calibración.

La masa agregada está hecha de acero inoxidable 303, con una densidad de 7.7 g/cm³, con este dato y la geometría de la masa agregada se encontró la masa correspondiente, los resultados se presentan en la Tabla 9.2.

Tabla 9.2: Volumen y masa de la masa agregada.

Fuente: Propia		
	Volumen	Peso
Masa agregada	81,22 cm ³	625 g
Agujeros	0,39 cm ³	3 g

$$I_{mass} = I_{masa agregada} - I_{orificios}$$

$$\begin{aligned} I_{masa agregada} &= \frac{1}{2} m [R_i^2 + R_e^2] = \frac{1}{2} * 0.625kg * [(9.9mm)^2 + (38.1mm)^2] \\ &= 484.3 kg * mm^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{orificios} &= 4 * \left[\frac{1}{2} m R^2 + m d^2 \right] \\
&= 4 * \left[\frac{1}{2} * 0.003 kg * (2.55 mm)^2 + 0.003 kg * (30.15 mm)^2 \right] \\
&= 11 kg * mm^2
\end{aligned}$$

Entonces:

$$I_{mass} = 484.3 kg * mm^2 - 11 kg * mm^2 = 473.3 kg * mm^2$$

Según el fabricante (GCTS), luego de hacer los dos ensayos correspondientes se obtienen las siguientes frecuencias de resonancia:

$$\omega_{\text{espécimen}} = \omega_1 = 79.6 \text{ Hz} \quad \text{y} \quad \omega_{\text{espécimen} + \text{masa agregada}} = \omega_2 = 63.4 \text{ Hz}$$

Con los valores obtenidos, y reemplazando en la Ecuación 9.4 se obtiene:

$$\begin{aligned}
I_0 &= \frac{(78.5 kg * mm^2 + 473.3 kg * mm^2) * (63.4 Hz)^2 - 78.5 kg * mm^2 (79.6 Hz)^2}{[(79.6 Hz)^2 - (63.4 Hz)^2]} \\
&= 742.7 kg * mm^2
\end{aligned}$$

Este valor es el correspondiente al momento polar de inercia del sistema de la columna resonante, sin incluir el momento polar de inercia del disco activo, este valor será usado por el software para la realización de los cálculos de velocidad de onda de corte (V_s) y módulo de corte (G).

10. Bibliografía

- ASTM D4015 . (1 de Octubre de 2015). D4015. *Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices*.
- Camacho , J. (07 de 2011). Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods. *Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods* . Lisboa , Portugal: Universidad técnica de Lisboa Instituto superior técnico .
- Colindres, R. (1983). *Dinámica de suelos y estructuras aplicadas a la ingeniería sísmica* . Mexico D.F. : LIMUSA .
- Das, B. M., & Ramana, V. G. (2014). *Principles of Soil Dynamics* . Stamford : Cengage Learning.
- Díaz, A. (2005). *Dinámica de suelos*. México D.F.: Limusa.
- 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.
- Freedman , R. A., & Young , H. D. (2009). *Física Universitaria*. México D.F. : Pearson .
- GCTS , T. S. (2007). Resonant Column & Torsional Shear Test Mode 1.85. Tempe, Arizona, USA .
- Gere , J., & Timoshenko, S. (1986). *Mecánica de materiales* . México D.F.: Grupo Editorial Iberoamericana .

- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering* . New Jersey : Prentice Hall .
- Kumar, K. (2008). *Basic Geotechnical Earthquake Engineering* . New Delhi: New Age International .
- McGraw-Hill Companies . (2003). *Dictionario of Engineering* . McGraw-Hill.
- Mitchell , J., & Soga, K. (1976). Fundamentals of Soil Behavior . *Citado por Tanu Dutta & Sireesh Saride en "DYNAMIC PROPERTIES OF COMPACTED COHESIVE SOIL BASED ON RESONANT COLUMN STUDIES" (2015).*
- Murcia , D. A., & Perdomo, L. M. (2012). Implementación del ensayo de columna resonante . Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada .
- Páez , J., & Díaz , L. (2019). Influencia de la adición de aceite sulfonado en la respuesta dinámica a pequeñas deformaciones de un material granular arcilloso. *Influencia de la adición de aceite sulfonado en la respuesta dinámica a pequeñas deformaciones de un material granular arcilloso*. Bogotá , Colombia : USTA .
- Pineda, J. A., Cruz, J. A., & Ávila , P. (Junio de 2018). Dynamic Behavior of Naturally Desiccated Clays Via Resonant Column Testing at Constant Water Content. *Dynamic Behavior of Naturally Desiccated Clays Via Resonant Column Testing at Constant Water Content*. ASCE.
- Rodríguez , S. (2017). INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS DE HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE ARCILLAS RECONSTITUIDAS, A TRAVÉS DEL ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE. *INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS DE HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE ARCILLAS*

RECONSTITUIDAS, A TRAVÉS DEL ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE.

Bogotá , Colombia: USTA.

Sáenz , M. (2016). *Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago*. Santiago de Chile : Universidad de Chile .

Santibañez, D. (2006). Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estandar . Valdivia , Chile: Universidad Austral de Chile .

Solis, L. Y. (2017). *Propiedades y modelos dinámicos para las arcillas del ex lago de Texcoco* . Ciudad de México : UNAM .

Suarez , J. (s.f.). *Erosión* . Obtenido de Erosión : <https://www.erosion.com.co/vision-geotecnica-de-la-amenaza-sismica/159-cap-10-amenaza-sismica.html>

Torres, C. E. (2017). Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas. *Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas*. Bogotá, Colombia: UNAL.

Uribe, J. (2002). *Análisis de estructuras* . Bogotá: ECOE .

11.Anexos

A: Registro fotográfico – Montaje de una muestra y posterior.

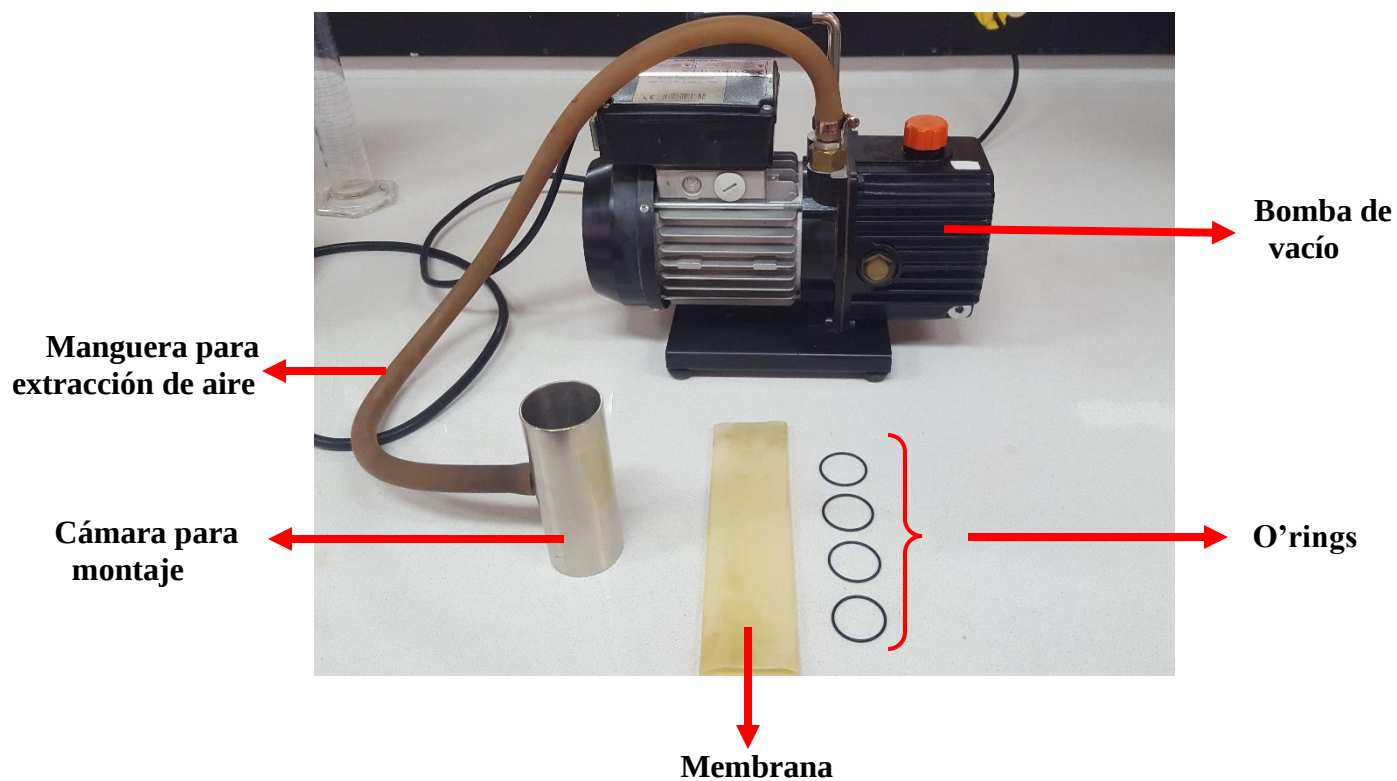
B: Inventario del equipo TSH-100 de la Universidad Santo Tomás, sede Bogotá.

C: Formato para ensayo de columna resonante y bitácora de equipo TSH-100.

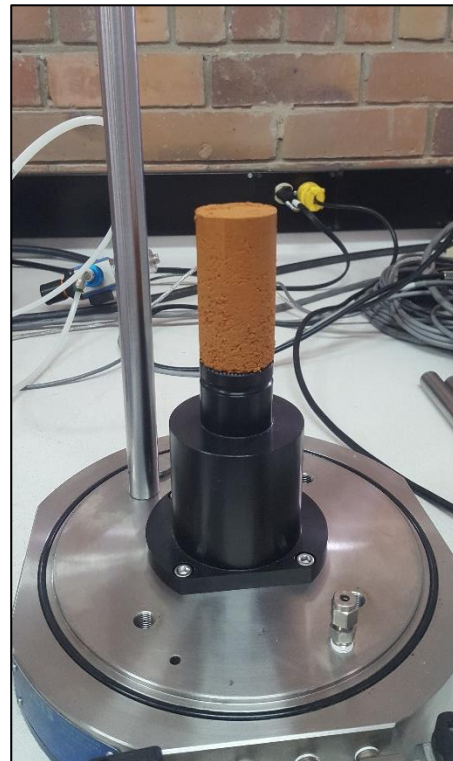
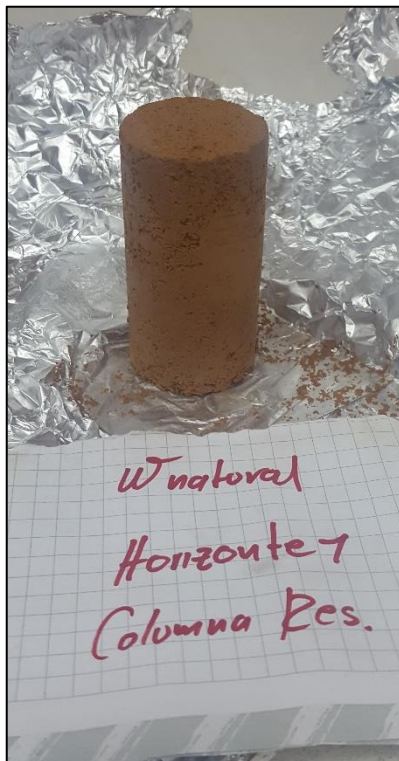
ANEXO A

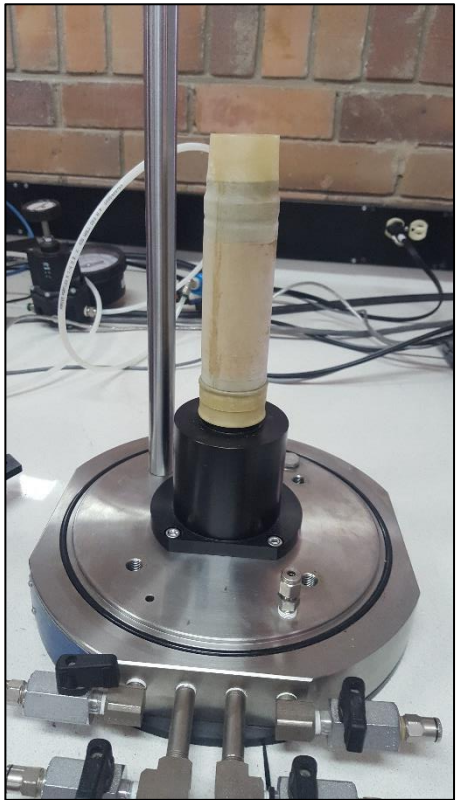
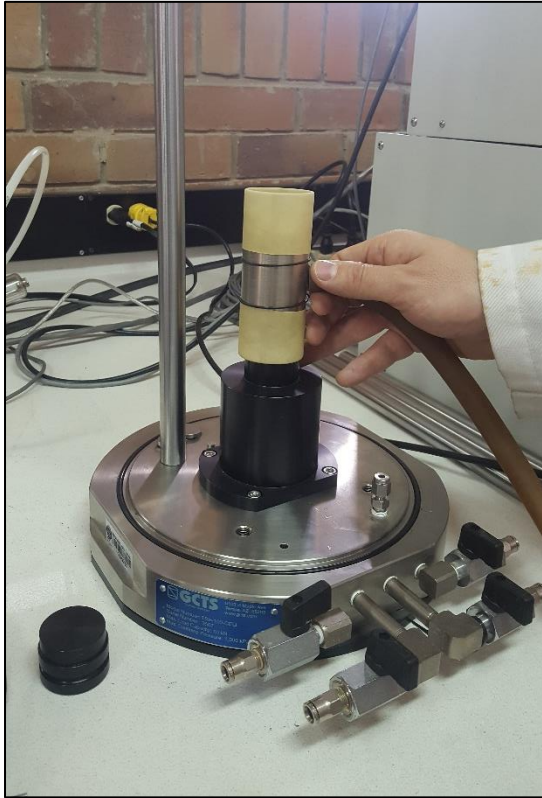
REGISTRO FOTOGRÁFICO – MONTAJE DE UNA MUESTRA Y POSTERIOR

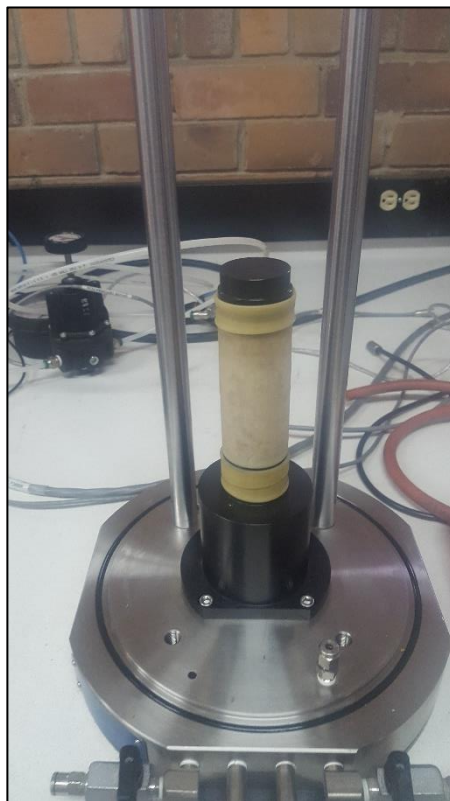
**ACCESORIOS NECESARIOS PARA EL MONTAJE DE UNA MUESTRA EN EL
EQUIPO TSH-100**



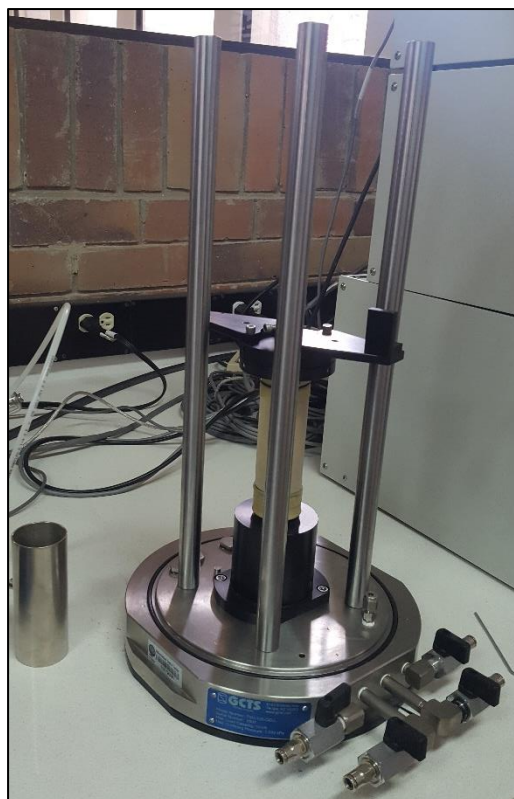
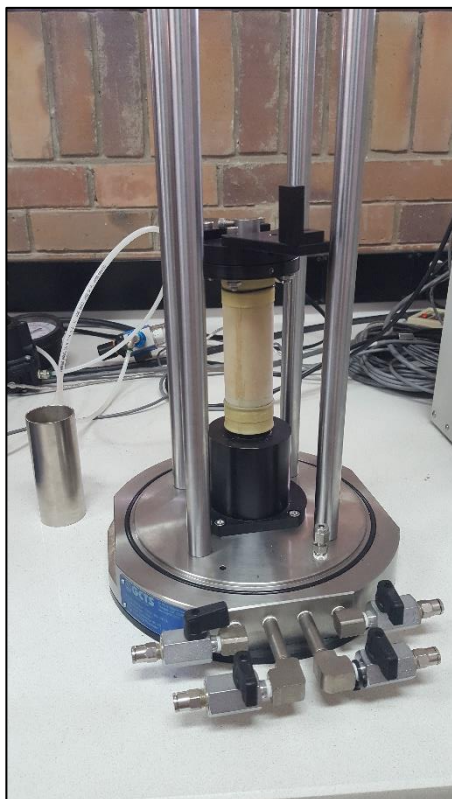
PROCEDIMIENTO PARA MONTAJE DE UNA MUESTRA

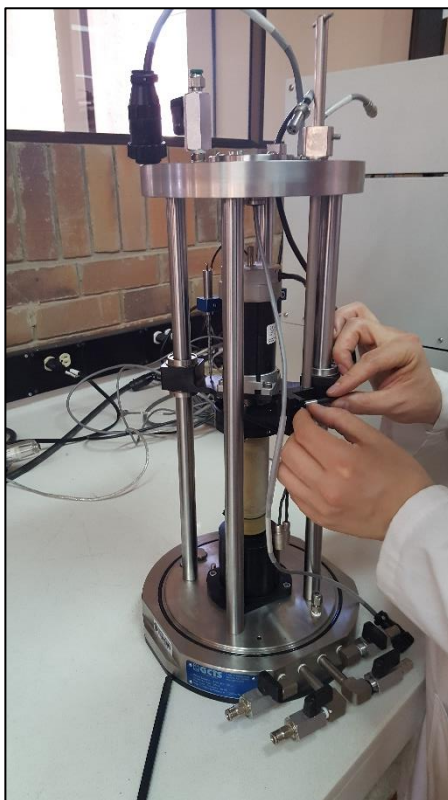
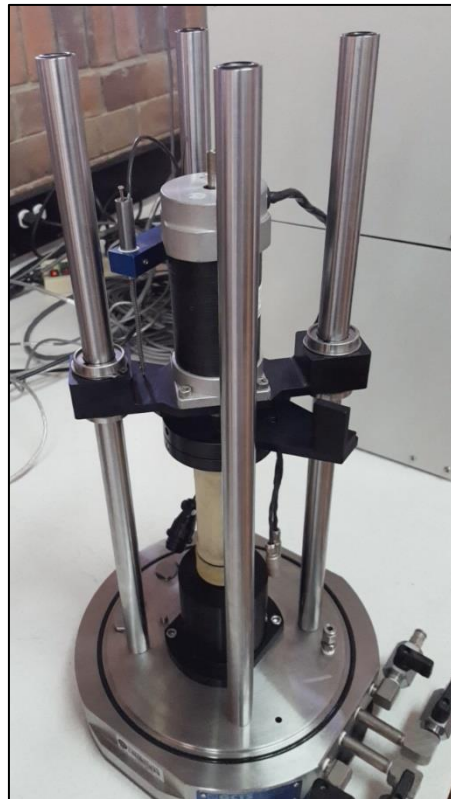
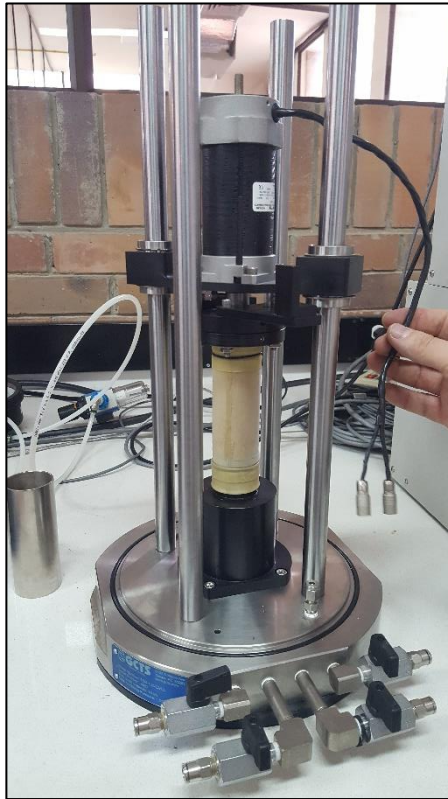


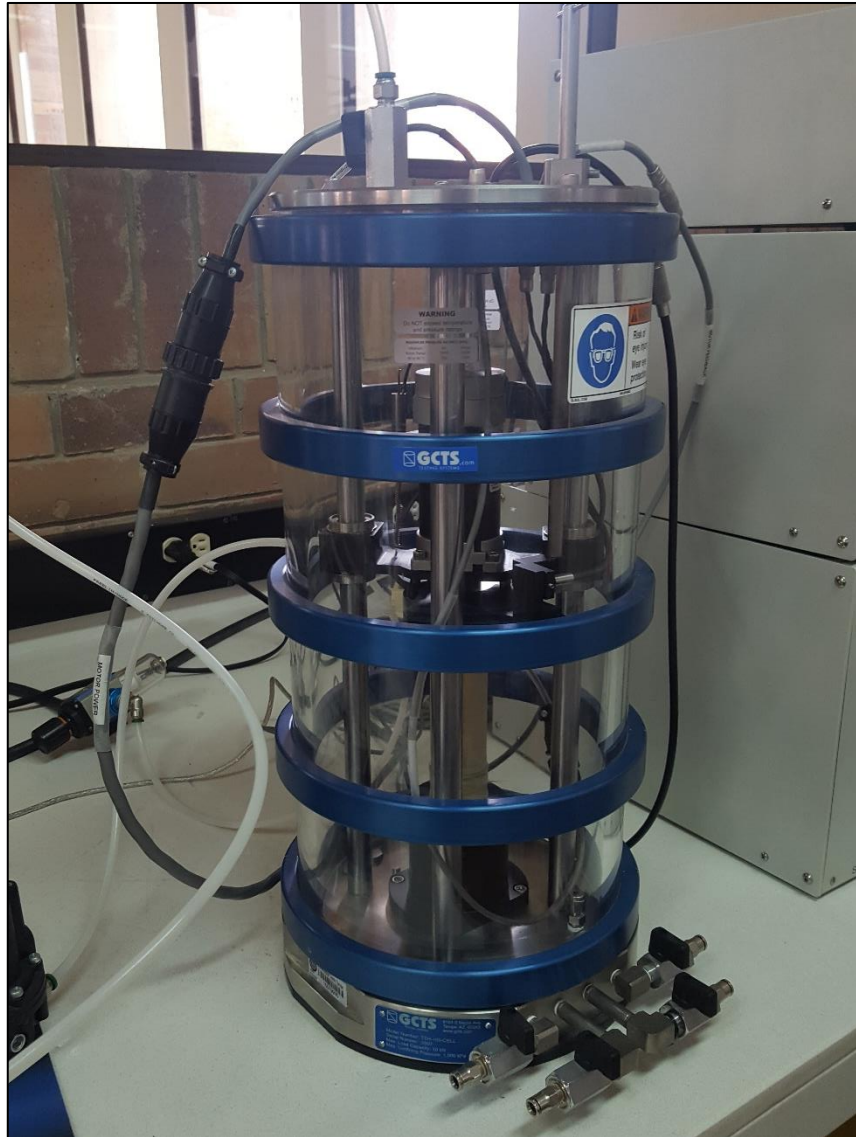




POSTERIOR AL MONTAJE DE LA MUESTRA







NOTA: Las fotografías presentadas en este anexo corresponden al proyecto *Influencia de la microestructura en la rigidez máxima de un perfil de suelo residual, en condiciones edométricas*, cuyo autor es el ingeniero Carlos Eduardo Torres Romero, quien amablemente nos autorizó para usarlas en este anexo.

ANEXO B

INVENTARIO DEL EQUIPO TSH-100 DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

SEDE BOGOTÁ

Inventario del equipo TSH-100 USTA

Para el desarrollo de este proyecto de grado se realizó el inventario del equipo TSH-100 e implementos auxiliares disponibles en el laboratorio de mecánica de suelos de la universidad Santo Tomás sede Bogotá, esto con el fin de identificar los equipos, implementos y repuestos disponibles para la realización del ensayo de columna resonante usando el equipo de referencia, así como hacer un diagnóstico del estado del equipo en general. A continuación, se presenta el inventario realizado.

Equipo TSH-100 de GCTS



El equipo TSH-100 está compuesto por varios elementos que pueden ser retirados durante el montaje y el desmonte de muestras, a continuación de enumeran y se presenta registro fotográfico de cada uno de estos.

Elementos propios del equipo

1. Fuente de alimentación del equipo



2. Anillo Superior



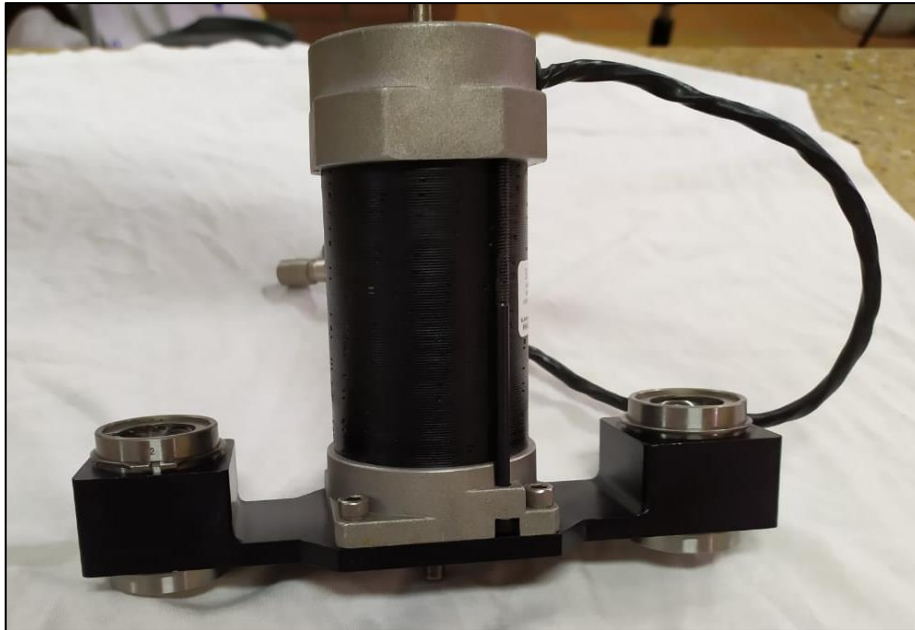
3. Celda de presión Triaxial



4. Cubierta de conexiones



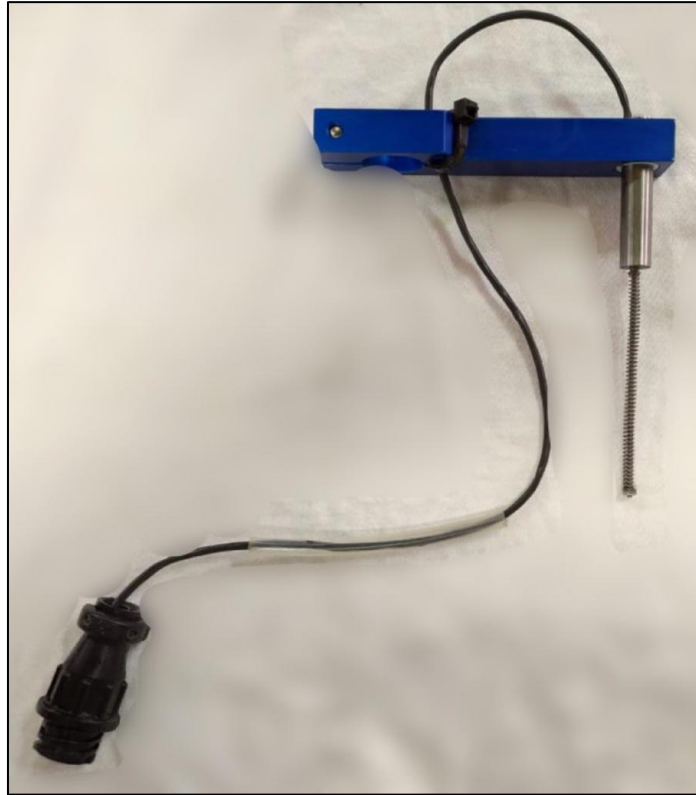
5. Motor para aplicación de torque



6. Base de motor con espejo para sensor de proximidad



7. Sensor de desplazamientos inductivos LVDT (Linear Variable Differential Transformer)



8. Sensor de proximidad



9. Base fija con soportes



10. Discos activos y pasivos de 1.5" y 2.5"



1A: Disco Activo para muestra de 2.5"

1B: Disco pasivo para muestra de 2.5"

2A: Disco Activo para muestra de 1.5"

2B: Disco pasivo para muestra de 1.5"

Elementos necesarios para la realización del ensayo

1. Cámaras (originales) para montaje de muestras



A: Cámara para montaje de muestras de 2.5"

B: Cámara para montaje de muestras de 1.5"

2. Cámaras (artesanales) para montaje de muestras



A: Cámara artesanal para montaje de muestras de 3"

B: Cámara artesanal para montaje de muestras de 2"

3. Membranas de látex para muestras de 2.5"



4. O-ring para muestras de 1.5" y 2.5"



5. Llave Bristol de 8 mm



Nota: Para el montaje y desmonte del equipo se requieren 3 llaves Bristol, una llave de 8 mm, otra de 4.5 mm y otra de 1.3, las dos últimas no se tienen en la universidad actualmente.

6. Calibradores pie de rey plásticos, destornilladores y pela-cable.



Repuestos

1. Tornillería de diferentes diámetros y tamaños



2. Empaques



3. Repuestos varios



Tabla Resumen

Elemento	Cantidad	Estado	Observaciones
Fuente de poder del equipo	1	Bueno	Sin observaciones
Tapa superior	1	Bueno	Sin observaciones
Cámara de contención transparente	1	Bueno	Sin observaciones
Base superior con orificios para conexiones	1	Bueno	Cable de sensor LVDT ligeramente desprendido
Motor para aplicación de torque	1	Bueno	Sin observaciones
Sensor LVDT	1	Bueno	Sin observaciones
Sensor de proximidad con base	1	Bueno	Sin observaciones
Soporte de columnas para celda	1	Bueno	Sin observaciones
Base superior para montaje de muestra de 1.5"	1	Bueno	Sin observaciones
Base inferior para montaje de muestra de 1.5"	1	Bueno	Sin observaciones
Base superior para montaje de muestra de 2"	1	Bueno	Sin observaciones
Base inferior para montaje de muestra de 2"	1	Bueno	Sin observaciones
Cámara de vacío para montaje de muestras de 2.5"	1	Bueno	Sin observaciones
Cámara de vacío para montaje de muestras de 1.5"	1	Bueno	Sin observaciones
Cámara de vacíos artesanal para montaje de muestras de 3"	1	Regular	Sin observaciones
Cámara de vacíos artesanal para montaje de muestras de 2"	1	Regular	Sin observaciones
Membrana de látex para muestras de 2.5"	10	Bueno	Sin observaciones
O'rings para muestras de 1.5"	4	Bueno	Sin observaciones
O'rings para muestras de 2.5"	5	Bueno	Sin observaciones
Llave Bristol de 8mm	1	Deteriorado	Hacen falta llaves Bristol de 4.4 mm y 1.3 mm
Calibradores pie de rey plásticos	2	Bueno	Sin observaciones
Destornillador de estrella	2	Bueno	Sin observaciones
Destornillador de pala	5	Bueno	Sin observaciones
Pela cable	1	Bueno	Sin observaciones
Repuestos de tornillería múltiple	48	Bueno	Sin observaciones
Repuestos de empaques	28	Bueno	Sin observaciones
Repuestos varios	25	Bueno	Sin observaciones

ANEXO C

FORMATO PARA ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE Y BITÁCORA DE EQUIPO TSH-100

FORMULARIO PARA ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE EN EQUIPO TSH-100 DE GCTS		
	Nombre del operador	
	Fecha	
	Proyecto	
	Muestra	

Datos del Espécimen		
Parámetro	Valor	
ID*		
Tipo*	Sólido	
	Hueco	
Diámetro externo*	mm	
Diámetro interno*	mm	
Altura*	mm	
Masa*	g	
Contenido de agua	%	
Grado de saturación	%	
Relación de vacíos		
Gravedad específica		

Resultados	
Parámetro	Valor
Deformación axial	mm
Frecuencia de resonancia	Hz
Máx. deformación por corte	%
Velocidad de onda de corte	m/s
Módulo de corte	MPa
Amortiguamiento	
Free Vibration Decay	%
Half Power Bandwidth	%

Datos del ensayo	
Parámetro	Valor
Presión de confinamiento	kPa
Inercia del disco activo	kg*mm ²
Frecuencia de inicio	Hz
Frecuencia de parada	Hz
Paso de frecuencia	Hz
Torque aplicado	pfs

Observaciones de la muestra:

Observaciones del ensayo:

Nota: Los parámetros marcados con * son obligatorios. 1 pfs equivale a 0.023 N*m



BITÁCORA DE EQUIPO TSH-100 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL - SEDE BOGOTÁ



Laboratorista a cargo: _____

FECHA	HORA INICIO	HORA FINALIZACIÓN	RESPONSABLE	ROL	OBSERVACIONES	FIRMA

RESERVA DE EQUIPO

FECHA	HORA INICIO	HORA FINALIZACIÓN	RESPONSABLE	ROL	OBSERVACIONES	FIRMA

NOTA: Quien firma se hace responsable del buen manejo del equipo y de los elementos auxiliares que se utilicen para el desmonte o montaje del equipo. Por lo tanto debe responder por cualquier pérdida o daño no mencionado en las observaciones ya sea al equipo o a cualquiera de sus elementos auxiliares.