



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**“ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS CAMBIOS DE HUMEDAD
DEL SUELO EN LA FRECUENCIA NATURAL DE UNA
ESTRUCTURA.”**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GERMÁN ANDRÉS VERDUGO VAROLI

PROFESOR GUÍA:

LENART GONZÁLEZ LAGOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RUBEN BOROSCHEK KRAUSKOPF

CLAUDIO FONCEA NAVARRO

SANTIAGO DE CHILE

DICIEMBRE DE 2009

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: GERMAN VERDUGO V.
FECHA: 25/11/2009
PROF. GUIA: LENART GONZALEZ

ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS CAMBIOS DE HUMEDAD DEL SUELO EN LA FRECUENCIA NATURAL DE UNA ESTRUCTURA

El objetivo general de este trabajo de título es registrar y analizar las variaciones de la frecuencia natural que una estructura pueda tener como resultado de los cambios en el contenido de humedad del subsuelo donde está localizada. Se busca obtener una correlación entre los cambios de frecuencia de la estructura y los cambios en el contenido de humedad del suelo.

Se ha observado en el último tiempo que no solo cambios en las propiedades físicas de una estructura provocan alteraciones en los parámetros estáticos y dinámicos de este, si no que también variaciones externas a la estructura. Un ejemplo de lo anterior son cambios en la frecuencia natural de una estructura debido a cambios en el contenido de humedad del suelo de fundación. Un ejemplo de lo anterior corresponde a variaciones de un 3% en la frecuencia natural de la Biblioteca Millikan en California, inmediatamente después de precipitaciones de 100 mm en 48 horas, recuperando la frecuencia previa solo al cabo de 10 días. En Chile también se han observado variaciones debidas a los cambios del contenido de humedad en el suelo. Para el Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción, se registró un aumento en la frecuencia del edificio de hasta un 1.2% luego de una intensa lluvia que alcanzó aproximadamente 40 mm entre los días 13 y 15 de Junio de 2007.

Se elaboró y ensayó un modelo a escala de una estructura de un grado de libertad, con un periodo cercano a un segundo, empotrada en un suelo constituido por arena con menos de 30% de finos, éstos de baja plasticidad, inicialmente en estado seco. En la parte superior de la estructura del modelo se colocó un acelerómetro para registrar las vibraciones y en el suelo se instalaron tres sensores de humedad a distintas profundidades. El agua de lluvia fue simulada mediante la adición de agua a través un dispensador manual.

Cuando se agregó agua por primera vez al modelo se rigidizó producto del efecto de capilaridad. En las ocasiones posteriores que se agregó agua al modelo se observa una disminución de la frecuencia de la estructura en torno al 1.6%, que coincide con aumento en el contenido de agua por sobre el 40% de saturación en la profundidad de suelo que contiene los costados de la fundación y el sello. La disminución de la frecuencia se debió a la pérdida de rigidez del suelo generada por la reducción de las tensiones efectivas del suelo.

Se concluye que existe una clara correlación entre los cambio de humedad del suelo y variaciones en la frecuencia natural de la estructura. Esta variación de la frecuencia natural se produce cuando el contenido de humedad del suelo cerca de los costados y la base de la fundación está por sobre el 40% de saturación aproximadamente. Sin embargo no se observa que un aumento en el contenido de humedad del suelo bajo el sello de fundación afecte el comportamiento de la estructura.

A Renato porque su llegada ilumino mi vida
A Belén porque su compañía me complementa
A mis Padres por que gracias a sus enseñanzas y
apoyo incondicional forjaron la persona que soy

TABLA CONTENIDOS

| | |
|---|----|
| CAPITULO I INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. INTRODUCCION AL MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.3. METODOLOGIA | 4 |
| 1.4. ALCANCES DEL TRABAJO DE TITULO. | 5 |
| | |
| CAPITULO II REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1. MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL..... | 6 |
| 2.2. EFECTOS METEREOLÓGICOS EN LA RESPUESTA DINÁMICA DE UNA ESTRUCTURA..... | 8 |
| 2.3. ESTUDIO ANALÍTICO PARA INVESTIGAR EL CAMBIO EN LA FRECUENCIA | 15 |
| | |
| CAPITULO III MARCO TEÓRICO | 20 |
| 3.1. FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES UTILIZADOS | 20 |
| 3.1.1. SENSORES DE HUMEDAD..... | 20 |
| 3.1.2. ACELEROMETROS..... | 21 |
| 3.2. MARCO TEÓRICO SOBRE MECÁNICA DE SUELOS | 24 |
| 3.3. MARCO TEÓRICO SOBRE DINÁMICA DE ESTRUCTURAS | 26 |
| 3.3.1. MÉTODO DE IBRAHIM EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (ITD)..... | 26 |
| 3.3.2. ESPECTRO DE DENSIDAD DE POTENCIA (PSD)..... | 29 |
| | |
| CAPITULO IV ENSAYOS A ESCALA | 33 |
| 4.1. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO UTILIZADO..... | 33 |
| 4.2. CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES DE HUMEDAD | 38 |
| 4.2.1. OBTENCIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO | 38 |
| 4.2.2. CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS PARA LA CALIBRACION | 38 |
| 4.2.3. REGISTRO DE DATOS | 40 |
| 4.2.4. CURVAS DE CALIBRACION DE LOS SENSORES DE HUMEDAD | 41 |
| 4.3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A ESCALA..... | 46 |
| 4.3.1. MODELO A ESCALA DE UNA ESTRUCTURA DE 1 GRADO DE LIBERTAD | 46 |

| | |
|---|--------|
| 4.3.2 CAJA CONTENEDORA PARA EL SUELO | 51 |
| 4.3.3 LLENADO DEL CONTENEDOR..... | 52 |
| 4.4 ADQUISICION DE DATOS | 55 |
| 4.5 EJECUCIÓN DEL ENSAYO | 58 |
| 4.5.1 ADICIÓN DE AGUA AL MODELO | 58 |
| 4.5.2 REGISTRO DE DATOS | 59 |
| 4.6 RESULTADOS Y ANALISIS | 60 |
| 4.6.1 ENSAYO DE DESPLAZAMIENTO CONTROLADO | 60 |
| 4.6.2 ENSAYOS DE MEDICIONES AMBIENTAL | 65 |
| 4.6.3 ANALISIS DE RESULTADOS | 73 |
| CAPITULO V DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES | 75 |
| CAPITULO VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 80 |
| ANEXOS CODIGOS MATLAB | 82 |
| ANEXO A: CODIGOS IBRAHIM..... | 82 |
| ANEXO B: CODIGO PARA HUMEDAD | 89 |
| ANEXO C: CODIGOS PSD..... | 89 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2. 1: Elevación de la biblioteca Millikan (ref.2) | 9 |
| Figura 2. 2: Planta de la biblioteca Millikan (ref. 2) | 9 |
| Figura 2. 3: Frecuencia natural de la biblioteca en el tiempo en los sentidos Norte – Sur y Este - Oeste (ref. 2) | 10 |
| Figura 2. 4: Cambios en las frecuencias naturales de la biblioteca en el tiempo y registros de precipitación, viento y temperatura (ref. 2) | 12 |
| Figura 2. 5: Ubicación de los sensores instalados en la Cámara Chilena Construcción (ref. 3) ... | 13 |
| Figura 2. 6: Registro de la precipitación acumulada cada 15 minutos y la frecuencia del primero modo, entre el 7 y el 19 de Junio de 2007 Modo 1 (ref. 3)..... | 14 |
| Figura 2. 7: Registro de la precipitación acumulada cada 15 minutos y la frecuencia del tercer modo, entre el 7 y el 19 de Junio de 2007 (ref. 3) | 14 |
| Figura 2. 8: Esquema del modelo utilizado por Todorovska y Yousef Al Rjoub (ref. 6) | 15 |
| Figura 2. 9: Variación de la frecuencia relativa en función de la respuesta de transferencia para el Caso 1($V_s = 300$ m/s) (ref. 7) | 18 |
| Figura 2. 10: Variación de la frecuencia relativa en función de la respuesta de transferencia para el Caso 2 ($V_s = 500$ m/s) (ref. 7) | 19 |
| Figura 3. 1: Esquema del sensor de humedad modelo MP406 (ref. 9)..... | 21 |
| Figura 3. 2: Sensor Kistler 8310A2 utilizado en los ensayos con desplazamiento controlado | 22 |
| Figura 3. 3: Sensor EPISensor ES-U2 utilizado en los ensayos con mediciones ambientales..... | 23 |
| Figura 3. 4: Esquema de un acelerómetro modelo kinematics EPI Sensor (ref. 11)..... | 23 |
| Figura 3. 5: Esquema con las tres fases del suelo a) suelo natural b) división por fases (ref. 12) | 24 |
| Figura 4. 1: Curva granulométrica del material usado en el modelo a escala | 34 |
| Figura 4. 2: Análisis Hidrométrico de suelo usado en modelo..... | 35 |
| Figura 4. 3: Curva granulométrica del material usado en el modelo a escala | 36 |
| Figura 4. 4: Gráfico Proctor modificado a material usado en modelo a escala..... | 37 |
| Figura 4. 5: a) Tamiz malla #4 y b) muestra de suelo sin tamizar..... | 38 |
| Figura 4. 6: Molde y elemento para compactar cada capa | 40 |
| Figura 4. 7: Esquema de los sensores de humedad utilizados (ref.8)..... | 40 |
| Figura 4. 8: Proceso de medición para calibración de los sensores de humedad | 41 |
| Figura 4. 9: Curva de calibración del Sensor 1..... | 43 |
| Figura 4. 10: Curva de calibración del Sensor 2..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 4. 11: Curva de calibración del Sensor 3..... | 44 |
| Figura 4. 12: Curva de calibración de los tres sensores..... | 44 |
| Figura 4. 13: Sección transversal del modelo a escala en ambos sentidos (Unidades en cm) | 46 |
| Figura 4. 14: Uniones en el modelo a escala de la estructura a) vista lateral, b) vista superior | 47 |
| Figura 4. 15: Conexión de pletinas con la base de fundación a) acercamiento, b) vista completa | 47 |
| Figura 4. 16: Sellado de la fundación | 48 |
| Figura 4. 17: Pesos adheridos a la estructura para los ensayos de: a) desplazamiento controlado y b) medición ambiental | 48 |
| Figura 4. 18: Curva carga v/s deformación de pletina usada en la estructura | 49 |
| Figura 4. 19: a) Contenedor de madera y b) perfiles para evitar flexión de las paredes | 51 |
| Figura 4. 20: Sellado interno del contenedor a) sellado fondo b) sellado en los costados | 52 |
| Figura 4. 21: Apisonador manual para compactar el suelo dentro de la caja..... | 52 |
| Figura 4. 22: Sensor P20 colocado en la caja a 20 cm de profundidad..... | 53 |
| Figura 4. 23: Ubicación del sensor P10 en el ensayo de a) desplazamiento controlada y b) medición ambiental..... | 53 |
| Figura 4. 24: Ubicación del sensor P5 en el ensayo de a) Desplazamiento Controlado b) Medición Ambiental | 54 |
| Figura 4. 25: a) Vistas de perfil y b) vista de frente de la estructura a escala fundada en el modelo | 54 |
| Figura 4. 26: Grilla colocada en el modelo | 55 |
| Figura 4. 27: Acelerómetros a) Kistler Modelo 8310A2 y b) EPISensor modelo ES-U2..... | 55 |
| Figura 4. 28: Conexión de caja a fuente de poder y Tarjeta NI-PCI 6014 | 56 |
| Figura 4. 29: a) Caja que energiza sensores b) Terminal que une a Tarjeta NI-PCI 6014..... | 57 |
| Figura 4. 30: Software LabView durante el registro de datos | 58 |
| Figura 4. 31: Simulación de efecto de lluvia producto del dispensador de agua | 59 |
| Figura 4. 32: Frecuencia natural de la estructura fundada en suelo seco. | 61 |
| Figura 4. 33: Frecuencia y Saturación v/s Tiempo Desplazamiento Controlado primeras 60 horas de medición..... | 62 |
| Figura 4. 34: Frecuencia y Saturación v/s Tiempo Desplazamiento Controlado | 63 |
| Figura 4. 35: Frecuencia y Saturación v/s Tiempo Desplazamiento Controlado primeras 80 horas de medición..... | 64 |
| Figura 4. 36: Frecuencia y Saturación v/s Tiempo Desplazamiento Controlado | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 4. 37: Perfil de Grado de Saturación en dos tiempos diferentes | 65 |
| Figura 4. 38: Frecuencia natural de la estructura fundada en suelo en estado seco | 66 |
| Figura 4. 39: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana uno | 67 |
| Figura 4. 40: Perfiles de contenido de humedad en el suelo en semana uno | 67 |
| Figura 4. 41: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana dos | 68 |
| Figura 4. 42: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana tres | 69 |
| Figura 4. 43: Perfiles de contenido de humedad en el suelo en semana tres..... | 69 |
| Figura 4. 44: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana cuatro..... | 70 |
| Figura 4. 45: Perfiles de contenido de humedad en el suelo en semana cuatro..... | 70 |
| Figura 4. 46: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana cinco | 71 |
| Figura 4. 47: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana seis..... | 72 |
| Figura 4. 48: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana siete..... | 72 |
| Figura 4. 49: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana ocho | 73 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2. 1: Dimensiones de la biblioteca Millikan (ref. 2)..... | 10 |
| Tabla 4. 1: Distribución granulométrica del material usado en el modelo a escala | 33 |
| Tabla 4. 2: Diámetros característicos del suelo usado en el modelo a escala..... | 34 |
| Tabla 4. 3: Coeficientes de uniformidad y curvatura del suelo usado en el modelo a escala | 34 |
| Tabla 4. 4: Datos de la muestra de suelo analizada en el ensayo hidrométrico..... | 34 |
| Tabla 4. 5: Resultados del análisis hidrométrico..... | 35 |
| Tabla 4. 6: Curva Granulométrica del suelo usado en el modelo..... | 36 |
| Tabla 4. 7: Resultados de ensayo de Proctor Modificado | 37 |
| Tabla 4. 8: Dimensiones de la probeta utilizada para la calibración de los sensores | 39 |
| Tabla 4. 9: Dimensiones de las muestra de suelo utilizadas para la calibración de los sensores .. | 39 |
| Tabla 4. 10: Peso de suelo húmedo total y por capas | 40 |
| Tabla 4. 11: Registros de voltajes para distintos contenidos de humedad | 41 |
| Tabla 4. 12: Parámetros del suelo utilizado..... | 42 |
| Tabla 4. 13: Volumen de vacío y volumen de sólido en la probeta | 42 |
| Tabla 4. 14: Saturación del suelo analizado en la probeta..... | 42 |
| Tabla 4. 15: Tabla carga v/s deformación de pletina de 10 cm de largo | 49 |
| Tabla 4. 16: Tabla con ecuaciones sobre dinámica de estructura..... | 50 |
| Tabla 4. 17: Frecuencia teórica de la estructura a escala..... | 50 |

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCION AL MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL

El interés en las técnicas para monitorear estructuras e identificar daños antes de ocurrir un colapso en ellas se ha incrementado dentro de las comunidades de ingenieros civiles, mecánicos y aeroespaciales. Los métodos actuales de identificación de daño son visuales o de localización experimental, como los métodos acústicos, ultrasónicos, magnéticos, radiográficos, y térmicos. Todas estas técnicas experimentales requieren que la vecindad del daño sea conocida a priori y que el sector de la estructura a inspeccionar sea accesible. Sin embargo, además de estas limitaciones, estos métodos experimentales solamente pueden detectar el daño en la superficie de la estructura o cerca de ella.

La necesidad de contar con técnicas de detección de daños globales que puedan aplicarse a todo tipo de estructuras ha llevado al desarrollo de metodologías que examinan cambios en las características de vibración de una estructura. La idea principal es que los parámetros dinámicos de una estructura, tales como las frecuencias, modos de vibración y de amortiguamiento, cambian en función de algunas propiedades físicas de la misma, tales como la masa, amortiguamiento y rigidez. Por consiguiente, los cambios en las propiedades físicas causarán cambios en las propiedades dinámicas, abriendo un camino para la localización y caracterización de los daños.

El Monitoreo de Salud Estructural (SHM, Structural Health Monitoring) (ref. 1) permite identificar la presencia de daños en una estructura en función de los cambios de sus parámetros estáticos y dinámicos, a través de métodos de modelación analítica y de interpretación de datos. Además, esta técnica proporciona información sobre el comportamiento de las estructuras, el que puede ser comparado con las predicciones del análisis estructural. Los métodos acústicos y ultrasónicos son un ejemplo de técnicas de monitoreo de salud estructural apropiados para detectar daños localizados, pero que no consideran el comportamiento global de una estructura. Sin embargo, los métodos basados en el cambio de frecuencias naturales y modos de vibración de una estructura sirven para detectar daños locales y globales.

Las técnicas de monitoreo de salud estructural pueden ser categorizadas en cuatro niveles, según su alcance:

- *Nivel I:* Identificación de la presencia del daño.
- *Nivel II:* Identificación de la presencia y ubicación del daño.
- *Nivel III:* Identificación de la presencia, ubicación y magnitud del daño.
- *Nivel IV:* Predicción de la vida útil de la estructura.

El estado del arte de estas técnicas se encuentra en detectar, localizar y cuantificar el daño en las estructuras al comparar su comportamiento antes y después de solicitaciones de carga sísmica o de tráfico; e inclusive predecir el resto de vida útil de la estructura. Estas técnicas simplifican los procedimientos de inspección de daños, ya que permiten al ingeniero hacer una cuantificación de los daños sin una inspección visual de la estructura. El equipo empleado en el monitoreo de salud estructural consiste en transductores, acondicionadores de señal, dispositivos para adquisición de datos, hardware y software para la interpretación. Los transductores más usados son: acelerómetros (uniaxiales, biaxiales o triaxiales), extensómetros, detectores de resistencia/temperatura, transformadores lineales de voltaje/desplazamiento y detectores de corrosión. Normalmente se instalan los transductores en la estructura y se transmiten las señales por radio, microondas, línea telefónica o fibra óptica hasta una central donde se realiza la interpretación de los datos. Los datos pueden también ser almacenados para un análisis posterior: Sin embargo, es posible automatizar la interpretación de los datos y realizar un monitoreo en tiempo real para implementar esta técnica también en tiempo real de manera de permitir identificar fallas que involucran riesgo y de esta manera evacuar edificaciones o cerrar puentes antes de un colapso.

Las técnicas de monitoreo de salud estructural cambian totalmente la filosofía del mantenimiento de las estructuras, ya que no es necesaria la presencia de daño visible para empezar una reparación, sino que este daño se previene reparándolo desde sus inicios y así economizando los recursos. Además, la información sobre el comportamiento de las estructuras durante un sismo u otro evento importante permite evaluar los métodos de diseño existentes y mejorarlos, ó desarrollar otros nuevos si es necesario.

El monitoreo de salud estructural para estructuras civiles ha ganado bastante atención por parte de investigadores en los últimos años. Organizaciones como la Asociación Internacional para Control Estructural (IASC) y la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) son conscientes de la importancia del monitoreo de salud estructural. Estas asociaciones están conduciendo los estudios en diferentes técnicas hacia la formación del Grupo de Operaciones en Problemas de Referencia en Monitoreo de Salud Estructural, proponiendo a investigadores de todo el mundo problemas de referencia que son resueltos por diferentes métodos, evaluando así su eficacia.

Se ha observado en el último tiempo que no solo cambios en las propiedades físicas de una estructura provocan alteraciones en los parámetros estáticos y dinámicos de este, si no que también variaciones externas a la estructura. Un ejemplo de lo anterior son cambios en la frecuencia natural de una estructura debido a cambios en el contenido de humedad del suelo de fundación. Un ejemplo corresponde a la Biblioteca Robert Millikan del Instituto de Tecnología de California (ref. 2) que tiene implementado desde su construcción en el año 1967 un sistema de monitoreo de salud estructural. En febrero del 2003 se detectaron variaciones de hasta 3% en la frecuencia natural del edificio justo cuando se produjo una fuerte precipitación de 100mm en un periodo de dos días. Luego de este evento la frecuencia natural de la Biblioteca Millikan volvió luego de 10 días a los valores normales antes de las lluvias.

En Chile también se han observado correlaciones similares, principalmente correlaciones con parámetros meteorológicos como la temperatura, viento y precipitaciones. El caso en particular se refiere al edificio de la Cámara Chilena de la Construcción (ref. 3), el cual es monitoreado desde el año 1995 por la Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil (RENADIC) de la Universidad de Chile. Los datos meteorológicos se obtienen de la estación de meteorología del departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Se ha podido apreciar, tal como sucedió en la biblioteca Millikan, un aumento en la frecuencia del edificio de hasta un 1.2% cuando ocurrió una fuerte lluvia de 40 mm aproximadamente entre los días 13 y 15 de Junio de 2007.

En el presente trabajo se estudia si los cambios de humedad en el suelo afectan en la respuesta dinámica de un modelo a escala reducida de una estructura de un grado de libertad. Para esto se correlacionó la vibración de esta estructura, la cual fue monitoreada en el laboratorio, con el contenido de humedad del suelo. Este último parámetro fue medido por medio de sensores de humedad ubicados a distintas profundidades dentro del modelo.

1.2. OBJETIVOS

Los principales objetivos de este estudio son:

- Implementar el método de monitoreo de salud estructural en un modelo a escala reducida de una estructura de un grado de libertad fundada en un suelo que esta sujeto a cambios en su contenido de humedad.
- Determinar si existe una relación entre los cambios en el contenido de humedad del suelo y los cambios en la frecuencia natural de la estructura del modelo a escala. Y establecer, si es que existe una relación, si los cambios de contenido de humedad del suelo en los costados de la fundación o en la base de la fundación tienen una mayor incidencia.

1.3. METODOLOGIA

Se ensayó un modelo a escala reducida con dos metodologías de estudio de dinámica de estructura, la primera corresponde a ensayos con desplazamiento controlado, y la segunda a mediciones ambientales, se utilizaron dos metodologías distintas porque al término del ensayo con desplazamiento controlado se detectaron alteraciones en la interacción suelo - estructura. El modelo consistió en una estructura de un grado de libertad con una fundación de 9cm x 9cm x 30cm, cuya superficie superior coincidió con la superficie del suelo. El suelo fue ubicado en una caja de 90cm x 90cm x 90cm, en estado completamente seco y a una densidad correspondiente al 70% del Próctor modificado del suelo para efectuar el ensayo de desplazamiento controlado. Para el ensayo de mediciones ambientales el suelo fue colocado con una densidad correspondiente al 80% del Próctor Modificado. La estructura de un grado de libertad fue monitoreada en el tiempo con un acelerómetro Kistler y EPISensor ES-U2 ubicados en el tope de la estructura. El

acelerómetro Kistler fue utilizado para el ensayo de desplazamiento controlado y el acelerómetro EPISensor fue utilizado para el ensayo de mediciones ambientales. En el suelo se instalaron tres sensores de humedad, a 5, 10 y 20 cm de profundidad, para medir el contenido de humedad del suelo en función del tiempo. Estos sensores fueron colocados mientras se iba construyendo el modelo desde la base.

Una vez finalizada la construcción del modelo se conectaron los sensores a un sistema de adquisición de datos, por medio del cual se almacenó la información para su posterior análisis. Los sensores de humedad fueron calibraron para obtener los registros en porcentaje de saturación del suelo, mientras que los registros entregados por el acelerómetro se procesaron con métodos de análisis con los cuales se obtiene la frecuencia natural de la estructura.

Para modificar el contenido de humedad del suelo se procedió a agregar la cantidad de agua deseada con un esparcidor manual. Este proceso se repitió varias veces para determinar la existencia de una relación entre cambios de humedad del suelo y variaciones en la frecuencia natural de la estructura del modelo a escala.

1.4 ALCANCES DEL TRABAJO DE TITULO.

En el capítulo 1 se presenta la introducción y objetivos de este trabajo de titulo. En el capítulo 2 se presenta una revisión de la bibliografía que motiva la realización de este trabajo. En el capítulo 3 se presenta el marco teórico de mecánica de suelos, y de los métodos de Ibrahim en el dominio del tiempo y método de espectro de potencia, métodos ocupados para el análisis del modelo, también se hace referencia al funcionamiento de sensores ocupados en el modelo. En el capítulo 4 se explica como se diseñó el modelo además de los resultados y el análisis de los resultados y por ultimo el capítulo 5 se comentan las conclusiones obtenidas de este estudio y recomendaciones para trabajos futuros.

CAPITULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL

El monitoreo de salud estructural (SHM, Structural Health Monitoring) (ref 4) es un método que combina la captura de datos de una estructura con el análisis de los mismos para identificar la presencia, ubicación y magnitud de daño en estructuras a partir de cambios en sus características estáticas y dinámicas. La idea principal de este método consiste en que parámetros dinámicos tales como frecuencia natural, modos de vibración y amortiguamiento modal, cambian en función de las propiedades físicas de la estructura, tales como masa, amortiguamiento y rigidez. Por lo tanto cambios en propiedades físicas modifican las propiedades dinámicas, abriendo un camino para detectar daños en estructuras.

El campo del monitoreo de salud estructural es amplio y se desarrolla y aplica principalmente en ingeniería aeronáutica, civil y mecánica, aunque también hay avances en otras disciplinas como en la eléctrica y la electrónica, por ejemplo. En el campo de la ingeniería civil ya se aplica a estructuras flexibles como puentes, edificios altos y otros de similar complejidad.

El monitoreo de salud estructural (ref. 5) se basa en el registro de parámetros dinámicos que se pueden medir en forma permanente, o en periodos de tiempo determinados, para observar el comportamiento dinámico de una estructura. El monitoreo de estructuras puede ser desarrollado en un periodo de tiempo corto (días), intermedio (semanas), o prolongado (meses o años) o durante toda su vida útil.

Uno de los principales beneficios del monitoreo de salud estructural es la detección temprana del malfuncionamiento de estructuras, para determinar si una estructura monitoreada soporta cargas mayores, realización de seguimientos de procesos constructivos o de reparaciones que permiten identificar fallas en durante el proceso.

La selección de parámetros representativos para ser monitoreados depende de varios factores, tales como el tipo y el propósito de una estructura, solicitudes esperadas, materiales de construcción y condiciones ambientales. Los parámetros de monitoreo más frecuentes son:

mecánicos, físicos y químicos, a modo de ejemplo pueden ser parámetros mecánicos esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, cargas; parámetros físicos tales como temperatura, humedad de ambiente; y parámetros químicos como penetración de sulfatos, pH, oxidación entre otros.

Las etapas fundamentales en un proceso de monitoreo estructural son la elección de estrategia a utilizar, la instalación y mantenimiento del sistema de monitoreo, el análisis de datos, y la interrupción del proceso en caso de dar por terminado el periodo de monitoreo.

Lo más importante es diseñar una buena estrategia de monitoreo, etapa que es influenciada por cada una de las otras etapas nombradas anteriormente y a la vez determina el proceso de las demás etapas y consiste en:

- Establecer los objetivos del monitoreo.
- Seleccionar los parámetros que serán monitoreados.
- Seleccionar el sistema de monitoreo mas adecuado.
- Diseñar la red de sensores.
- Establecer un programa de monitoreo.
- Planificar la extracción de datos.
- Determinar el costo del monitoreo.

Es importante definir los objetivos del monitoreo, los que pueden ser la detección de daños, cambios estructurales, y/o seguimiento de procesos constructivos o de reparaciones. También es importante definir los parámetros que serán monitoreados como amortiguamiento modal, frecuencia natural, modos de vibración. Estos parámetros tienen que ser apropiadamente seleccionados de manera de reflejar el comportamiento de la estructura.

La selección del sistema de monitoreo depende de las especificaciones del monitoreo, tales como objetivos, parámetros seleccionados, frecuencia de lectura, tiempo de monitoreo, procedimiento de instalación. Por ejemplo si se requiere monitorear una estructura de hormigón solicitada por cargas dinámicas usando sensores que no sean influenciados por defectos o discontinuidades como grietas. Una buena elección sería usar un sistema de monitoreo basado en sensores distribuidos en la estructura; además los sensores deben ir adosados al hormigón, ser

insensibles a condiciones ambientales y la lectura de unidades debe estar habilitada para realizar mediciones estáticas y dinámicas con cierta frecuencia y precisión.

Para extraer la mayor cantidad de datos desde el sistema de monitoreo es necesario colocar los sensores en posiciones representativas de la estructura, para evitar que los datos recolectados entreguen información que no sea útil para evaluar el comportamiento de la estructura. Esto depende de la geometría y tipo de la estructura, así como de los parámetros y objetivos de monitoreo.

La gestión y análisis de datos puede ser básica o avanzada. Una gestión básica de datos consiste en la lectura de sensores y almacenamiento de datos, en cambio una gestión de datos avanzado consiste en la interpretación, visualización y el análisis de datos. Los datos registrados pueden ser considerables, los cuales tienen que ser transformados en información útil asociada al comportamiento de la estructura. Esta transformación depende de la estrategia de monitoreo y de los algoritmos que sean usados para interpretar y analizar los datos.

Lo ideal es usar una densa red de sensores que estén bien distribuidos dentro de la estructura, y utilizar un software que permita realizar operaciones automáticas y en forma remota. Sin embargo el costo de un monitoreo puede resultar costoso e inabordable. Es por eso que es importante desarrollar una estrategia de monitoreo óptima que entregue como resultados una buena evaluación del comportamiento de la estructura.

2.2 EFECTOS METEREOLÓGICOS EN LA RESPUESTA DINÁMICA DE UNA ESTRUCTURA

En estudios recientes se han detectado variaciones en la frecuencia natural de algunas estructuras producto de efectos meteorológicos, tales como fuertes lluvias, vientos y variaciones importantes en la temperatura ambiental. A continuación se presentan dos estructuras instrumentadas en donde se registraron cambios en sus frecuencias naturales debido a cambios meteorológicos. La primera corresponde a la biblioteca Robert Millikan ubicada en California, mientras que la segunda corresponde al edificio de la Cámara Chilena de la Construcción ubicado en Santiago.

La biblioteca Robert Millikan (ref. 2), construido en 1967 en el Centro Tecnológico de California en Pasadena, es un edificio de hormigón armado de 9 pisos. Las figuras 2.1 y 2.2 muestran una vista de la elevación y un esquema de una planta típica de la estructura, respectivamente. La tabla 2.2 presenta algunas dimensiones de este edificio.

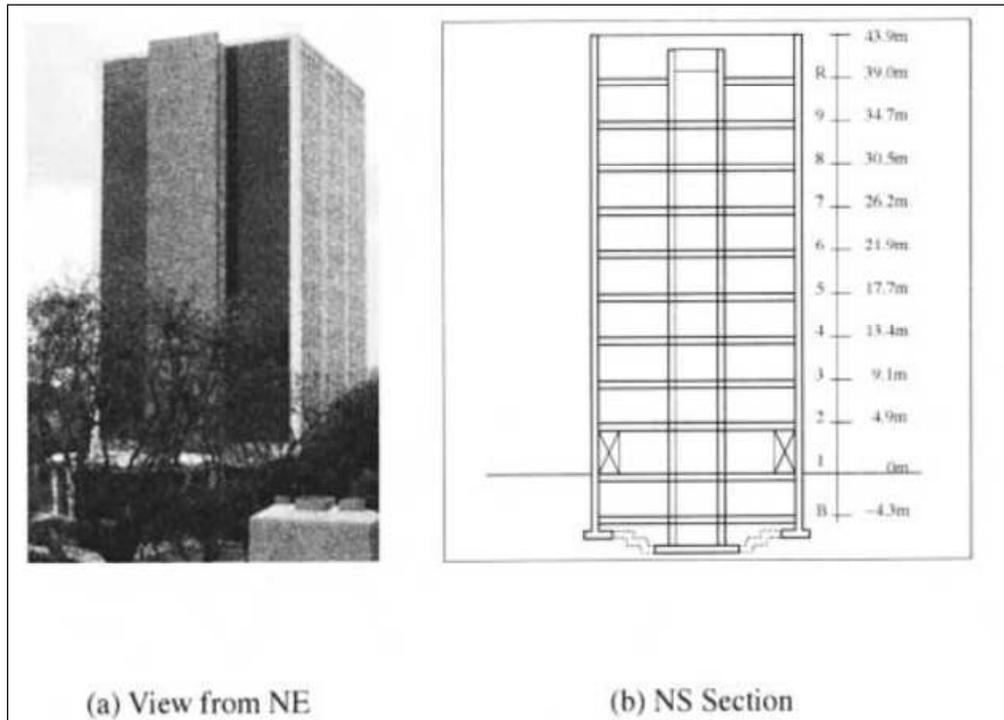


Figura 2. 1: Elevación de la biblioteca Millikan (ref.2)

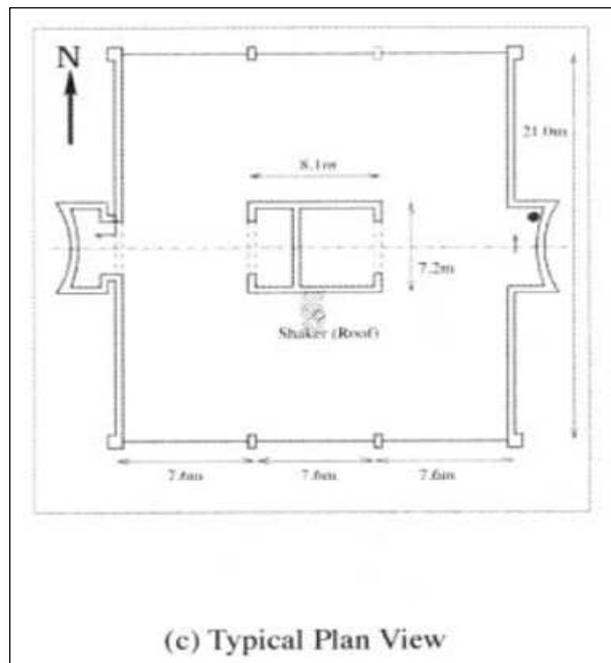


Figura 2. 2: Planta de la biblioteca Millikan (ref. 2)

Tabla 2. 1: Dimensiones de la biblioteca Millikan (ref. 2)

| Dimensiones | | |
|-------------|-----------------------|-------|
| Planta | Largo [m] | 21.00 |
| | Ancho [m] | 22.90 |
| Altura | Superficie [m] | 43.90 |
| | Nivel Base [m] | 48.20 |
| Altura Piso | Tercer a Noveno [m] | 4.27 |
| | Primero y Segundo [m] | 4.88 |
| Fundaciones | Ancho [m] | 9.75 |
| | Profundidad [m] | 1.20 |

Este edificio ha estado instrumentado desde sus inicios con sensores para medir la aceleración, de manera de determinar en el tiempo las frecuencias naturales de la estructura en el sentido N-S y E-O. Se observa en la figura 2.3 que desde el año 1967 hasta la fecha las frecuencias naturales de la estructura en ambos sentidos han ido disminuyendo. En la dirección este-oeste se observa una disminución de un 22% mientras que en la dirección norte-sur una disminución de un 12%. Es posible apreciar que la caída más drástica en la frecuencia natural del edificio ocurrió en el terremoto de San Fernando en 1970. Esta disminución no tuvo una recuperación y estaría claramente asociada a un grado de daño en la estructura. Los otros eventos también coinciden con otros eventos sísmicos ocurridos hasta la fecha.

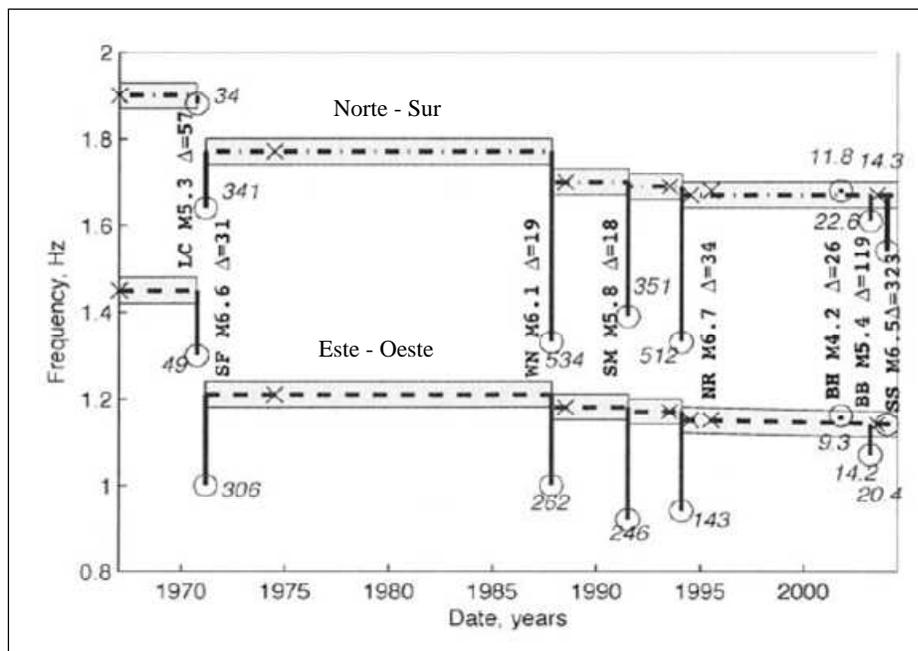


Figura 2. 3: Frecuencia natural de la biblioteca en el tiempo en los sentidos Norte – Sur y Este - Oeste (ref. 2)

En las cercanías de la biblioteca Millikan se ubica una estación meteorológica que ha registrado la temperatura, cantidad de agua caída, y humedad, entre otros parámetros, durante este periodo de tiempo. Gracias a estos registros ha sido posible observar correlacionar cambios en las frecuencias naturales de la biblioteca con eventos meteorológicos importantes. A continuación se presentan algunos ejemplos:

- Vientos de Santa Ana: Se observaron reducciones de la frecuencia natural de la biblioteca de hasta un 3% en la dirección este–oeste cuando ocurrieron fuertes vientos, llamados vientos de Santa Ana. Una vez terminado este evento atmosférico las frecuencias volvieron a los valores previos.
- Altas temperaturas: Se registraron variaciones de la frecuencia natural en 1% cuando la temperatura tuvo un aumento importante en septiembre de 2002, cuando las temperaturas sobrepasaron los 40°C, volviendo a los valores previos una vez que la temperatura disminuyó.
- Precipitaciones: En febrero del 2003 ocurrieron intensas precipitaciones en la zona, dejando una cantidad de agua caída de 100mm en 2 días. En ese periodo se observó un incremento de la frecuencia natural en la dirección este – oeste y la torsional en un 3%. Estas frecuencias volvieron a los valores previos luego de 10 días después de las precipitaciones. Se puede apreciar en la figura 2.4 que la lluvia se registró entre los días 11 y 13 de febrero del 2003 (área ennegrecida), las frecuencias aumentaron en la dirección este – oeste y torsional, mientras que la frecuencia en la dirección norte – sur no presentó variaciones significativas.

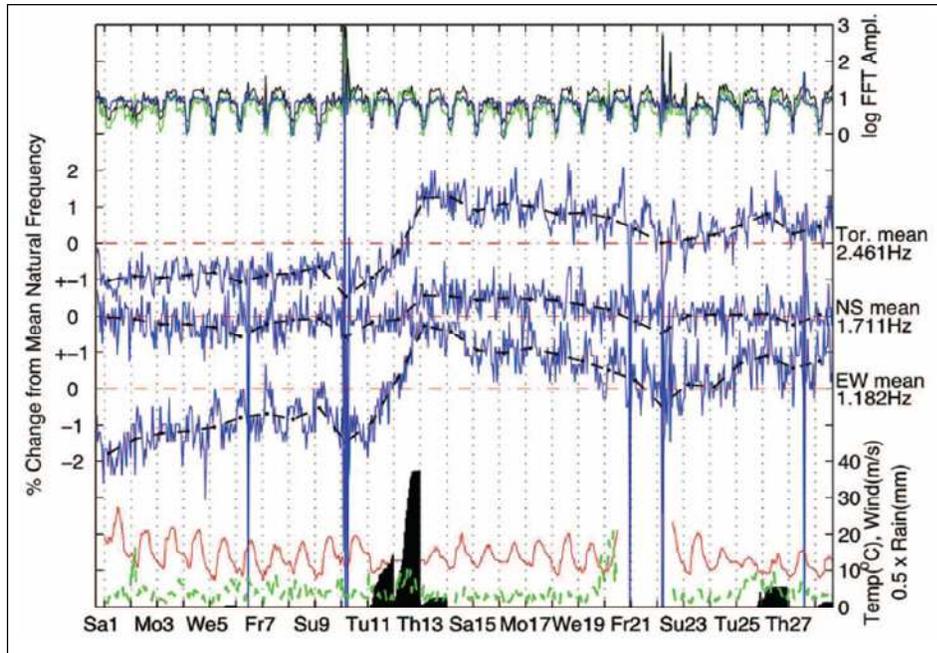


Figura 2. 4: Cambios en las frecuencias naturales de la biblioteca en el tiempo y registros de precipitación, viento y temperatura (ref. 2)

Aquí en Chile también se ha llevado a cabo un estudio similar en el edificio de la Cámara Chilena de la Construcción (ref. 3). En ese estudio se realizó un registro continuo de vibraciones para determinar los parámetros modales de esta estructura en el tiempo y se correlacionaron variaciones de propiedades dinámicas con eventos meteorológicos. El edificio de la Cámara Chilena de la Construcción se ubica en la calle Marchant Pereira N° 10, comuna de Providencia, en Santiago, y es utilizado principalmente para oficinas. Posee 20 pisos sobre el nivel de terreno y 4 subterráneos; su altura es de 77.7 m desde la base de la fundación al cielo del piso 20, y de 66.6m desde el nivel de terreno. Este edificio está instrumentado con sensores para registrar vibraciones desde el año 1995. El sistema está compuesto por 12 acelerómetros uniaxiales y una central de adquisición de datos. El monitoreo lo realiza la Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil (RENADIC) de la Universidad de Chile.

Los sensores se encuentran distribuidos de manera de poder estudiar el movimiento espacial de la estructura, los desplazamientos, las distorsiones de piso, torsión, y rotación de muros a nivel de fundación, entre otros aspectos. La figura 2.5 muestra la ubicación de los sensores instalados en esta estructura. Los datos recolectados por la central de registro se graban en 2 tarjetas de memoria y la información puede ser recolectada vía telefónica mediante modem

(registros de corta duración), o en terreno a través de un computador portátil retirando los datos directamente de la central de registro o de las tarjetas de memoria.

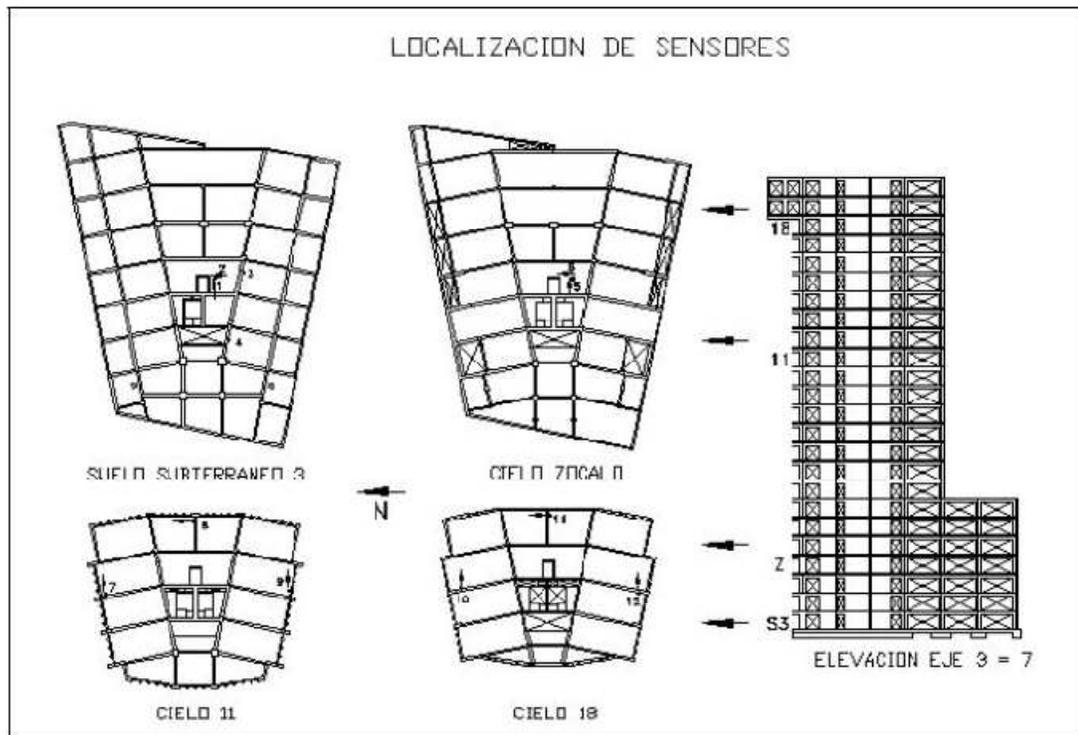


Figura 2. 5: Ubicación de los sensores instalados en la Cámara Chilena Construcción (ref. 3)

La estación meteorológica que ha registrado los datos está ubicada en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, ubicado en Blanco Encalada N° 2002, comuna de Santiago. El análisis de los datos entregó como resultados que cambios significativos en la temperatura ambiental, así como precipitaciones importantes generaron variaciones en la frecuencia de los modos predominantes del edificio. En el caso de la temperatura la frecuencia del primer modo varió un 1.5% y la frecuencia del sexto modo varió un 7% (mayor variación) con respecto a temperaturas mínimas y máximas identificadas en un periodo en 24 horas.

En el caso de precipitaciones, entre los días 13 de Junio y 15 de Junio de 2007 se registró una intensa precipitación de 40mm, que coincidió con un aumento en las frecuencias predominantes de la estructura de hasta un 1.2%. Las figuras 2.6 y 2.7 muestran los registros de la precipitación acumulada cada 15 minutos y la frecuencia de la estructura en el primer y tercer modo respectivamente, entre el 7 y el 19 de junio del 2007. Se puede observar que la variación de ambas frecuencias comienza casi inmediatamente al iniciarse la lluvia, aumentando su valor

durante las precipitaciones y disminuyendo paulatinamente una vez que terminan las precipitaciones. Este proceso de recuperación de las frecuencias tomó alrededor de seis días.

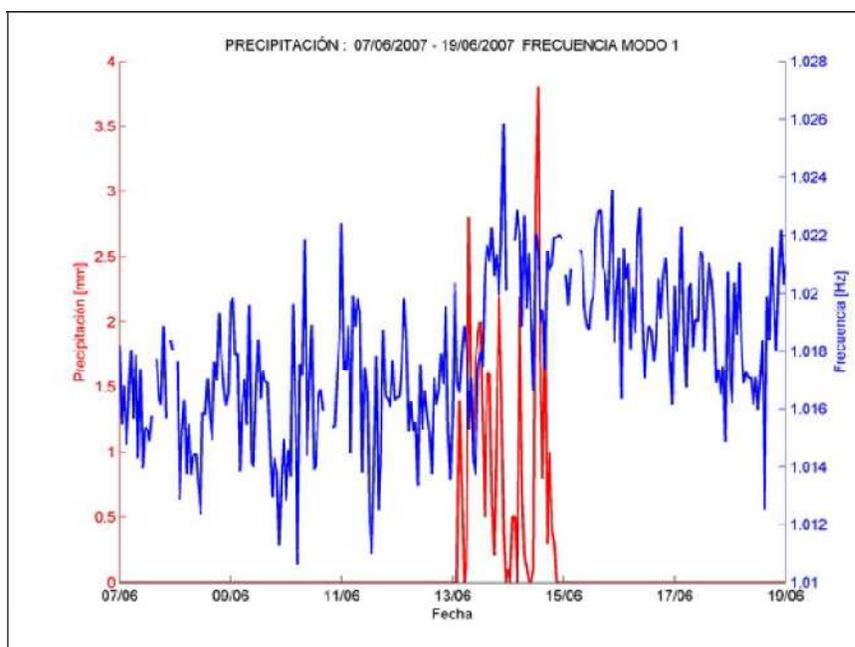


Figura 2. 6: Registro de la precipitación acumulada cada 15 minutos y la frecuencia del primero modo, entre el 7 y el 19 de Junio de 2007 Modo 1 (ref. 3)

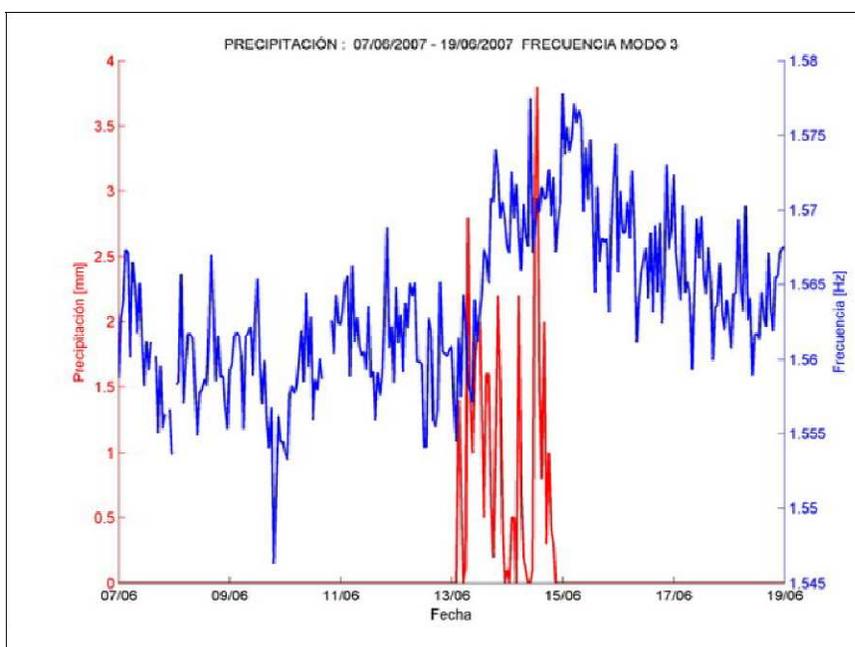


Figura 2. 7: Registro de la precipitación acumulada cada 15 minutos y la frecuencia del tercer modo, entre el 7 y el 19 de Junio de 2007 (ref. 3)

2.3 ESTUDIO ANALITICO PARA INVESTIGAR EL CAMBIO EN LA FRECUENCIA

A continuación se presenta un breve resumen de algunos resultados obtenidos por María Todorovska y Yousef Al Rjoub (ref. 6, ref. 7), quienes desarrollaron un modelo matemático utilizando la teoría de Biot, la cual permite obtener ecuaciones de propagación de ondas elásticas en un medio poroso. El principal interés de estos investigadores era poder explicar porque la frecuencia natural de la Biblioteca Millikan se ha visto afectada por cambios meteorológicos. La hipótesis postulada en sus estudios es que los cambios en la frecuencia de la Biblioteca Millikan se deben a que eventos meteorológicos generan cambios en las propiedades del suelo, en particular en un cambio en la rigidez del suelo de fundación y esto a su vez cambiaría la rigidez del sistema suelo-estructura.

El modelo analítico esta representando por una viga de corte soportada por una fundación circular rígida, empotrada en un suelo semi-infinito poro-elástico, homogéneo, e isotrópico, como se muestra en la figura 2.8.

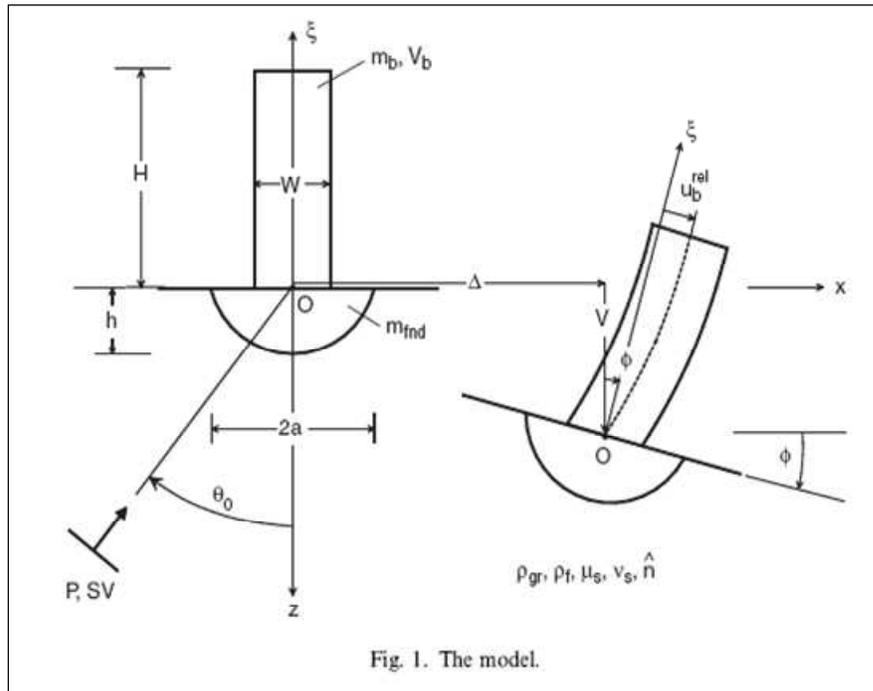


Figura 2. 8: Esquema del modelo utilizado por Todorovska y Yousef Al Rjoub (ref. 6)

Los parámetros que se consideraron en el modelo fueron:

- Peso del edificio. (m_b)
- Peso de la fundación. (m_{fnd})
- Altura del edificio. (H)
- Profundidad Fundación (h)
- Dimensión de la planta. (W)
- Profundidad de la roca. (z)
- Velocidad de las ondas de corte en el suelo de fundación.

En este estudio se analizaron dos casos, variando la velocidad de onda de corte del suelo.

- Caso 1 $V_s = 300$ m/s
- Caso 2 $V_s = 500$ m/s

En cada caso se estudiaron los resultados para un suelo seco, suelo saturado con contacto drenado y contacto no drenado, es decir con suelo de fundación permeable o impermeable.

Los valores asignados a los parámetros del modelo trataron de replicar a los de la biblioteca Robert Millikan. Los valores utilizados en el modelo fueron:

- Peso del edificio 1.05×10^8 N
- Peso de la fundación 0.14×10^8 N
- Altura del edificio 44 m
- Profundidad de la fundación 4 m
- Dimensión de la planta 21m x 23m
- Profundidad de la roca 275 m

Las figuras 2.9 y 2.10 presentan gráficos de desplazamiento (Δ), giro (ϕ), rigidez del suelo en su parte real e imaginaria (K) y desplazamiento relativo del techo (μ_b^{rel}) en función de la frecuencia. Ambas figuras muestran que la primera y la segunda frecuencia aparente de la estructura fueron ligeramente incrementadas debido al contenido de agua en el suelo, el agua se

incorpora en el modelo analizando los casos de suelo saturado con contacto drenado y no drenado, así se asimila el efecto de la lluvia (contacto no drenado) y momento posterior a la lluvia (contacto drenado), y el incremento es mayor para suelo de fundación con contacto no drenado. El recuadro que aparece en el gráfico de μ_b^{rel} en ambas figuras agranda la vista del primer peak. Se puede observar para el caso 1, que corresponde a condiciones similares a la Biblioteca Millikan, que para un suelo de fundación con contacto no drenado el primer modo del sistema de frecuencias aumenta en 2% (1.44Hz a 1.47Hz) cuando el suelo está saturado. Para un suelo de fundación de contacto drenado el cambio en la frecuencia es menor, del orden de 1 a 1.5%. Esta tendencia y la magnitud del cambio son coherentes con las observaciones de las vibraciones NS de la Biblioteca Millikan, por lo que este modelo de fundación rígida parece ser bastante apropiado. Para el suelo más rígido del caso 2, el cambio de la frecuencia es alrededor del 1% para el suelo de fundación con contacto no drenado.

La amplitud del primer peak de la función de transferencia de la construcción es muy similar para el suelo seco y saturado en el suelo de fundación con contacto drenado, y en el suelo saturado y el suelo de fundación con contacto no drenado es mayor en un 12% para el caso 1, y alrededor del 9% en el caso 2. La principal razón de este aumento parece ser la mayor rigidez del suelo de fundación.

Los resultados muestran también que la rigidez y amortiguamiento de giro del suelo de fundación no son afectados por el contenido de agua en el suelo, mientras que la rigidez y amortiguamiento horizontal y vertical son significativamente afectados, en particular en suelos de fundación impermeable. Se observaron dos comportamientos dependiendo de la frecuencia, para bajas frecuencias, la rigidez del suelo de fundación es mayor en suelos saturados que en suelos secos, mientras que para altas frecuencias ocurre lo contrario.

Caso1

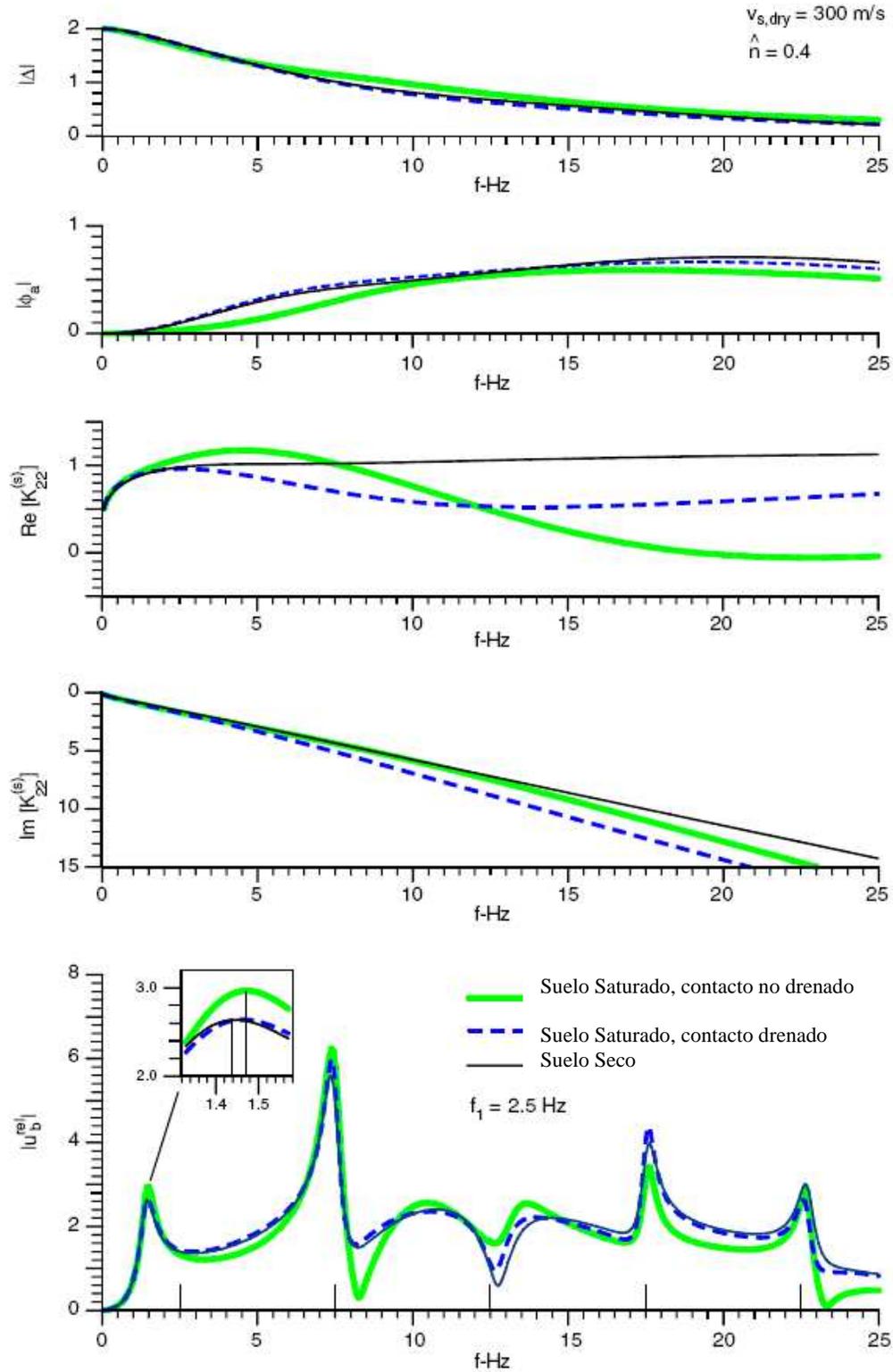


Figura 2. 9: Variación de la frecuencia relativa en función de la respuesta de transferencia para el Caso 1 ($V_s = 300 \text{ m/s}$) (ref. 7)

Caso 2 :

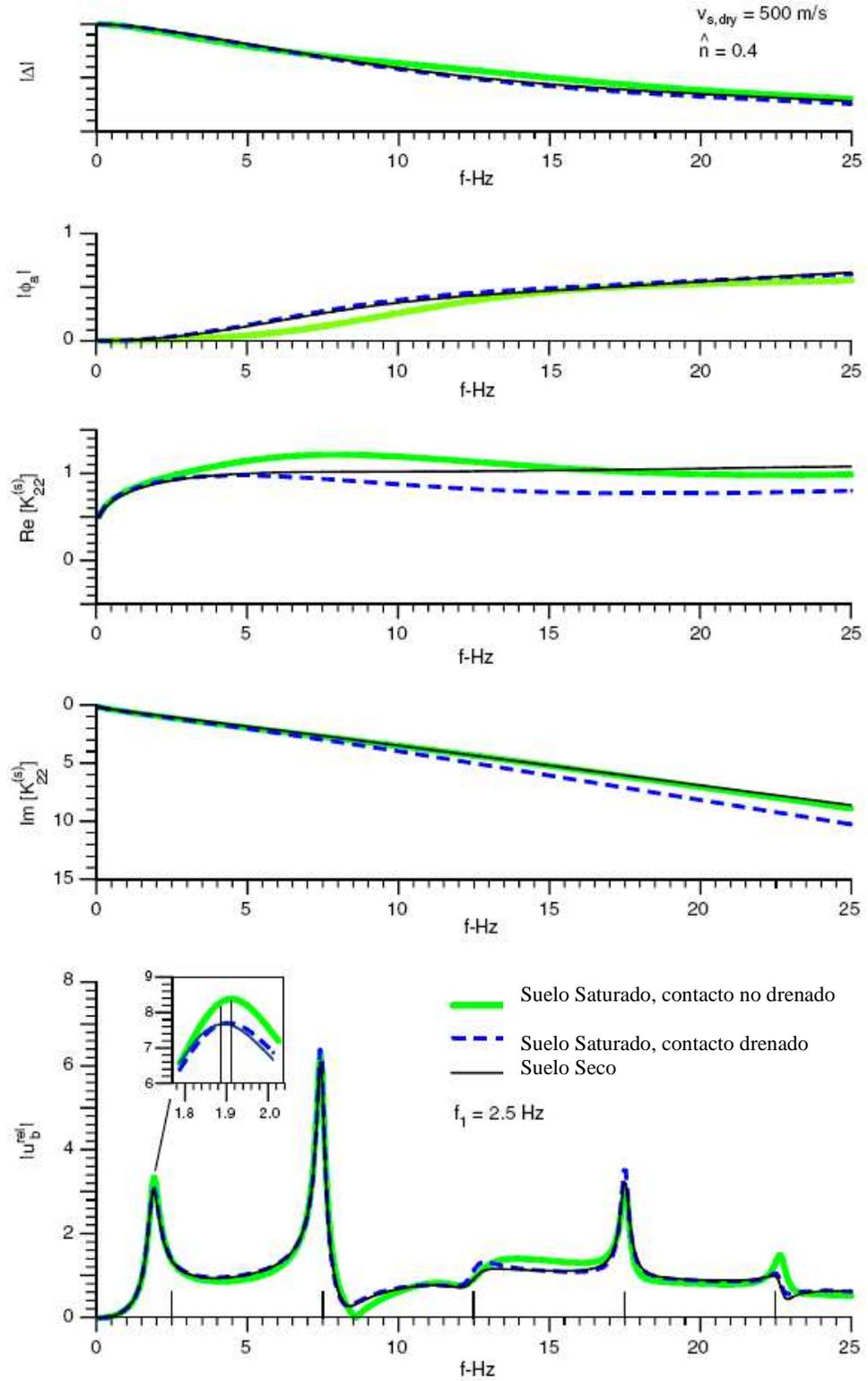


Figura 2. 10: Variación de la frecuencia relativa en función de la respuesta de transferencia para el Caso 2 ($V_s = 500 \text{ m/s}$) (ref. 7)

CAPITULO III

MARCO TEORICO

3.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES UTILIZADOS

3.1.1 SENSORES DE HUMEDAD

Los sensores de humedad utilizados en este estudio fueron los sensores MP406 desarrollados por ICT International, estos sensores utilizan el principio de onda estacionaria (ref. 8, ref. 9). La medición del contenido de humedad de un suelo se basa en que el suelo está compuesto de una matriz de partículas de mineral, agua, y aire. La constante dieléctrica de minerales típicos que componen las arenas, gravas, limos y arcillas varía generalmente entre 3 y 4. Por otra parte la constante dieléctrica del agua es aproximadamente igual a 80, mientras que la del aire es igual a 1. Cualquier cambio en el contenido de agua en un mismo volumen de suelo se refleja en un cambio en la constante dieléctrica del suelo. Por lo tanto, si se mide la constante dieléctrica del material se podrá estimar el contenido de agua en el suelo. Aún cuando los sensores utilizados tienen una calibración para entregar el contenido de volumen de agua, en este estudio se llevó a cabo una calibración independiente.

La figura 3.1 muestra un esquema de este tipo de sensor, en donde se observa el cuerpo que contiene un oscilador sinusoidal de 100 MHz, una sección de línea de transmisión coaxial y un circuito de medición. La cabeza del sensor tiene cuatro varillas de acero inoxidable, de las cuales las tres exteriores están conectadas a un instrumento de tierra y forman un protector eléctrico alrededor de la varilla central de la señal. Esto actúa como una sección adicional de la línea de transmisión, con una impedancia que depende de la constante dieléctrica de la matriz de suelo en la cual se inserta. Si esta impedancia difiere de la línea de transmisión interna fija, una porción de la señal que viaja como onda se reflejará por detrás de la conexión en el alambre de la señal y en la línea de transmisión. El componente de la onda reflejada interfiere con la señal de incidencia, lo cual origina una variación en el voltaje a lo largo de la línea de transmisión, esta variación es la que se entrega como medición.

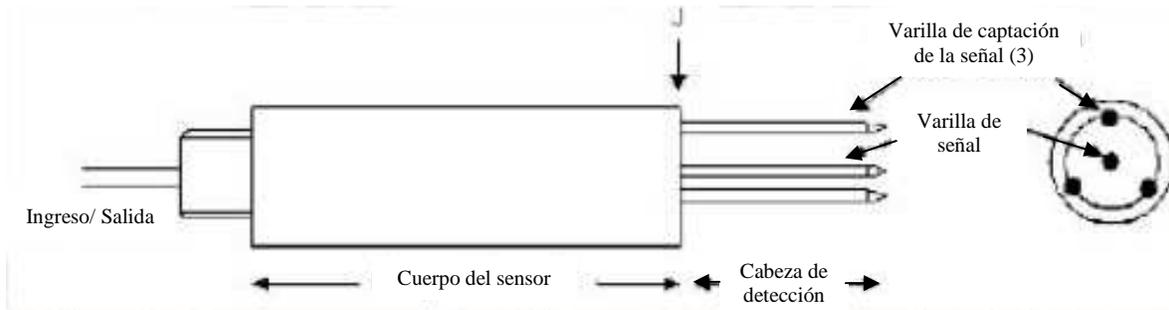


Figura 3. 1: Esquema del sensor de humedad modelo MP406 (ref. 9)

3.1.2 ACELEROMETROS

El acelerómetro utilizado para medir las vibraciones de la estructura a escala y así obtener su frecuencia natural fue un sensor Kistler modelo 8310A2 para los ensayos con desplazamiento controlado y un sensor kinematics EPISensor modelo FBA ES-U2 para los ensayos con mediciones ambientales.

El sensor Kistler (ref. 10), mostrado en la figura 3.2, es un sensor capacitivo que mide aceleraciones en una sola dirección. El elemento sensitivo interno consiste en una pequeña masa inercial y un elemento flexible situado entre dos placas que actúa como electrodo. La posición de la masa entre los dos electrodos depende de la aceleración a la que es sometida, y dicha posición se obtiene midiendo la variación de capacidad entre ella y el electrodo fijo. Sometida a aceleraciones la masa se mueve entre los dos electrodos dando como resultado la señal de salida en forma de voltaje. Este tipo de acelerómetros lleva incorporado internamente un acondicionador de señal, el cual se encarga de proporcionar por un lado energía al sensor y por otro de obtener una señal de salida analógica de voltaje.



Figura 3. 2: Sensor Kistler 8310A2 utilizado en los ensayos con desplazamiento controlado

El sensor kinematic EPISensor modelo FBA ES-U2 (ref. 11), mostrado en la figura 3.3, utiliza el principio de fuerza balanceada (FBA en Ingles), que consiste en mantener una fuerza en equilibrio dentro del sensor. Cuando una vibración perturba el acelerómetro la masa se mueve de su posición de equilibrio, generando una señal eléctrica, por medio de la cual es posible obtener la aceleración, velocidad y desplazamiento de la estructura que se desea medir. En la figura 3.2 se aprecia un esquema que muestra las principales componentes de este tipo de acelerómetro. La bobina y las placas del sensor capacitivo son un ensamblaje que está montado en resortes que se mueven con respecto a la placa central fija del transductor capacitivo debido a la vibración de la estructura. De esta vibración se obtiene una señal de corriente alterna de la misma frecuencia que el oscilador, la corriente que viaja a través de la bobina es directamente proporcional a la aceleración aplicada. Este amplificador amplifica la corriente alterna, luego pasa a un demodulador donde sincrónicamente se demodula y se filtra creando una corriente continua. Con el paso de esta corriente a través de una impedancia compleja que consiste en una resistencia y un condensador se puede convertir a un voltaje de salida proporcional a la aceleración aplicada al acelerómetro.



Figura 3. 3: Sensor EPISensor ES-U2 utilizado en los ensayos con mediciones ambientales

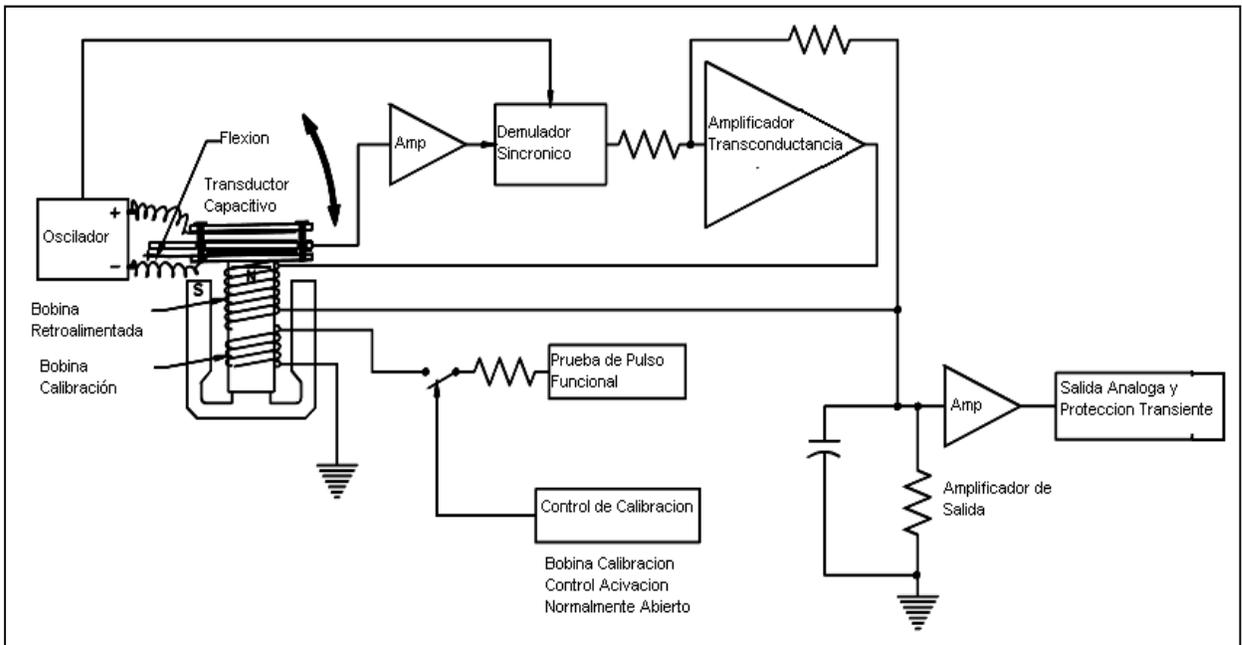


Figura 3. 4: Esquema de un acelerómetro modelo kinematics EPI Sensor (ref. 11)

3.2. MARCO TEORICO SOBRE MECANICA SUELOS

El suelo en general (ref. 12) es un sistema discontinuo constituido principalmente por tres fases: sólida (partículas y minerales), aire, y líquida (agua generalmente). Para entender mejor las características de las partículas de suelo, estas tres fases se ordenan como se muestra en la figura 3.5b. En el lado derecho se indican los pesos y al lado izquierdo se indican los volúmenes ocupados por cada fase.

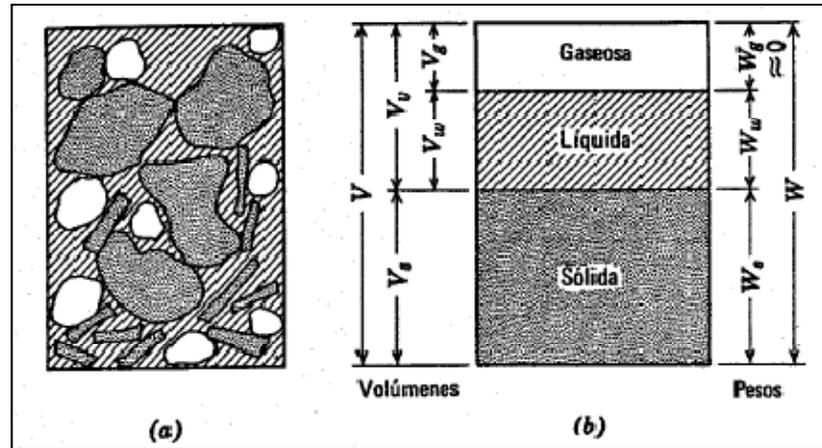


Figura 3. 5: Esquema con las tres fases del suelo a) suelo natural b) división por fases (ref. 12)

Donde:

- V : volumen total.
- V_v : volumen de vacíos
- V_s : volumen de las partículas
- V_w : volumen de agua
- V_g : volumen de aire
- W : peso total de la muestra
- W_s : peso del suelo
- W_w : peso del agua
- W_g : peso del aire, igual a cero.

Tres importantes parámetros asociados a los volúmenes de las distintas fases son: la porosidad, el índice de vacíos, y el grado de saturación. La porosidad es la relación que existe entre el volumen de vacíos y el volumen total, mientras que el índice de vacíos es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de los sólidos o de las partículas.

$$\text{Porosidad} \quad n = \frac{V_v}{V} \quad (3.1)$$

$$\text{Indice de vacíos} \quad e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.2)$$

El grado de saturación indica el volumen de vacío ocupado por el agua; el valor es 0% si el suelo está completamente seco, mientras que es igual a 100% si el suelo está saturado.

$$\text{Grado de saturación} \quad S = \frac{V_w}{V_v} \quad (3.3)$$

El contenido de humedad, que es el cociente entre el peso de agua en el suelo y el peso de suelo seco.

$$\text{Contenido de humedad} \quad w = \frac{W_w}{W_s} \quad (3.4)$$

La densidad del suelo se define como la razón entre el peso del material y el volumen total ocupado por este. Por otra parte, se denomina peso específico del material a la relación entre la densidad del material y la densidad del agua a 4°C, denominada γ_0 .

$$\text{Densidad} \quad \gamma = \frac{W}{V} \quad (3.5)$$

$$\text{Peso específico} \quad G = \frac{\gamma}{\gamma_0} \quad (3.6)$$

La densidad del suelo se puede determinar también en función de las definiciones presentadas arriba. A continuación se muestran relaciones para conocer la densidad total, la densidad del suelo seco, la del suelo boyante, y la densidad del suelo saturado.

$$\text{Densidad total} \quad \gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{G+Se}{1+e} \gamma_w \quad (3.7)$$

$$\text{Densidad del suelo seco} \quad \gamma_d = \frac{W_d}{V} = \frac{G}{1+e} \gamma_w = \frac{G\gamma_w}{1+wG/S} = \frac{\gamma_t}{1+w} \quad (3.8)$$

$$\text{Densidad boyante} \quad \gamma_b = \gamma_t - \gamma_w = \frac{G-1-e(1-S)}{1+e} \gamma_w \quad (3.9)$$

$$\text{Densidad del suelo saturado } \gamma_s = \gamma_t - \gamma_w = \frac{G-1}{1+e} \gamma_w \quad (3.10)$$

Con el diagrama trifásico se puede obtener otra relación entre las definiciones antes dadas que permite relacionar el contenido de humedad y el grado de saturación:

$$Gw = Se \quad (3.11)$$

3.3. MARCO TEORICO SOBRE DINAMICA DE ESTRUCTURAS

En este trabajo de título se utilizaron dos procedimientos para identificar la frecuencia del modelo, los cuales se presentan en forma resumida a continuación. Se utilizan dos métodos distintos debido a que se utiliza dos experiencias distintas para captar la frecuencia natural del modelo, la primera experiencia se realizó mediante desplazamiento controlado, por lo que el método de Ibrahim es conveniente para procesar los registros obtenidos, y la segunda experiencia se realizó por medio de mediciones ambientales y uno de los métodos de análisis para este tipo de registros es el método de espectro de potencia.

3.3.1 METODO DE IBRAHIM EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (ITD)

La técnica de Ibrahim en el dominio del tiempo (ref. 13) fue desarrollada para sistemas de múltiple grados de libertad y permite obtener estimaciones de los parámetros globales para polos (raíces ecuación característica del sistema) y formas modales complejas (o reales). Utiliza una entrada múltiple de datos en el dominio del tiempo y se basa en el modelo modal.

El método plantea la construcción de una matriz de respuesta expandida, en la que cada uno de sus elementos es un vector que representa la respuesta de la estructura en un instante de tiempo, es decir, cada elemento de la matriz es un vector de dimensiones “n GDL x 1”. La matriz se construye considerando un aumento progresivo de los vectores de respuesta, en un intervalo de tiempo tanto e filas como en columnas, obteniendo una matriz del tipo Hankel por bloques.

$$\widehat{h}(t)_{in\ x\ k} = \begin{bmatrix} [h(t)]_{n\ x\ 1} & [h(t + \Delta t)]_{n\ x\ 1} & \dots & [h(t + (k - 1)\Delta t)]_{n\ x\ 1} \\ [h(t + \Delta t)]_{n\ x\ 1} & [h(t + 2\Delta t)]_{n\ x\ 1} & \dots & [h(t + k\Delta t)]_{n\ x\ 1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [h(t + (i - 1)\Delta t)]_{n\ x\ 1} & [h(t + i\Delta t)]_{n\ x\ 1} & \dots & [h(t + (k + i - 2)\Delta t)]_{n\ x\ 1} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Seguendo el método analítico detallado en el trabajo de Lorca (ref. 13) se puede reescribir la ecuación 3.13 en el modelo modal en el dominio del tiempo expandido, con respecto a muestras de tiempo:

$$[\widehat{h}(t)]_{in\ x\ k} = [\widehat{V}][\backslash e^{\Delta t} \backslash][\widehat{L}] \quad (3.13)$$

Buscando una relación entre $[h(t)]_{in\ x\ k}$ y su versión desplazada en un intervalo de tiempo:

$$\widehat{h}(t + \Delta t)_{in\ x\ k} = \begin{bmatrix} [h(t + \Delta t)]_{n\ x\ 1} & [h(t + 2\Delta t)]_{n\ x\ 1} & \dots & [h(t + (k - 1)\Delta t)]_{n\ x\ 1} \\ [h(t + 2\Delta t)]_{n\ x\ 1} & [h(t + 3\Delta t)]_{n\ x\ 1} & \dots & [h(t + (k + 1)\Delta t)]_{n\ x\ 1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [h(t + i\Delta t)]_{n\ x\ 1} & [h(t + (i + 1)\Delta t)]_{n\ x\ 1} & \dots & [h(t + (k + i)\Delta t)]_{n\ x\ 1} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow [\widehat{h}(t + \Delta t)]_{in\ x\ k} = [\widehat{V}][\backslash e^{\Delta t} \backslash][\backslash e^{\Delta t} \backslash][\widehat{L}] \quad (3.14)$$

Introduciendo la identidad $[\widehat{V}]^+[\widehat{V}] = [\backslash \backslash]$, donde $[\widehat{V}]^+$ es la pseudo-inversa de $[\widehat{V}]$:

$$[\widehat{h}(t + \Delta t)]_{in\ x\ k} = [\widehat{V}][\backslash e^{\Delta t} \backslash][\widehat{V}]^+[\widehat{V}][\backslash e^{\Delta t} \backslash][\widehat{L}] \quad (3.15)$$

Incorporando la ecuación 3.14 en la ecuación 3.16:

$$[\widehat{h}(t + \Delta t)]_{in\ x\ k} = [\widehat{V}][\backslash e^{\Delta t} \backslash][\widehat{V}]^+[\widehat{h}(t)]_{in\ x\ k} \quad (3.16)$$

Se define:

$$[W]_{in\ x\ in} = [\widehat{V}][\backslash e^{\Delta t} \backslash][\widehat{V}]^+ \quad (3.17)$$

Por lo que la ecuación 3.17, se reescribe como:

$$[\widehat{h}(t + \Delta t)]_{in\ x\ k} = [W]_{in\ x\ in}[\widehat{h}(t)]_{in\ x\ k} \quad (3.18)$$

En la ecuación 3.19, las matrices de Hankel $[\widehat{h}(t + \Delta t)]_{in\ x\ k}$ y $[\widehat{h}(t)]_{in\ x\ k}$ son conocidas a partir de los datos obtenidos en las mediciones. Estas matrices son utilizadas para estimar la matriz $[W]_{in\ x\ in}$. Luego, la definición de esta matriz puede ser reformulada en un problema de valores propios:

$$[W]_{in\ x\ in}[\widehat{V}] = [\widehat{V}][\backslash e^{\Delta t} \backslash] \quad (3.19)$$

Los valores propios, $e^{\lambda_r \Delta t}$, generan los polos del sistema λ_r . Los vectores propios generan los correspondientes vectores de forma modal $[V] = [\{\psi\}_1 \dots \{\psi\}_N \{\psi\}_1^* \dots \{\psi\}_N^*]$.

Los polos del sistema serán valores complejos. Asumamos cada polo del sistema de la siguiente forma $\lambda_r = \alpha_r + i\gamma_r$, las cuales se relacionan con la solución del sistema de la siguiente manera:

$$\alpha_r + i\gamma_r = e^{(a_r + b_r)\Delta t} \quad (3.20)$$

$$\Rightarrow \alpha_r = e^{a_r \Delta t} \cos b_r \Delta t \quad (3.21)$$

$$\gamma_r = e^{a_r \Delta t} \operatorname{sen} b_r \Delta t$$

$$\Rightarrow a_r = \frac{1}{2\Delta t} \log (\gamma_r^2 + \alpha_r^2) \quad (3.22)$$

$$b_r = \frac{1}{\Delta t} \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_r}{\alpha_r} \right)$$

De la ecuación de movimiento de un sistema de N grados de libertad (GDL) del dominio del tiempo transformado al dominio de Laplace (variable p), es posible obtener la siguiente relación:

$$p_r = a_r + ib_r = -\varpi_r \beta_r \pm \varpi_r \sqrt{1 - \beta_r^2} \quad (3.23)$$

Donde: $\beta_r = \frac{c_r}{2m_r \varpi_r}$, Razón de Amortiguamiento

$\varpi_r = \sqrt{\frac{k_r}{m_r}}$, Frecuencia Natural.

Definiendo la frecuencia amortiguada como $\varpi_D = \varpi \sqrt{1 - \beta^2}$, la cual es la frecuencia de interés e imponiendo que se cumple $\varpi = \varpi_D$, se tienen las siguientes relaciones para obtener las características buscadas de sistema.

$$\varpi_{Dr} = b_r \quad (3.24)$$

$$\beta_r = \frac{a_r}{\sqrt{a_r^2 + b_r^2}} \quad (3.25)$$

3.3.2 ESPECTRO DE DENSIDAD DE POTENCIA (PSD)

El método PSD (ref. 14) para identificación de parámetros dinámicos es un método no paramétrico que trabaja en el espacio de la frecuencia. Por lo general el análisis espectral se realiza a partir de la transformada de Fourier que está definida para un dominio continuo (o análogo). Así que para el proceso de señales digitales (o discreta) se utiliza la Transformada Discreta de Fourier (DFT) y un algoritmo eficiente para resolver la DFT es la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Si se considera una muestra de una señal $x(t)$ para $-\infty < t < \infty$ y si se asume que la señal tiene una energía finita, es decir.

$$\sum_{t=-\infty}^{\infty} x^2(t) < \infty \quad (3.26)$$

La DFT de la señal se puede expresar como:

$$X(\omega) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)t} \quad (3.27)$$

Donde ω_s es la frecuencia de muestreo de la señal. Por el teorema de Parseval la energía de una señal se puede relacionar como:

$$\sum_{t=-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |X(\omega)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_{xx}(\omega) \quad (3.28)$$

Donde $S_{xx}(\omega)$ se denomina el espectro de potencia y se interpreta como la contribución de los componentes de $x(n)$ entre ω y $\omega + d\omega$ a la energía total del sistema. En la práctica no se cuenta con una señal de duración infinita, o dicho de otra manera no está definida para $-\infty < t < \infty$. En tal caso, se asume que la señal es distinto a cero solo en el tramo $t = 0, 1, \dots, N-1$ y que es cero para el resto de la señal. Luego el espectro de potencia se describe como:

$$S_{xx}(\omega) = |X(\omega)|^2 = \left| \sum_{t=0}^{N-1} x(t)e^{-j2\pi\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)t} \right|^2 \quad (3.29)$$

La potencia de una señal como función de la frecuencia se denomina periodograma y se define como:

$$P(\omega) = \frac{1}{N} S_{xx}(\omega) \quad (3.30)$$

En un caso práctico, para utilizar el algoritmo de FFT, el espectro de potencia se puede definir para N puntos discretos, lo que puede ser muy poco para distinguir la energía de distintas frecuencias cercanas. Una manera de sobrellevar este problema es aumentar el largo de la señal agregando ceros. Si a la señal de largo N le agregamos $L-N$ ceros al final del registro, obtenemos una nueva señal de largo L . Esta señal lo transformamos utilizando DFT o FFT y el nuevo espaciado entre frecuencias sería:

$$\frac{2\pi}{L\omega_s} < \frac{2\pi}{N\omega_s} \quad (3.31)$$

Agregar ceros no aumenta la verdadera resolución de la frecuencia, simplemente interpola el espectro en un mayor número de puntos. En la práctica se seleccionan datos lo que es equivalente a multiplicar $x(t)$ por una ventana rectangular:

$$s(t) = x(t)w(t) \quad (3.32)$$

Donde la ventana rectangular se define como:

$$w(t) = \begin{cases} 1 & \text{para } 0 < t < N \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad (3.33)$$

La multiplicación en el espacio de tiempo se convierte en la convolución en el espacio de la frecuencia, es decir:

$$y(t) = \sum_{\tau=0}^t x(\tau)w(t-\tau) \quad (3.34)$$

Aplicando el teorema de convolución se tiene:

$$Y(\omega) = X(\omega)W(\omega) \quad (3.35)$$

Simplificando la notación para facilitar la lectura, se obtiene luego:

$$|Y(\omega)|^2 = Y^T Y = W^T (X^T X) W = W^T S_{xx} W \quad (3.36)$$

De aquí se deduce que el resultado de aplicar una ventana a una señal es el espectro de potencia “real” (S_{xx}) de la señal, distorsionada por la transformada de la ventana utilizada. Esto implica que no es posible distinguir dos frecuencias cercanas, a esto se le llama fuga o “leakage”. Esta limitación es inherente al análisis espectral utilizando técnicas de Fourier. La única manera de reducir este problema es aumentar el tiempo de registro, sin embargo la calidad del espectro se

puede mejorar utilizando ventanas diferentes a una ventana cuadrada. Distintas ventanas introducen distintas distorsiones en el espectro de potencia. Una alternativa es la ventana de Hanning que se define como:

$$w(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2t\pi}{N-1} \right) \right) \quad 0 \leq t < N \quad (3.37)$$

Obtener el espectro de potencia de solo una muestra, resulta una estimación con altas variaciones entre una muestra y otra. Para reducir esta variación se acostumbra promediar varios periodogramas para obtener un solo espectro de potencia. Uno de los métodos utilizados es el de P. Welch. Si se toma $x(t)$ como una señal que ha sido observada en N puntos, es decir para $t = 0, 1, \dots, N-1$. Esto es lo mismo que multiplicar la señal por una ventana cuadrada $w(t)$, que es distinto a cero para $t = 0, 1, \dots, N-1$. Considerando la ecuación 3.28, y también se considera el espectro de potencia dado por:

$$P_{xx}(\omega) = \frac{1}{NU} |S(\omega)|^2 \quad (3.38)$$

Donde U es un factor para remover las distorsiones de energía producidos por la ventana $w(n)$

$$U = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} |w(t)|^2 \quad (3.39)$$

El método de Welch calcula el periodograma de distintos segmentos de la señal que se traslapan. Si se tiene una señal $x(t)$ del largo $N < Q$. Se divide la señal en L segmentos de largo N . Sea S los puntos entre el inicio de un segmento y otro, luego:

$$Q = (L - 1)S + N \quad (3.40)$$

Entonces el segmento l se expresa como:

$$s^{(l)}(t) = w(t)x(t + pS) \quad (3.41)$$

Para $0 \leq t < N$ y $0 \leq l < L$. Utilizando la ecuación 3.41 y 3.28 se obtiene el DFT del segmento l:

$$S^{(l)}(\omega) = \sum_{t=0}^{N-1} s^{(l)}(t) e^{-j2\pi\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)t} \quad (3.42)$$

Usando la ecuación 3.39 el periodograma del segmento l se calcula como:

$$P_{xx}^{(l)}(\omega) = \frac{1}{NU} |S^{(l)}(\omega)|^2 \quad (3.43)$$

Finalmente el estimador de Welch es el promedio de todos los periodogramas sobre todos los segmentos l:

$$P_{xx}^W(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{N-1} P_{xx}^{(l)}(\omega) \quad (3.44)$$

Para el estimador Welch, el sesgo y la varianza tienden a cero en la medida que aumente el largo de la señal (Q). Para un Q dado, se debe elegir L (tamaño de un segmento) lo mas largo posible para obtener una mejor resolución, pero por otro lado para mejorar el estimador, P debe ser grande, lo que implica que L sea pequeño. Por lo que existe un compromiso entre la alta resolución de la frecuencia (L largo) y un espectro de potencia “suave” (L pequeño).

CAPITULO IV

ENSAYOS A ESCALA

El modelo a escala que se realizó en este estudio consta de una estructura a escala de un grado de libertad, empotrada en un suelo que se colocó dentro de una caja de madera. El modelo se construyó en agosto de 2008 en el laboratorio de sólidos de la Universidad de Chile. Las mediciones con desplazamiento controlado se realizaron en noviembre y diciembre de 2008. El modelo fue construido nuevamente en marzo de 2009 y los ensayos con mediciones ambientales se registraron entre abril y junio de 2009. Se realizaron dos ensayos, uno con desplazamiento controlado y el otro con mediciones ambientales. La realización de dos ensayos se debió porque al término de los ensayos con desplazamiento controlado se detectó una alteración en la interacción suelo – estructura provocada por los múltiples desplazamientos que se le realizaron a la estructura, por lo que se debió buscar otra metodología para realizar las mediciones.

4.1 CARACTERISTICAS DEL SUELO UTILIZADO

El suelo que se utilizó en el modelo a escala fue extraído de una excavación que se estaba llevando a cabo en la construcción de un edificio habitacional en Avda. Blanco Encalado esquina Avda. Ejercito, en la comuna de Santiago. De manera de remover la porción de grava de este material se tamizó el suelo y se utilizó el material bajo la malla N°4, se observó que el suelo presentó una baja plasticidad. Se realizaron ensayos de granulometría y Proctor Modificado con los que se determinó que este suelo es de tipo arena limosa. La granulometría de este suelo (ref. 15) se presenta a continuación en la Tabla 4.1.

Tabla 4. 1: Distribución granulométrica del material usado en el modelo a escala

| Tamiz | Diametro | Peso | % | % |
|-------|----------|--------|----------|----------|
| N° | [mm] | [gr] | Retenido | que Pasa |
| 4 | 4.75 | 0 | 0 | 100 |
| 8 | 2.36 | 57.69 | 11.54 | 88.46 |
| 10 | 2 | 16.26 | 3.25 | 85.21 |
| 30 | 0.6 | 176.94 | 35.39 | 49.82 |
| 40 | 0.43 | 60.93 | 12.19 | 37.63 |
| 50 | 0.3 | 46.85 | 9.37 | 28.27 |
| 100 | 0.15 | 56.93 | 11.39 | 16.88 |
| 200 | 0.08 | 18.52 | 3.7 | 13.18 |

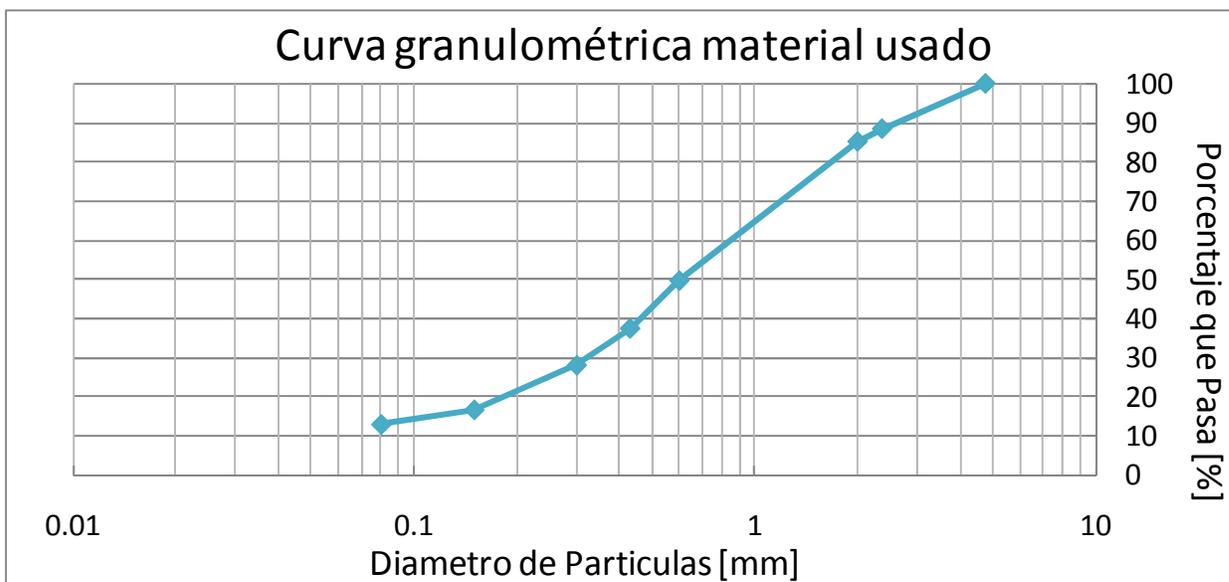


Figura 4. 1: Curva granulométrica del material usado en el modelo a escala

Tabla 4. 2: Diámetros característicos del suelo usado en el modelo a escala

| Diámetro característico | Valor [mm] |
|-------------------------|------------|
| D10 | 0.049 |
| D30 | 0.33 |
| D60 | 0.9 |

Tabla 4. 3: Coeficientes de uniformidad y curvatura del suelo usado en el modelo a escala

| Coeficiente | Valor |
|-------------|-------|
| CU | 12 |
| CC | 1.61 |

Del análisis granulométrico se obtuvo que el material analizado tiene un 13% de finos. A este porcentaje de suelo, que corresponde al material bajo la malla #200, se le realizó un ensayo hidrométrico, de manera de completar la curva granulométrica. La tabla 4.4 muestra información de la muestra analizada, mientras que los resultados de este ensayo se presentan en la tabla 4.5 y en la figura 4.2.

Tabla 4. 4: Datos de la muestra de suelo analizada en el ensayo hidrométrico

| Datos Muestra | |
|-----------------------|-----------------|
| Gs de Solido | 2.73 |
| Peso Suelo [gr] | 60.00 |
| Corrección de cero | 5.00 |
| Corrección de Menisco | 1.00 |
| Agente Dispersante | Hexametafosfato |
| Cantidad [gr] | 5.00 |

Tabla 4. 5: Resultados del análisis hidrométrico

| Diametro Particulas [mm] | Contenido de finos [%] |
|--------------------------|------------------------|
| 0.0493 | 77.6 |
| 0.0374 | 66.1 |
| 0.0282 | 53.8 |
| 0.0209 | 43.2 |
| 0.0174 | 39.9 |
| 0.0152 | 37.5 |
| 0.0137 | 35.9 |
| 0.0125 | 35.1 |
| 0.0113 | 33.4 |
| 0.0099 | 31.0 |
| 0.0088 | 30.2 |
| 0.0081 | 29.4 |
| 0.0066 | 28.7 |
| 0.0058 | 27.1 |
| 0.0047 | 26.4 |
| 0.0040 | 25.6 |
| 0.0032 | 24.8 |
| 0.0029 | 24.1 |
| 0.0026 | 24.3 |
| 0.0024 | 22.9 |
| 0.0013 | 21.2 |

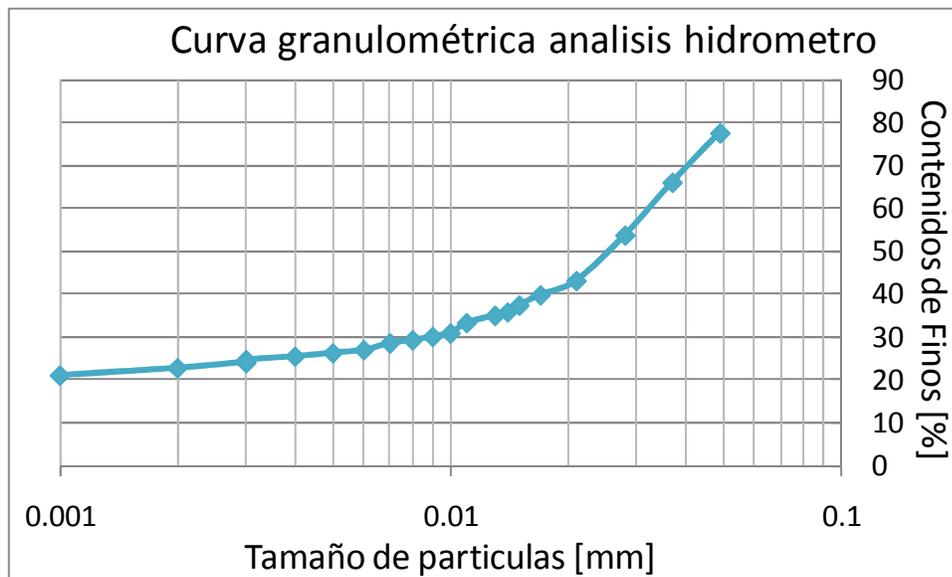


Figura 4. 2: Análisis Hidrométrico de suelo usado en modelo

En la figura 4.2 se observa que solo un 21% de las partículas de finos son menores de 0.002 mm es decir que un 21% de las partículas finas son arcillas y un 79% de las partículas finas son limos, por lo tanto el suelo utilizado en el modelo es una arena limosa. Luego de realizados los dos ensayos se pudo completar la curva granulométrica del suelo utilizado en el

modelo a escala. A continuación se muestran los resultados de la curva granulométrica del material usado en el modelo.

Tabla 4. 6: Curva Granulométrica del suelo usado en el modelo

| Diametro [mm] | % que Pasa |
|---------------|------------|
| 4.75 | 100.000 |
| 2.36 | 88.462 |
| 2 | 85.210 |
| 0.6 | 49.822 |
| 0.425 | 37.636 |
| 0.3 | 28.266 |
| 0.15 | 16.880 |
| 0.075 | 13.176 |
| 0.049 | 10.224 |
| 0.037 | 8.709 |
| 0.028 | 7.093 |
| 0.021 | 5.693 |
| 0.017 | 5.262 |
| 0.015 | 4.939 |
| 0.014 | 4.730 |
| 0.013 | 4.623 |
| 0.011 | 4.407 |
| 0.010 | 4.084 |
| 0.009 | 3.976 |
| 0.008 | 3.876 |
| 0.007 | 3.775 |
| 0.006 | 3.567 |
| 0.005 | 3.474 |
| 0.004 | 3.374 |
| 0.003 | 3.274 |
| 0.003 | 3.182 |
| 0.003 | 3.198 |
| 0.002 | 3.017 |
| 0.001 | 2.791 |

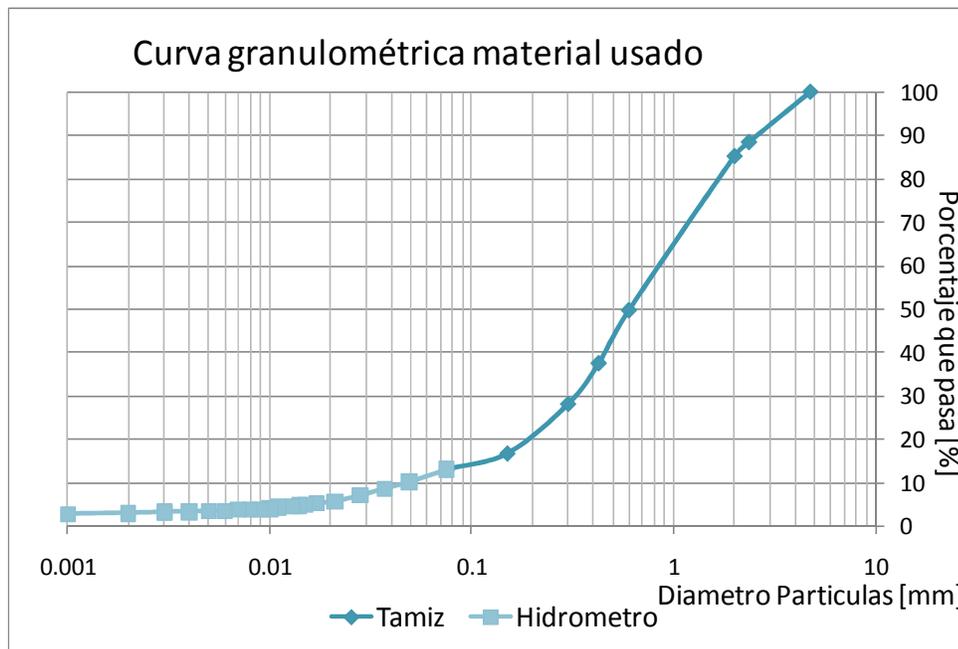


Figura 4. 3: Curva granulométrica del material usado en el modelo a escala

Se puede apreciar que el suelo utilizado es un material bien graduado. Debido a que presenta un porcentaje de finos mayor a 12% se realizó el ensayo de Próctor Modificado (ref. 16) para obtener la densidad máxima de compactación. Los resultados del Proctor se presentan a continuación.

Tabla 4. 7: Resultados de ensayo de Proctor Modificado

| Punto N° | Peso del molde mas material [gr] | Contenido Humedad [%] | Material [gr] | Densidad Humeda [gr/cm ³] | Densidad Seca [gr/cm ³] | Humedad Saturación [%] | Relación de Vacios |
|----------|----------------------------------|-----------------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|--------------------|
| 1 | 7206 | 1.70 | 4106 | 1.938 | 1.906 | 15.83 | 0.43 |
| 2 | 7284 | 3.76 | 4184 | 1.975 | 1.904 | 15.90 | 0.43 |
| 3 | 7548 | 5.49 | 4448 | 2.100 | 1.991 | 13.60 | 0.37 |
| 4 | 7748 | 7.01 | 4648 | 2.194 | 2.051 | 12.14 | 0.33 |
| 5 | 7864 | 8.82 | 4764 | 2.249 | 2.067 | 11.75 | 0.32 |
| 6 | 7860 | 10.09 | 4760 | 2.247 | 2.041 | 12.36 | 0.34 |
| 7 | 7796 | 11.81 | 4696 | 2.217 | 1.983 | 13.80 | 0.38 |
| 8 | 7730 | 12.89 | 4630 | 2.186 | 1.936 | 15.02 | 0.41 |

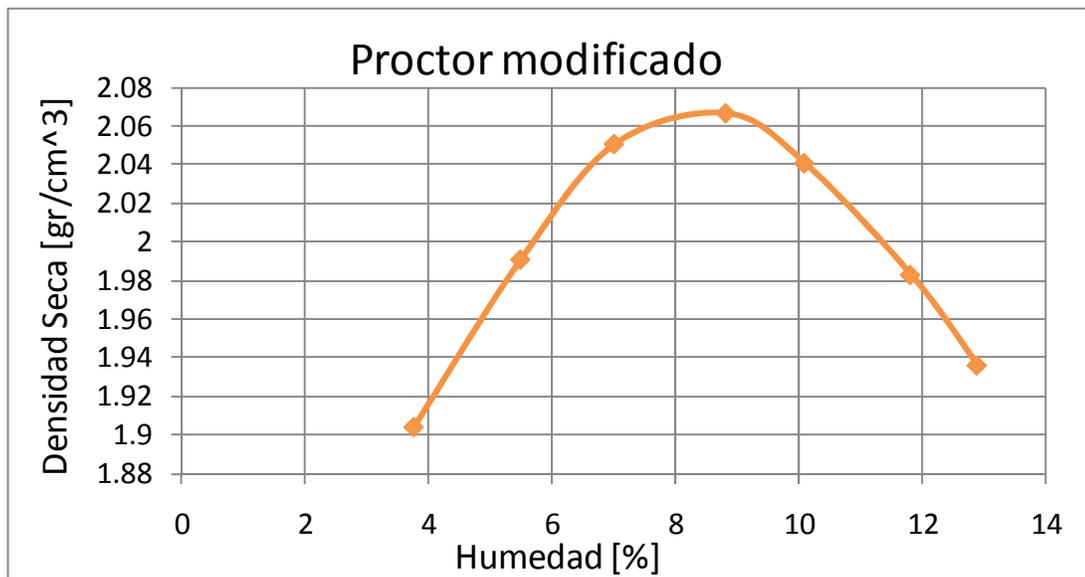


Figura 4. 4: Gráfico Proctor modificado a material usado en modelo a escala

La densidad máxima obtenida del ensayo Proctor Modificado fue de 2.067 [gr/cm³]. En los ensayos con desplazamiento controlado de la estructura se utilizó en el modelo una densidad del suelo correspondiente al 70% del Proctor Modificado, lo que equivale a 1.44 [gr/cm³]. Por otra parte, en los ensayos con mediciones ambientales se utilizó una densidad del suelo correspondiente al 80% del Proctor Modificado, lo que equivale a 1.65 [gr/cm³]. El cambio de densidad es debido a inconvenientes con la densidad en la primera experiencia, durante el

desarrollo del ensayo por cambios de contenido de humedad la densidad del suelo fue alterada por lo que se debió repetir los ensayos con una metodología diferente en la que se utilizó una densidad seca de suelo mayor.

4.2 CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES DE HUMEDAD

La calibración de los tres sensores de humedad se llevó a cabo en el Laboratorio de Sólidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y el procedimiento y resultado se presentan a continuación.

4.2.1 OBTENCION DE LA MUESTRA DE SUELO

Como ya se indicó, el suelo utilizado correspondió al material extraído de una excavación que se llevaba a cabo en la construcción de un edificio, limitando el tamaño de partícula a 4.75 milímetros (malla #4), lo que corresponde a arena, limos y arcilla. Este material se secó en el horno, de manera de que alcance una humedad cercana al 0%, el suelo fue secado para colocar en la probeta la densidad de suelo seca que se usó y también para agregar una cantidad de agua determinada con el fin de que la muestra de suelo contuviera el contenido de humedad que se deseaba.

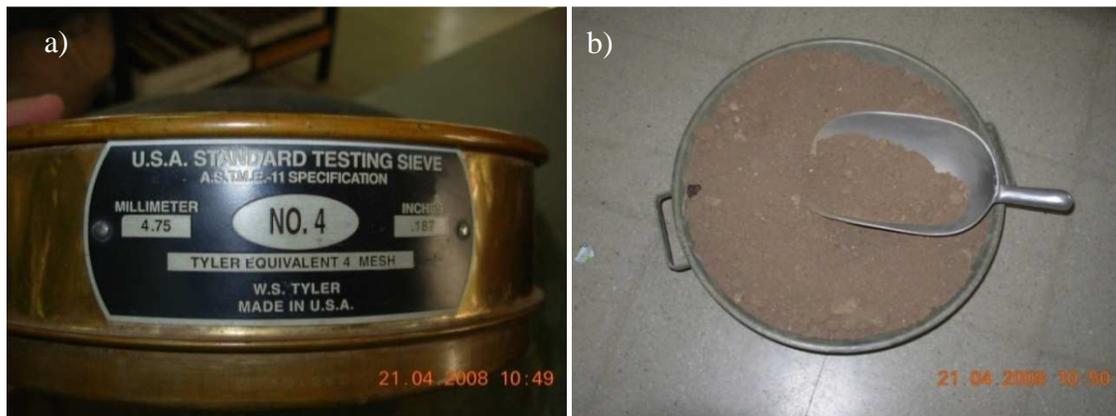


Figura 4. 5: a) Tamiz malla #4 y b) muestra de suelo sin tamizar.

4.2.2 CONSTRUCCION DE PROBETAS PARA LA CALIBRACION

Se utilizó un molde metálico cúbico de 15 cm de lado como probeta para realizar la calibración de los sensores. En esta probeta se colocó el suelo a una densidad seca de 1.65 [gr/cm³]. Se prepararon distintas muestras de suelo con humedades distintas, las cuales se

midieron con los sensores. Con las humedades conocidas y las medidas se desarrolló la curva de calibración que se utilizó en los ensayos para obtener el grado de saturación del suelo. Las dimensiones de la probeta se presentan en la tabla 4.8

Tabla 4. 8: Dimensiones de la probeta utilizada para la calibración de los sensores

| | |
|----------------------|----------|
| Peso [gr] | 14362.00 |
| B [cm] | 15.15 |
| L [cm] | 15.02 |
| H [cm] | 15.09 |
| V [cm ³] | 3435.75 |

Se decidió utilizar una altura de 12 cm de suelo dentro de la probeta, de manera de facilitar el apisonamiento del material a ensayar. La probeta se construyó con una densidad de suelo seco de 1.65 gr/cm³, por lo que conocido el volumen se obtiene el peso de suelo requerido que se detalla en la tabla 4.9.

Tabla 4. 9: Dimensiones de las muestra de suelo utilizadas para la calibración de los sensores

| | |
|----------------------------------|----------|
| γ_d [gr/cm ³] | 1.65 |
| B [cm] | 15.15 |
| L [cm] | 15.02 |
| H [cm] | 12.00 |
| V [cm ³] | 2731.84 |
| P seco [gr] | 4507.541 |

A cada muestra se le agregó agua de manera de tener distintos porcentajes de humedad. En la tabla 4.10 se detalla la cantidad de agua agregada, el peso de la muestra de suelo en la probeta y el peso por capa que se fue agregado en la probeta. De manera que la probeta tuviera una densidad homogénea, ésta fue compactada mediante apisonamiento en cuatro capas de 3 cm de altura cada una. Cada muestra con distintos porcentajes de humedad fue colocada en la probeta, luego se realizó la medición y luego se retiró para colocar la siguiente muestra. La figura 4.6 muestra una fotografía del molde y del elemento de madera utilizado para apisonar y compactar el suelo a medida que la probeta iba siendo llenada.



Figura 4. 6: Molde y elemento para compactar cada capa

Tabla 4. 10: Peso de suelo húmedo total y por capas

| Humedad | Vol. Agua | Peso | Peso por Capa |
|---------|--------------------|----------|---------------|
| [%] | [cm ³] | [gr] | [gr] |
| 0 | 20.09 | 4527.631 | 1131.91 |
| 2 | 67.98 | 4575.516 | 1143.88 |
| 5 | 197.09 | 4704.63 | 1176.16 |
| 7 | 282.42 | 4789.96 | 1197.49 |
| 10 | 414.69 | 4922.228 | 1230.56 |
| 13 | 552.18 | 5059.726 | 1264.93 |
| 15 | 635.48 | 5143.023 | 1285.76 |
| 18 | 767.78 | 5275.325 | 1318.83 |

4.2.3 REGISTRO DE DATOS

Los sensores de humedad MP406 (ref.8) entregan datos en volts, por lo que es necesario convertir estos datos en grados de saturación del suelo, para ello se realizó la calibración a los tres sensores utilizados en el modelo. En la figura 4.7 se presenta un esquema de las dimensiones de los sensores.

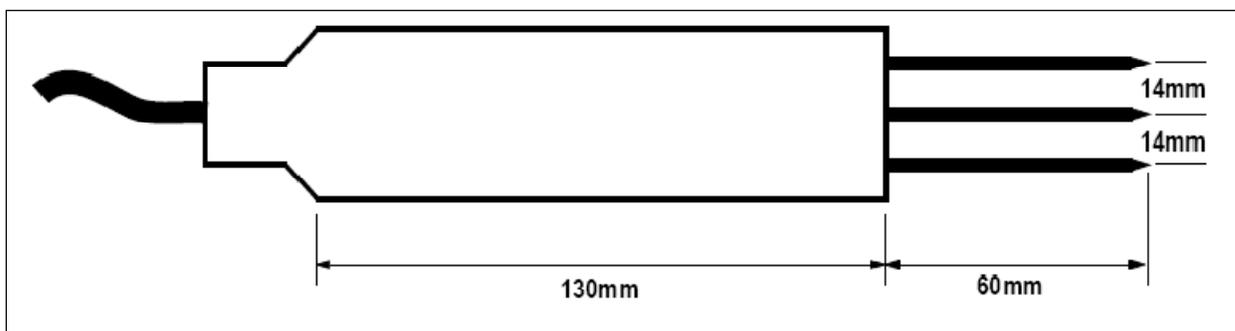


Figura 4. 7: Esquema de los sensores de humedad utilizados (ref.8)

Cada uno de los sensores fue colocado en la probeta en forma separada y se realizaron registros de datos por un periodo de treinta segundos, en la figura 4.8 se muestra el proceso de medición para calibrar los sensores. Los registros entregados en voltaje fueron promediados para desarrollar la curva de calibración de cada sensor.



Figura 4. 8: Proceso de medición para calibración de los sensores de humedad

4.2.4 CURVAS DE CALIBRACION DE LOS SENSORES DE HUMEDAD

Los voltajes entregados por los tres sensores colocados en la probeta con distintos contenidos de humedad se muestran a continuación en la tabla 4.11.

Tabla 4. 11: Registros de voltajes para distintos contenidos de humedad

| Humedad | Sensor 1 | Sensor 2 | Sensor 3 |
|---------|----------|----------|----------|
| | [Volt] | [Volt] | [Volt] |
| 0% | 0.14 | 0.11 | 0.12 |
| 2% | 0.23 | 0.22 | 0.24 |
| 5% | 0.27 | 0.26 | 0.26 |
| 7% | 0.31 | 0.35 | 0.35 |
| 13% | 0.51 | 0.55 | 0.50 |
| 15% | 0.63 | 0.61 | 0.56 |
| 18% | 0.71 | 0.69 | 0.69 |

Como los sensores de humedad generalmente se calibran para obtener humedad volumétrica se decidió calibrarlos para obtener el grado de saturación del suelo, que relaciona el volumen de agua de la muestra con respecto al volumen de vacío del suelo. Para ello se procedió a obtener el índice de vacío del suelo estudiado y su gravedad específica, que se muestran en la tabla 4.12. La gravedad específica se obtiene mediante el ensayo estándar para determinar el peso específico (ref. 17), mientras que el índice de vacíos se obtiene con la ecuación 3.8, dado que se conoce la densidad seca, densidad del agua y la gravedad específica.

Tabla 4. 12: Parámetros del suelo utilizado

| | |
|----|-------|
| Gs | 2.73 |
| e | 0.655 |

Con los parámetros de la tabla 4.12 y usando el diagrama trifásico se obtuvo el volumen de vacío y volumen de sólido del material en la probeta, valores que se presentan en la tabla 4.13. Finalmente, con estos datos se obtiene el grado de saturación que tiene la probeta ensayada, para los distintos contenidos de humedad. La tabla 4.14 muestra el grado de saturación, humedad registrada mediante el procedimiento de secado en horno después del registro de datos con el sensor, el volumen de agua (Vw) y el volumen de vacíos (Vv) en la muestra de suelo.

Tabla 4. 13: Volumen de vacío y volumen de sólido en la probeta

| | |
|-----------------------|---------|
| Vs [cm ³] | 1651.11 |
| Vv [cm ³] | 1080.73 |

Tabla 4. 14: Saturación del suelo analizado en la probeta

| Humedad | Hum. Medida | Vw | Vv | Sat |
|---------|-------------|--------------------|--------------------|-------|
| | [%] | [cm ³] | [cm ³] | [%] |
| 0% | 0.45 | 19.94 | 1080.73 | 1.84 |
| 2% | 1.51 | 67.47 | 1080.73 | 6.24 |
| 5% | 4.37 | 195.61 | 1080.73 | 18.10 |
| 7% | 6.27 | 280.31 | 1080.73 | 25.94 |
| 10% | 9.20 | 411.58 | 1080.73 | 38.08 |
| 13% | 12.25 | 548.05 | 1080.73 | 50.71 |
| 15% | 14.10 | 630.73 | 1080.73 | 58.36 |
| 18% | 17.03 | 762.04 | 1080.73 | 70.51 |

Las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 muestran las curvas de calibración de los tres sensores, donde se relaciona el grado de saturación del suelo versus el voltaje entregado por cada sensor. En el modelo, el sensor 1 se colocó a 5 cm de profundidad, el sensor 2 se instaló a 10 cm, mientras que el sensor 3 se colocó a 20 cm de profundidad. La figura 4.13 muestra las tres curvas de calibración juntas, donde se puede observar que los tres sensores poseen curvas de calibración similares.

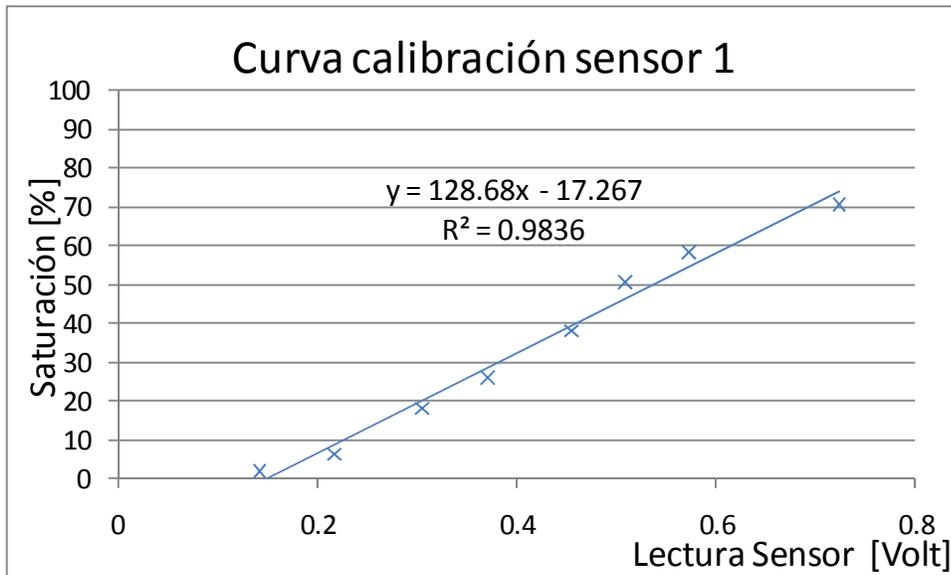


Figura 4. 9: Curva de calibración del Sensor 1

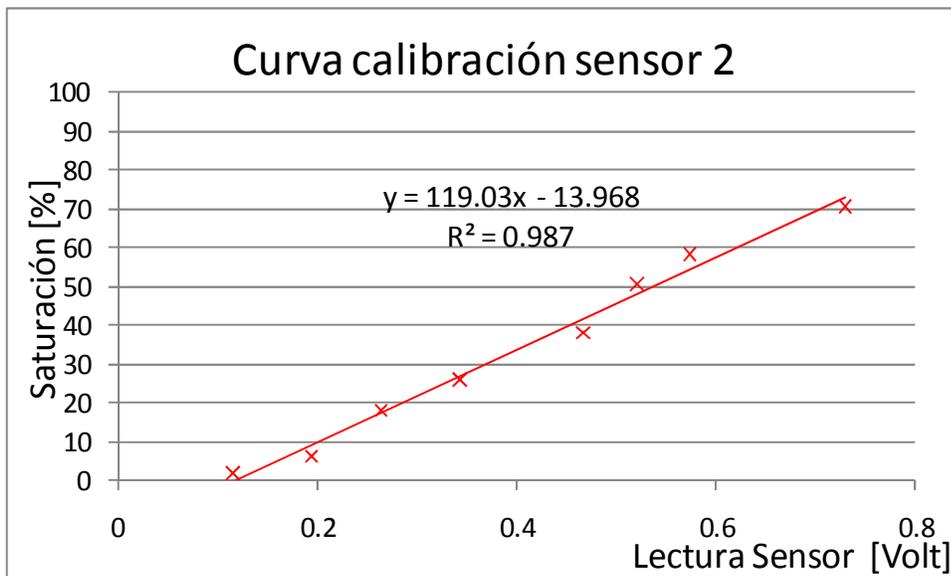


Figura 4. 10: Curva de calibración del Sensor 2

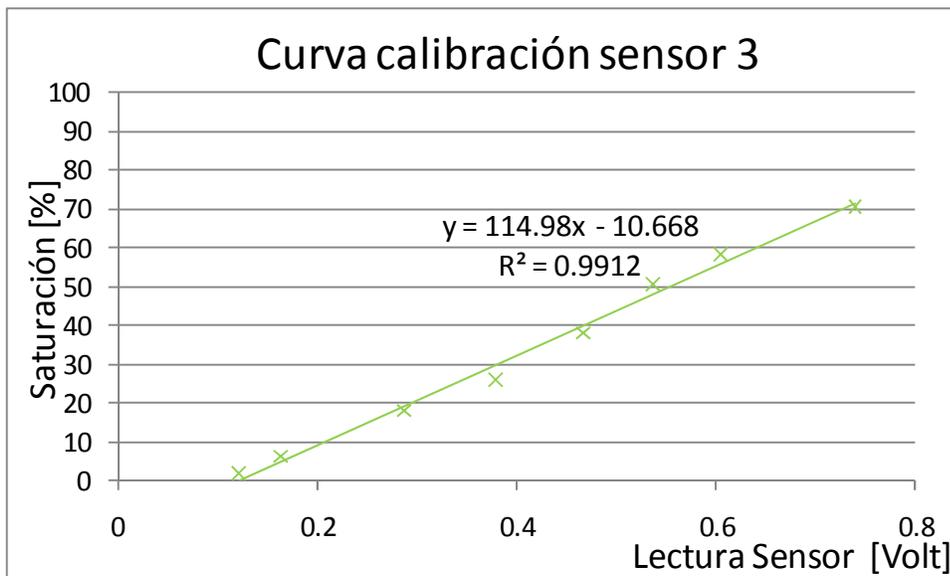


Figura 4. 11: Curva de calibración del Sensor 3

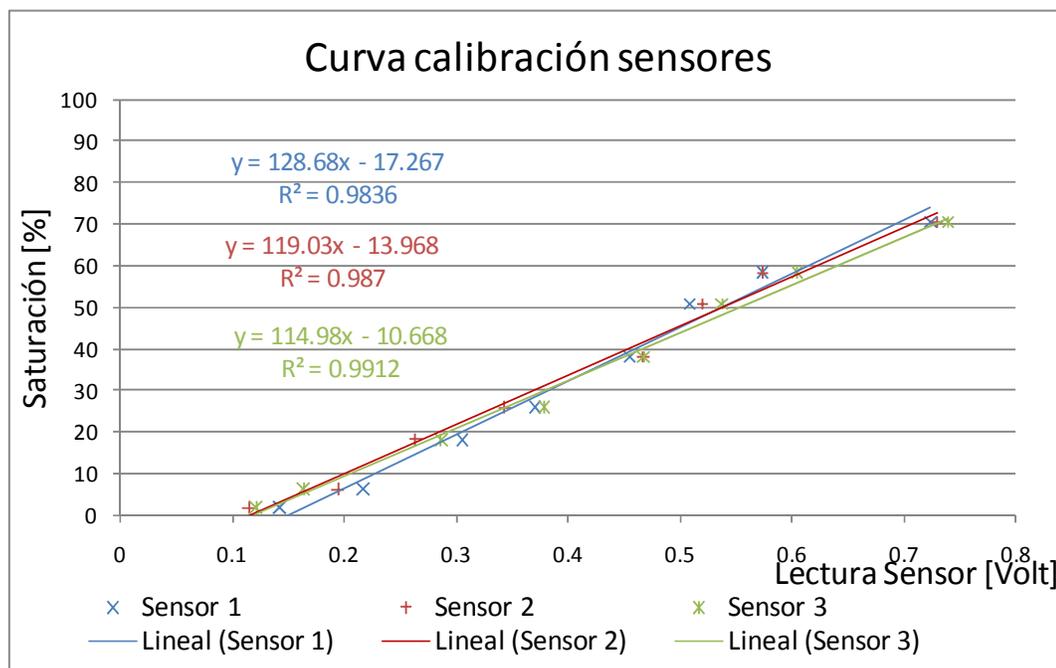


Figura 4. 12: Curva de calibración de los tres sensores

Cuando la densidad del suelo que es monitoreado no es la misma que la que se utilizó en la calibración se debe considerar lo siguiente.

Como el grado de saturación del suelo depende de la densidad se debe obtener una relación con un parámetro del suelo que sea invariante al cambio de densidad, por lo que se utiliza el contenido de humedad. Es por ello que se define el término de humedad volumétrica que es volumen de agua por volumen total.

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (4.1)$$

También la humedad volumétrica se define como la humedad gravimétrica por la densidad seca del suelo.

$$\theta = w * \gamma_s = \frac{P_w}{P_s} * \frac{P_s}{V_t} \quad (4.2)$$

El grado de saturación del suelo se relaciona con la humedad volumétrica con la siguiente relación.

$$\theta = S * \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_w}{V_v} * \frac{V_v}{V_t} \quad (4.3)$$

Luego el grado de saturación se relaciona con la humedad gravimétrica con la expresión que se muestra a continuación.

$$S * \frac{V_v}{V_t} = w * \gamma_s \quad (4.4)$$

Con la relación 4.4 usando la saturación registrada por el sensor, la densidad seca, volumen de vacíos y volumen total usados en la calibración se obtiene la humedad gravimétrica del suelo monitoreado, como este parámetro es invariante a la densidad luego se obtiene la saturación real del suelo utilizando la ecuación 4.4 con la densidad seca, volumen de vacíos y volumen total del suelo monitoreado.

4.3 CONSTRUCCION DEL MODELO A ESCALA

Como ya se mencionó, en este estudio se desarrolló un modelo a escala reducida en el laboratorio para llevar a cabo los ensayos que permitieron analizar variaciones en la frecuencia natural de una estructura de un grado de libertad debido a cambios en el contenido de agua del suelo de fundación. En esta sección se detalla como se realizó este modelo. La figura 4.13 muestra la sección transversal de este modelo en ambos sentidos.

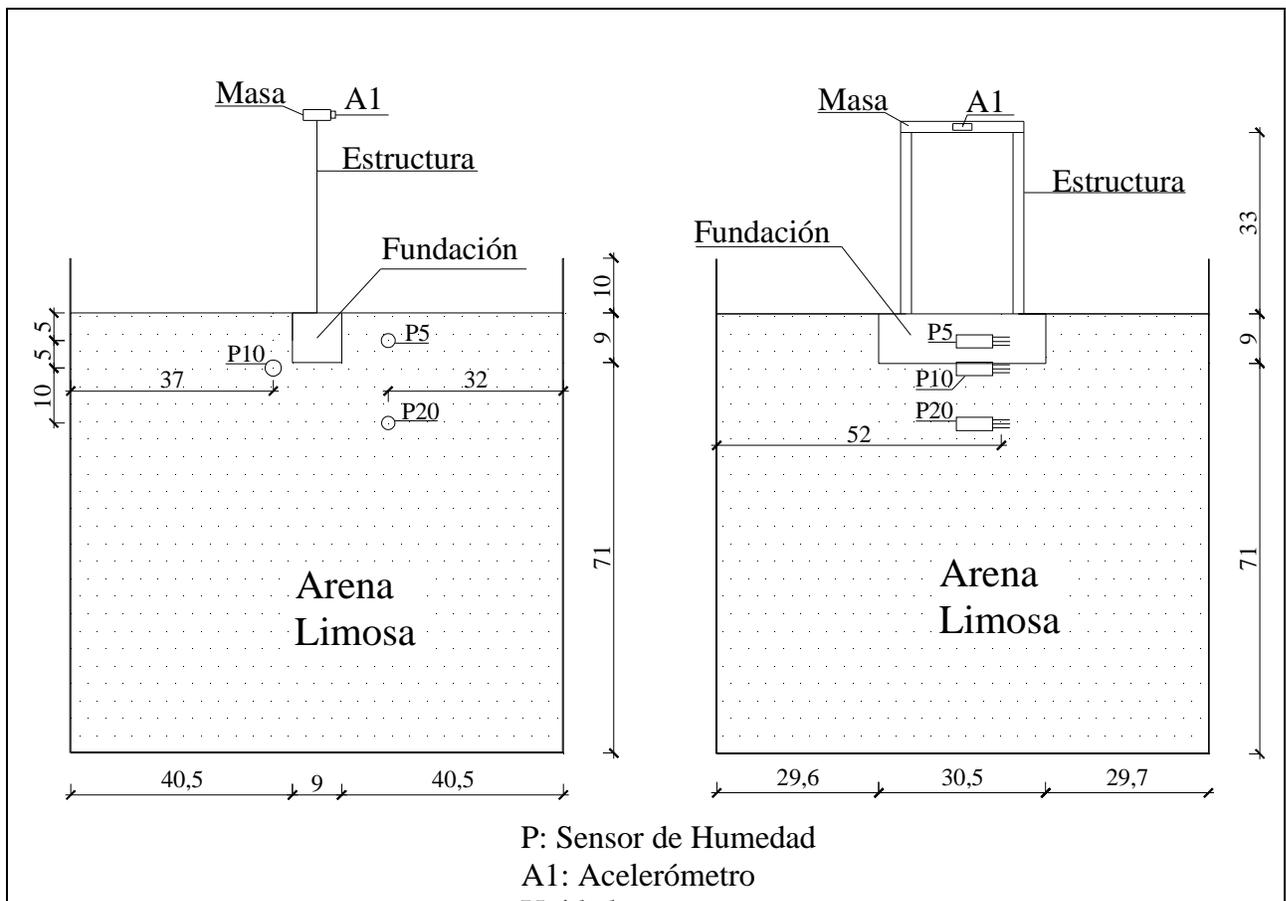


Figura 4. 13: Sección transversal del modelo a escala en ambos sentidos (Unidades en cm)

4.3.1 MODELO A ESCALA DE UNA ESTRUCTURA DE 1 GRADO DE LIBERTAD

El modelo a escala de la estructura consta de una fundación, dos columnas de 35 cm de alto y una masa concentrada en la parte superior. La fundación es de madera de Pino Oregón y tiene dimensiones de 9 cm x 9 cm x 30 cm. Las columnas y el soporte de la masa concentrada en la parte superior son pletinas de aluminio de 2,5 mm de espesor, las columnas con el soporte fueron unidas por medio de ángulos y pernos como se muestra en la figura 4.14.

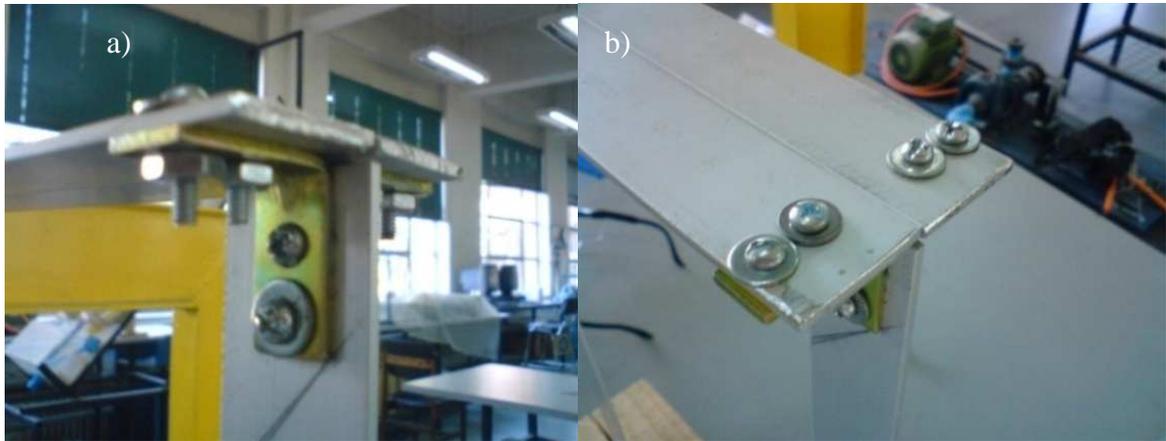


Figura 4. 14: Uniones en el modelo a escala de la estructura a) vista lateral, b) vista superior

A la base de madera se le realizó un corte en los extremos para introducir las pletinas una distancia de 8 cm y empotrarlas en la fundación. Para fijar las pletinas a la madera se usó Poxilina y así evitar deslizamientos por el peso propio de la estructura. En la figura 4.15 se muestra la unión de las pletinas con la madera usada como fundación

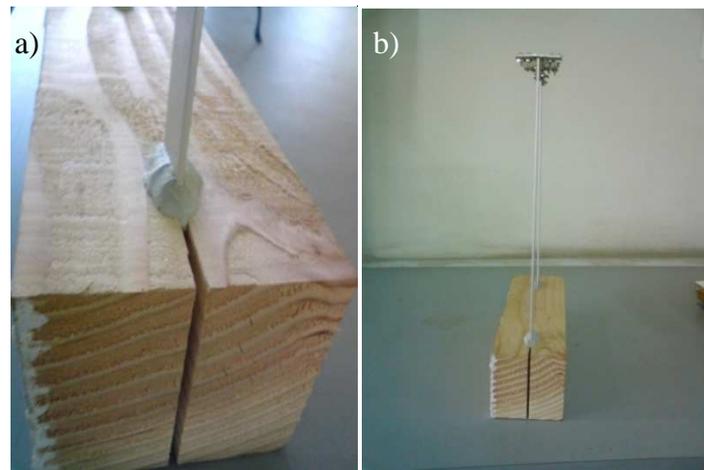


Figura 4. 15: Conexión de pletinas con la base de fundación a) acercamiento, b) vista completa

La pieza de madera se selló con papel Alusa para evitar que absorba humedad. En los bordes se colocó cinta adhesiva Permacet ½ para evitar que el papel Alusa se rompa y la madera absorba humedad. En la figura 4.16 se muestra el sellado de la fundación con papel Alusa.



Figura 4. 16: Sellado de la fundación

Finalmente se colocaron pesas en la parte superior de la estructura para obtener el periodo natural de la estructura deseado, igual a un segundo. Las pesas se fijaron a la estructura con cinta adhesiva Permacet $\frac{1}{2}$, como se observa en la figura 4.17.

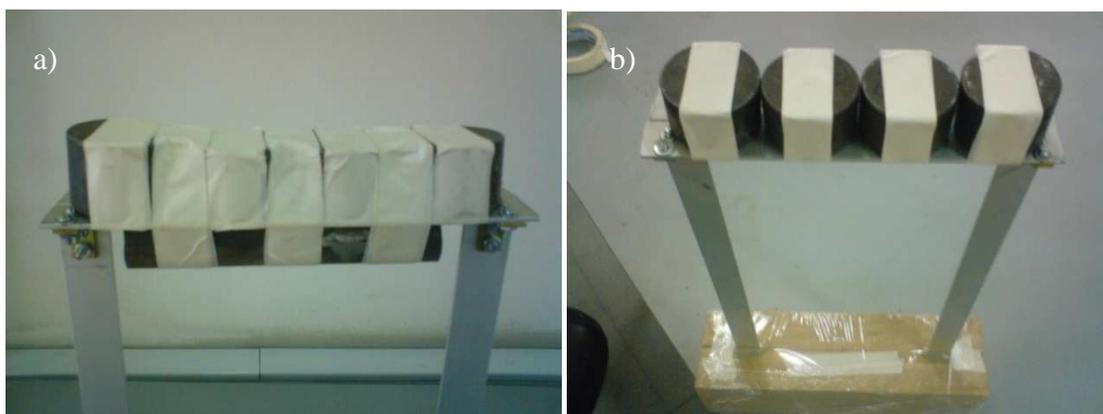


Figura 4. 17: Pesas adheridos a la estructura para los ensayos de: a) desplazamiento controlado y b) medición ambiental

El peso de la estructura sin las pesas es de 1288 gr. Para los ensayos de desplazamiento controlado las pesas corresponden a 2728 gr., el acelerómetro Kistler pesa 15 gr y la cinta adhesiva pesa 12 gr, por lo que el peso total de la estructura es de 4043 gr. Para los ensayos de medición ambiental las pesas utilizadas corresponden a 2262 gr, mientras que el acelerómetro ES-U2 pesa 350 gr y el peso de la cinta adhesiva es de 12 gr, por lo que el peso total es de 3912 gr.

Se realizó un ensayo de carga deformación de las pletinas utilizadas en la estructura para obtener la frecuencia natural de la estructura teórica. En la tabla 4.15 se muestran los resultados de la deformación de una pletina de 9.5 cm de largo producto de cargas colocadas en un extremo de la pletina. Con la información de la tabla 4.15 se obtiene una curva de carga v/s deformación y la pendiente es la rigidez de la pletina utilizada como pilar en la estructura con un largo de 9.5 cm, la curva se presenta en la figura 4.18

Tabla 4. 15: Tabla carga v/s deformación de pletina de 10 cm de largo

| W [kgf] | Deform. [cm] |
|---------|--------------|
| 0 | 0 |
| 0.05 | 0.008 |
| 0.1 | 0.024 |
| 0.15 | 0.043 |
| 0.2 | 0.052 |
| 0.25 | 0.064 |
| 0.3 | 0.08 |
| 0.35 | 0.101 |

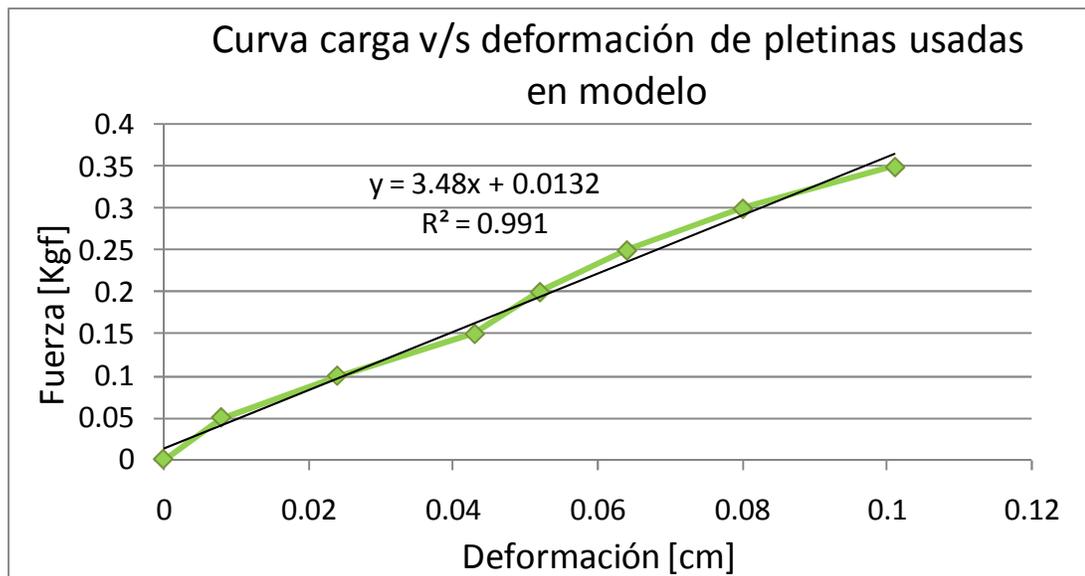


Figura 4. 18: Curva carga v/s deformación de pletina usada en la estructura

Como la pletina usada en la estructura tiene un largo de 35 cm fue necesario calcular la rigidez (k) del pilar de pletina de la estructura. Para realizar el cálculo de la rigidez se utilizaron las ecuaciones de la tabla 4.16, en la que se detalla la ecuación de rigidez, frecuencia angular, periodo y frecuencia

Tabla 4. 16: Tabla con ecuaciones sobre dinámica de estructura

| | |
|--------------------|-------------------------------|
| Rigidez | $k = \frac{12EI}{L^3}$ |
| Frecuencia angular | $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ |
| Periodo | $T = \frac{2\pi}{\omega}$ |
| Frecuencia | $f = \frac{1}{T}$ |

Con la ecuación de rigidez se obtiene el parámetro EI del material, luego volviendo a emplear la ecuación de rigidez se obtiene k de la pletina de largo 35 cm, la masa se obtiene dividiendo el peso superior de la estructura por la aceleración de gravedad. La diferencia de masa entre las experiencias de desplazamiento controlado y mediciones ambientales son mínimas por lo que el cálculo se realizó solo para la masa ocupada en los ensayos con desplazamiento controlado. Con las ecuaciones de la tabla 4.18 se obtiene la frecuencia angular de la estructura, con este valor se calcula el periodo y finalmente la frecuencia de la estructura, estos valores se presentan en la tabla 4.17.

Tabla 4. 17: Frecuencia teórica de la estructura a escala

| | |
|----------------------------|---------|
| EI [Kgf*cm ²] | 248.64 |
| k [Kgf/cm] | 0.07 |
| m [Kgf*s ² /cm] | 0.00281 |
| ω [rad/seg] | 7.03 |
| T [seg] | 0.89 |
| f [Hz] | 1.12 |

Se realizó un ensayo de la estructura empotrada sobre una base rígida para obtener la frecuencia experimental de la estructura empotrada. La frecuencia obtenida utilizando el método de desplazamiento controlado fue de 0.99 Hz. La frecuencia natural fue obtenida una vez finalizados los ensayos en el modelo y al retirar la estructura del suelo, se lo ocasionó un daño en una de las uniones de los pilares con la fundación, por lo que este valor no fue considerado para comparar las frecuencias obtenidas en el modelo.

4.3.2 CAJA CONTENEDORA PARA EL SUELO

El modelo se colocó dentro de un contenedor de madera terciada, las dimensiones de las planchas utilizadas en el contenedor son: dos planchas de 930 mm x 900 mm x 15 mm y las otras dos de 900 mm x 900 mm x 15 mm, la quinta plancha que fue usada de fondo es de 930 mm x 930 mm x 15 mm. Para evitar que la presión del suelo provoque pandeo en los costados del contenedor se colocaron cuatro perfiles L alrededor del contenedor que fueron unidos por pernos hexagonales. Para unir los perfiles se soldó una tuerca en el extremo de los perfiles, y al otro extremo de cada perfil se le realizó una perforación del tamaño de pernos hexagonales, por las perforaciones se colocaron los pernos y se apernaron en la tuerca hasta que los perfiles quedaron firmes. En la figura 4.19 se muestra el contenedor construido y los perfiles que evitan el pandeo de la caja



Figura 4. 19: a) Contenedor de madera y b) perfiles para evitar flexión de las paredes

Luego se cortaron empaquetaduras de goma de 1.6 mm de espesor. El largo y alto de los cortes de empaquetadura s realizaron para que coincidan con las medidas interiores de la caja y se pegaron en las caras interiores de la caja. Esto se hizo para evitar que la caja de madera absorba humedad debido al agua que se agrega en los ensayos.



Figura 4. 20: Sellado interno del contenedor a) sellado fondo b) sellado en los costados

4.3.3 LLENADO DEL CONTENEDOR

En primer lugar se realizaron marcas al interior de la caja cada 5cm en el sentido vertical. Estas marcas se utilizaron como guía para llenar el contenedor en capas de 5 cm de espesor. En cada experiencia se agregó el peso de suelo correspondiente para obtener las densidades deseadas. En la experiencia de desplazamiento controlado se agregó 57.674 Kg por capa para alcanzar una densidad de 1.44 gr/cm^3 , correspondiente al 70% del Proctor Modificado, y para realizar las mediciones ambientales se agregó 66.085 Kg por capa, lo que corresponde al 80% del Proctor Modificado, es decir una densidad de 1.65 gr/cm^3 . El suelo se compactó con un apisonador de madera construido en el laboratorio, al apisonador se le agregaron dos pesas de 2.5 Kg para agregar mas peso y para que el golpe sea capaz de compactar el suelo a la densidad deseada, en la figura 4.21 se muestra el apisonador utilizado.



Figura 4. 21: Apisonador manual para compactar el suelo dentro de la caja

Cuando faltaban 20 cm de suelo para llegar a nivel de superficie se colocó un sensor de humedad dentro del contenedor. Este sensor se denominó P20 y se instaló en el centro de la caja para registrar el contenido de humedad a una profundidad de 10 cm bajo el sello de fundación de la estructura. La figura 4.22 muestra una fotografía del sensor P20, una vez instalado en el contenedor.



Figura 4. 22: Sensor P20 colocado en la caja a 20 cm de profundidad.

Cuando faltaban 10 cm de suelo para llegar a la superficie se colocó el segundo sensor de humedad, denominado sensor P10. En la figura 4.23 se muestra la ubicación del sensor P10. Este sensor se ubicó a una distancia horizontal de 5 cm de la fundación y registró el contenido de humedad al nivel del sello de fundación, es decir a una profundidad de 10 cm. En este nivel del llenado de la caja también se colocó la estructura en el centro del contenedor, como se muestra en la figura 4.23.

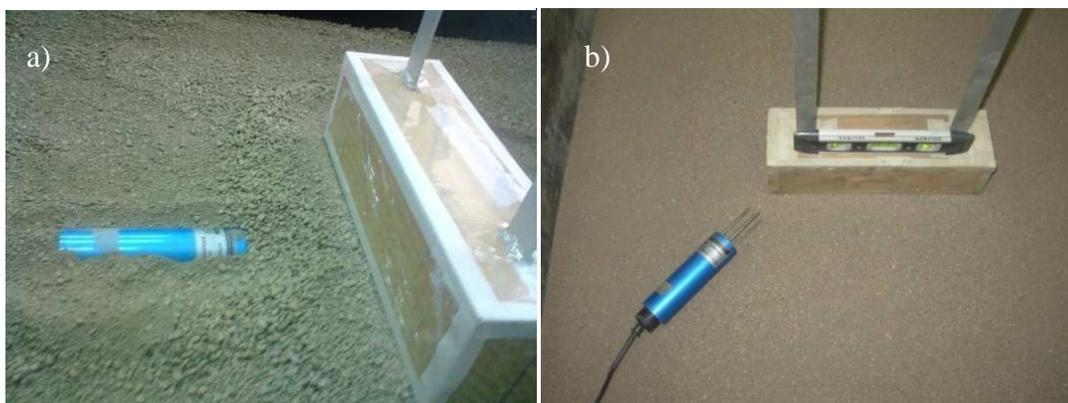


Figura 4. 23: Ubicación del sensor P10 en el ensayo de a) desplazamiento controlada y b) medición ambiental

Finalmente, cuando faltaban 5 cm para llegar al nivel de superficie del modelo se colocó el último sensor de humedad a una distancia horizontal de 5 cm de la fundación. Este sensor se denominó sensor P5. En la figura 4.24 se muestra la ubicación del sensor en ambos ensayos. Finalmente se agregaron los últimos 5 cm de material para llegar al nivel de superficie de suelo, en la figura 4.25 se muestra el modelo con el material a nivel de superficie.

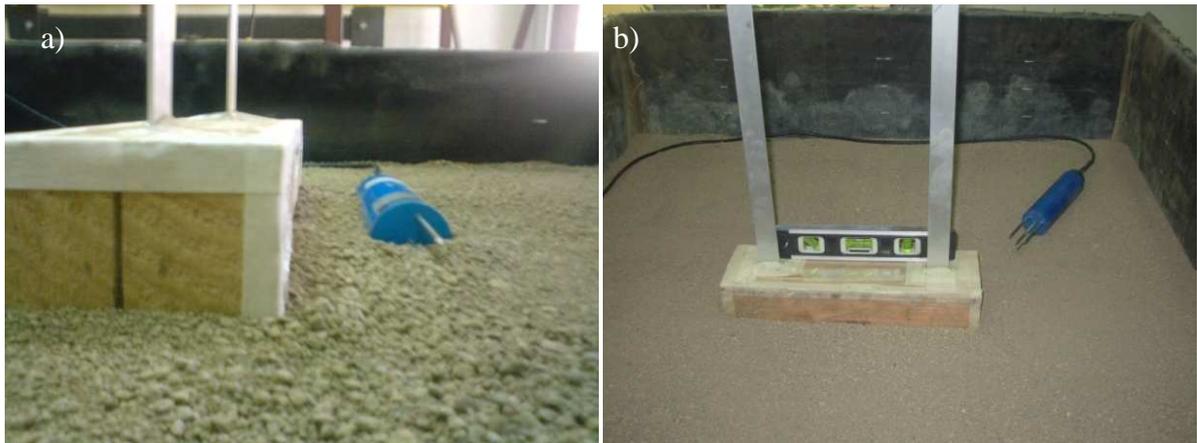


Figura 4. 24: Ubicación del sensor P5 en el ensayo de a) Desplazamiento Controlado b) Medición Ambiental



Figura 4. 25: a) Vistas de perfil y b) vista de frente de la estructura a escala fundada en el modelo

Luego de alcanzado el nivel de superficie se colocó a lo largo y ancho del modelo una grilla con un espaciado de 5 cm a cada lado, la grilla se muestra en la figura 4.26. Finalmente en cada experiencia se instaló un acelerómetro en el tope de la estructura. Para el ensayo de desplazamiento controlado se colocó el acelerómetro Kistler y para el ensayo de mediciones ambientales se colocó el acelerómetro EPI. El acelerómetro Kistler se ubicó a un costado de los pesos añadidos a la estructura, el acelerómetro se coloca de este modo para que coincida la

dirección de medición del acelerómetro y la dirección de vibración de la estructura, mientras que el acelerómetro EPI se ubicó encima de los pesos añadidos a la estructura debido al tamaño y al peso con respecto a la estructura. La ubicación de los acelerómetros se muestra en la figura 4.27.



Figura 4. 26: Grilla colocada en el modelo

4.4 ADQUISICION DE DATOS

Para las experiencias de deformación controlada y medición ambiental se utilizaron acelerómetros Kistler modelo 8310A2 y EPISensor modelo ES-U2 respectivamente, de manera de registrar las vibraciones de la estructura. Para obtener el contenido de agua del suelo a distintas profundidades se utilizaron tres sensores de humedad MP 406. En la figura 4.27 se muestran los acelerómetros utilizados y la ubicación de cada uno en las dos experiencias

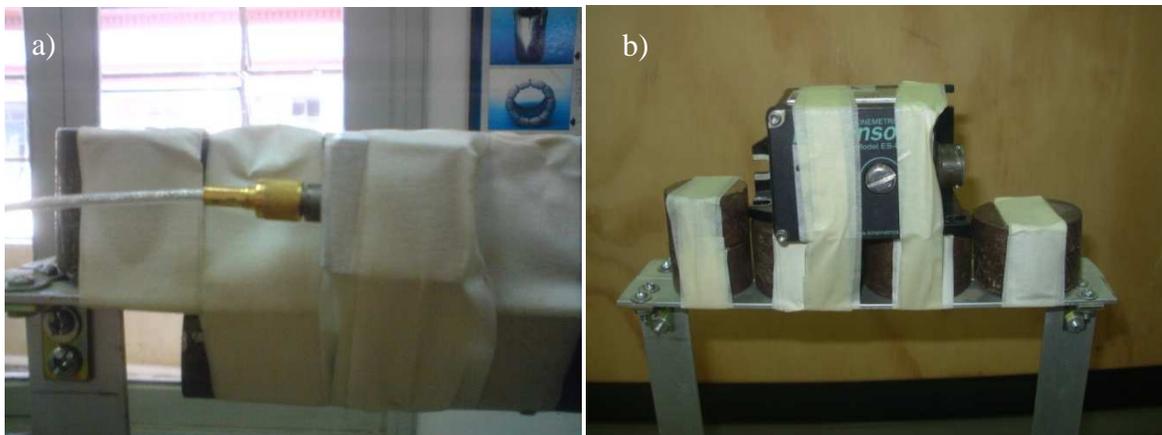


Figura 4. 27: Acelerómetros a) Kistler Modelo 8310A2 y b) EPISensor modelo ES-U2

Los sensores están conectados a una caja construida en laboratorio que contiene las conexiones eléctricas que energizan los sensores. Esta caja se conecta a una fuente de poder que alimenta a los sensores con un voltaje de 12 Volts. La caja esta unida por medio de cables BNC a un terminal que esta conectado a una tarjeta National Instruments NI-PCI 6014 de 16 bits, 200 KHz, con una capacidad de 16 canales SS/8 DIF que permite convertir la señal analógica que proporcionan los sensores a una muestra de 16 bits a 200KHz. En la figura 4.28 se muestra las conexiones entre la fuente de poder, la caja de conexiones eléctricas y la terminal unida a la tarjeta NI-PCI, mientras que en la figura 4.29 se muestran la caja de conexiones eléctricas y la terminal conectada a la tarjeta NI-PCI

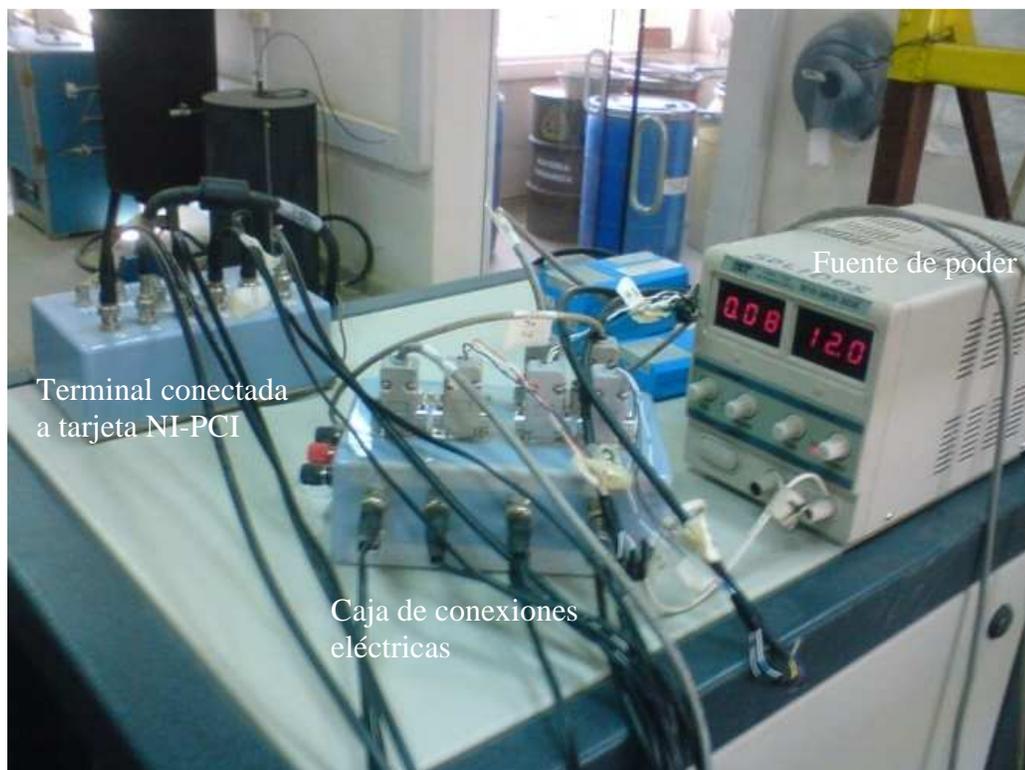


Figura 4. 28: Conexión de caja a fuente de poder y Tarjeta NI-PCI 6014

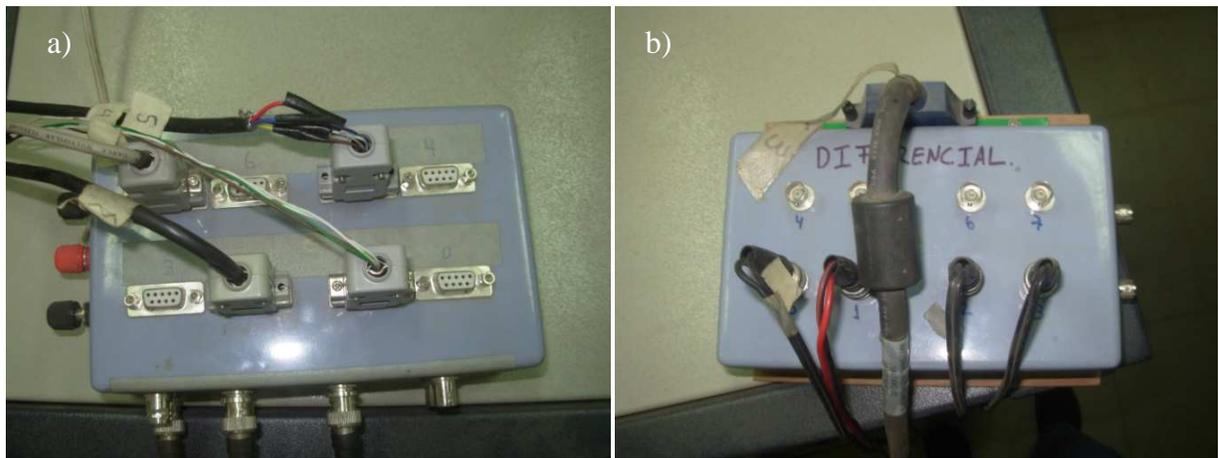


Figura 4. 29: a) Caja que energiza sensores b) Terminal que une a Tarjeta NI-PCI 6014

El software utilizado para visualizar y grabar los datos medidos en ambas experiencias fue el programa LABVIEW versión 5. En la figura 4.30 se muestra el software durante el registro de datos. Este programa computacional graba el registro en formato txt, el cual es posteriormente transformado a formato mat para ser analizado con el software Matlab. En el canal i0 esta conectado el sensor P5 que está a 5 cm de profundidad, el canal i1 está conectado el sensor P10 que está a 10 cm, en el canal i2 esta conectado el sensor P20 que está a 20 cm y en el canal i3 está conectado el acelerómetro. En el ensayo de desplazamiento controlado los registros llevan el nombre *horaxx_yy_i*, donde *xx* indica la hora luego de agregado el agua al modelo, *yy* indica la cantidad de litros de agua agregada en el modelo e *i* indica el número de ensayos realizados en ese instante de tiempo. Cada archivo contiene 90 segundos de registro. Por otro lado los archivos del ensayo con mediciones ambientales llevan el nombre con el formato *haabbccdd*, donde *aa* indica el mes, *bb* indica el día, *cc* indica la hora y *dd* los minutos de inicio del registro, cada archivo contiene 6 horas de datos. Los registros tienen una frecuencia de muestreo de 200 datos por segundo y cuatro columnas de datos, la columna uno tiene los registros del sensor P5, la columna dos contiene los registros del sensor P10, la columna tres el sensor P20, mientras que la columna cuatro contiene los registros entregados por el acelerómetro.

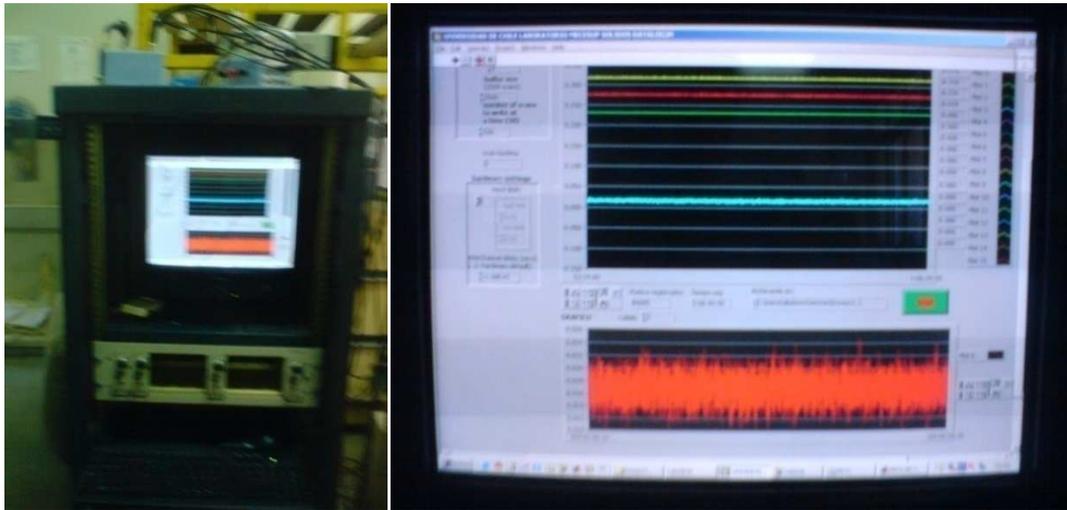


Figura 4. 30: Software LabView durante el registro de datos

4.5 EJECUCIÓN DEL ENSAYO

4.5.1 ADICIÓN DE AGUA AL MODELO

Para agregar agua al modelo se utilizó un dispensador manual de agua con capacidad de 5 litros. Mediante presión el agua era esparcida simulando el efecto de lluvia y distribuyendo de manera uniforme el agua en la superficie del modelo. Este proceso tuvo una duración variable, dependiendo de la cantidad de agua que se iba agregando. Por ejemplo, en el ensayo de desplazamiento controlado el proceso de agregar 5 litros de agua tomó aproximadamente veinte minutos, mientras que para agregar 10 litros tomó cerca de cuarenta minutos, en la figura 4.31 se muestra uno de los instantes en que se agregó agua al modelo.

Los ensayos de desplazamiento controlado se dividen en dos ensayos. En el primero se agregaron 5 litros de agua al modelo en cuatro oportunidades, la primera vez al iniciar el ensayo, la segunda fue a las 6 horas de iniciado el ensayo, la tercera a las 23 horas, y la cuarta a las 28,5 horas de iniciado el ensayo. Mientras que en el segundo ensayo, que es una continuación del primer ensayo, pero antes de iniciar las mediciones se dejó secar el suelo, se agregó agua al modelo en tres oportunidades, la primera vez se agregaron 5 litros de agua al iniciar el ensayo, la segunda vez se agregaron 10 litros de agua a las 20 horas de iniciado el ensayo y la tercera vez se agregaron 10 litros de agua a las 43.5 horas de iniciado el ensayo.

En los ensayos de mediciones ambientales se agregaron 10 litros de agua una vez por semana a excepción de la tercera semana de registro y en la cuarta semana de registro, en la semana tres se agregaron 10 litros de agua en dos oportunidades con el propósito de observar la en esa semana la repetitividad de la variación, mientras que en la semana cuatro no se agregó agua al modelo con la intención de secar el suelo.



Figura 4. 31: Simulación de efecto de lluvia producto del dispensador de agua

4.5.2 REGISTRO DE DATOS

En la experiencia de desplazamiento controlado se desplazó la parte superior de la estructura en 1.5 cm y se dejó oscilar libremente. Se registró la oscilación de la estructura y el contenido de humedad del suelo con el software Labview por un periodo de 90 segundos. Este proceso se repitió tres veces en ese instante de tiempo. El procedimiento se repitió varias veces durante el día mientras duró el ensayo, pero principalmente se realizó en los instantes de tiempo justo antes y justo después de agregar agua. El ensayo de desplazamiento controlado se dividió en dos ensayos, el primer ensayo tuvo una duración de 7 días y el segundo ensayo tuvo una duración de 10 días. Este ensayo es una continuación del primero, se divide en dos experiencia porque entre un ensayo y otro el suelo se dejó secar por un periodo de 20 días.

En el registro de mediciones ambientales, una vez iniciado el ensayo se registra la variación del contenido de humedad del suelo y la vibración de la estructura durante todo el periodo de ensayos con el software Labview. El tiempo ocupado para realizar el registro de mediciones ambientales fue de 8 semanas.

Para procesar los archivos obtenidos con el software LabView en los ensayos de desplazamiento controlado y mediciones ambientales se ocupó el software MatLab, en el cual se implementaron códigos para obtener la frecuencia de la estructura, tanto por el método de Ibrahim de dominio del tiempo, y el método de espectro de potencia. Para la experiencia realizada mediante desplazamiento controlado se utiliza el código `ibrahim2`, que identifica frecuencias, amortiguamientos y formas modales utilizando el método de Ibrahim, el código se presenta en el anexo A.

Por otro lado para mediciones ambientales se implemento el código `psdGVV1c` que obtiene el espectro de potencia utilizando como subrutina el código `pwelch` que utiliza el método de Welch, los códigos también son presentados en el anexo C. Para la obtención del contenido de agua se utiliza el código “humedad”, que toma los registros relacionados con los sensores de humedad y obtiene el promedio, luego por medio de la calibración realizada a cada sensor se transforma los registros de Volt a grado de saturación esta rutina se presenta en el anexo B. Los dos códigos se procesaron como subrutinas de “automatico” de la que se obtiene una tabla con el contenido de humedad obtenida por cada sensor de humedad en las tres primeras columnas y la frecuencia natural del modelo.

4.6 RESULTADOS Y ANALISIS

4.6.1 ENSAYO DE DESPLAZAMIENTO CONTROLADO

La figura 4.32 muestra la frecuencia natural de la estructura antes de haber agregado agua al suelo, es decir en estado seco, y se puede apreciar que la frecuencia natural se mantuvo estable entre 0.93 Hz y 0.927 Hz. Este último valor fue considerado como el punto de partida de las mediciones. La frecuencia de la estructura empotrada en el suelo seco es menor debido a que el suelo con la densidad utilizada no genera un empotramiento perfecto a la estructura, produciéndose rocking en la fundación de la estructura. En cambio cuando la estructura fue empotrada a una base rígida no se produjo rocking.

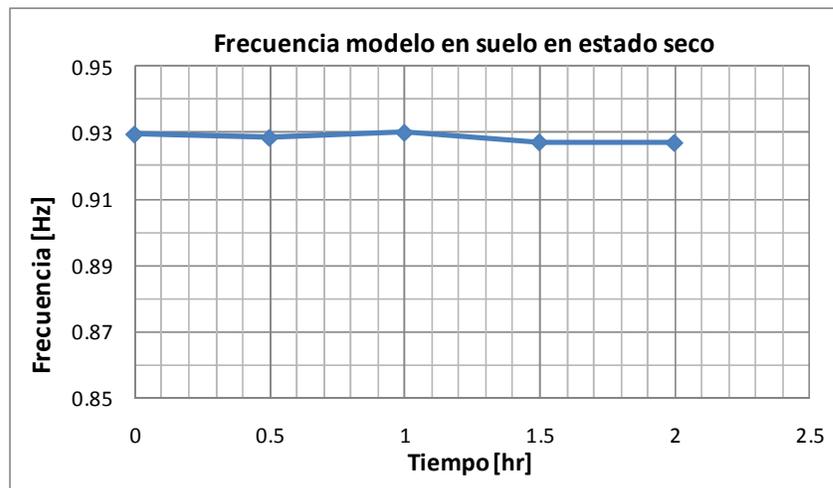


Figura 4. 32: Frecuencia natural de la estructura fundada en suelo seco.

La figura 4.33 muestra la variación de la frecuencia natural de la estructura y del contenido de humedad del suelo registrado por los sensores P5, P10 y P20 en función del tiempo en las primeras 60 horas de medición. La línea punteada vertical indica el momento en que se agregó una cantidad de 5 litros de agua. En la figura se puede apreciar que la frecuencia natural de la estructura varía con el contenido de humedad del suelo. El suelo estaba en estado seco cuando se agregó agua por primera vez, observando una rigidización del modelo, que se tradujo en un leve aumento en la frecuencia. Se cree que esto se debe a que el agua generó una tensión por capilaridad en las partículas, lo que incrementó la tensión efectiva en el suelo y por lo tanto aumentó la rigidez del suelo de fundación. En ese momento aún no se percibían variaciones en el contenido de humedad en los sensores P10 y P20. Este leve aumento en la frecuencia natural se estabilizó a las 6 horas. En ese instante se agregaron otros 5 litros de agua, lo que nuevamente generó un leve aumento de la frecuencia natural durante las siguientes 17 horas. Se observa que este periodo el contenido de humedad del suelo a los 5 cm disminuyó y a los 10 cm aumentó, debido al descenso del agua dentro del modelo. Este aumento en la frecuencia natural se puede deber a la rigidización del suelo a nivel del sello de fundación, es decir a los 10 cm de profundidad. A las 23 horas el frente de agua aún no alcanzaba los 20 cm de profundidad, como lo refleja el sensor P20.

A las 23 horas se agregaron 5 litros de agua por tercera vez, lo que generó un disminución en la frecuencia de la estructura en un 0.4%, como se observa en la figura 4.32. Esta cantidad de agua provocó un aumento en el grado de saturación del suelo, por lo menos en los primeros 10 cm, alcanzando un 40% a los 5 cm de profundidad y un 35 % a los 10 cm. Este grado de

saturación disminuyó rápidamente, hasta que a las 28.5 horas se agregó otra cantidad de 5 litros de agua, traduciéndose en una nueva alza en el grado de saturación en los primeros 10 cm, sobrepasando el 40%. Este nuevo aumento en el contenido de humedad coincide con una caída en la frecuencia natural de la estructura en un 0.6%. En las siguientes 20 horas el frente de agua descendió, alcanzando la profundidad de 20 cm y generando una disminución en el contenido de humedad en los primeros 10 cm. Esta disminución coincide con un aumento en la frecuencia natural, la cual se estabiliza una vez que el grado de saturación del modelo también se estabiliza.

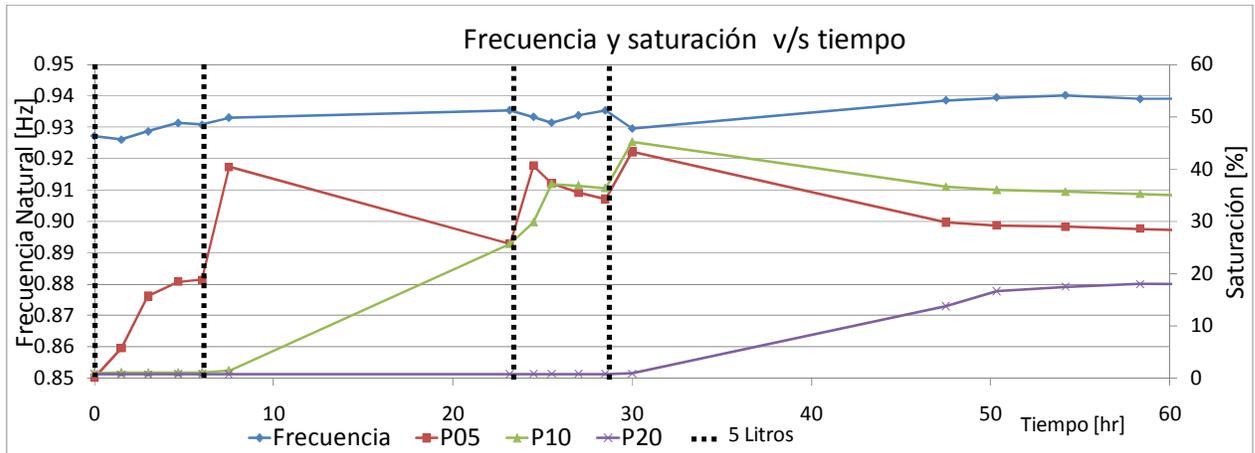


Figura 4. 33: Frecuencia y Saturación v/s Tiempo Desplazamiento Controlado primeras 60 horas de medición

En la figura 4.34 se pueden apreciar los resultados del primer ensayo durante todo el periodo de medición. Se observa que pasada las 60 horas el contenido de humedad en los primeros 10 cm comenzó a descender, asociado a que el frente de agua dentro del modelo continuó bajando. El grado de saturación a 20 cm se mantuvo constante en este periodo, lo que implicaría que el agua iba descendiendo en forma homogénea, es decir que no era retenida por lo menos en esa profundidad. Este muy leve cambio en el contenido de humedad en el modelo coincide con una frecuencia natural estable en 0.94 Hz.

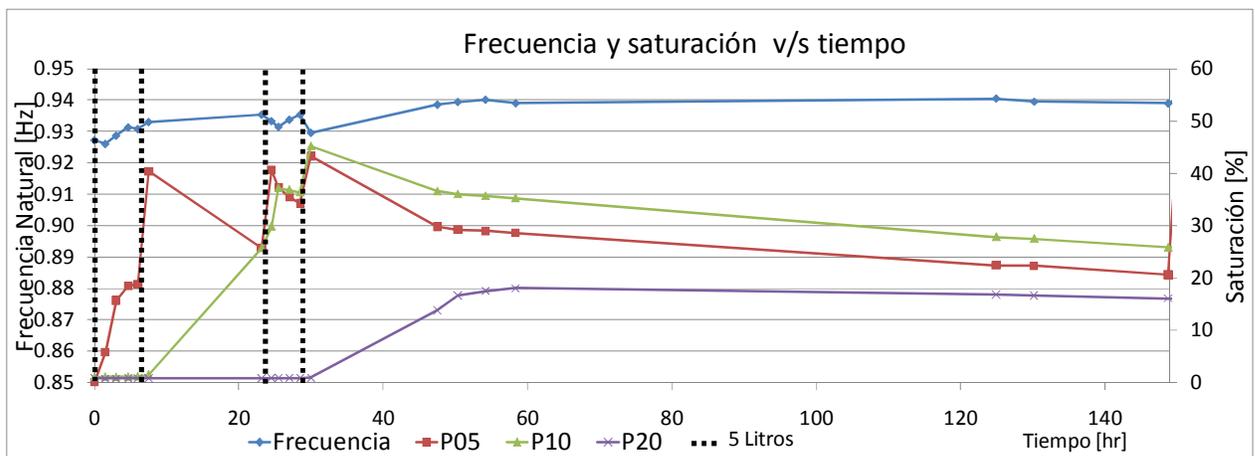


Figura 4. 34: Frecuencia y Saturación v/s Tiempo Desplazamiento Controlado

La figura 4.35 muestra las mediciones registradas del segundo ensayo realizado con desplazamiento controlado. Si bien esto se considera un segundo ensayo, es la continuación del primer ensayo que se dejó secar por 20 días, es por esto que los contenidos de humedad a 5 cm, 10 cm y 20 cm son distintos de cero. Además la frecuencia natural inicial es distinta a la última obtenida en el primer ensayo porque durante los 20 días que se dejó secar el suelo, el modelo se siguió rigidizando, lo que se tradujo en el aumento de la frecuencia entre los ensayos. En este ensayo se agregó agua al modelo en tres oportunidades, 5 litros al inicio, 10 litros a las 20 horas, y 10 litros a las 43 horas. Al agregar los primeros 5 litros de agua se observó un decaimiento de la frecuencia de la estructura en 0.45%, frecuencia que se mantuvo constante hasta las 20 horas, instante en que se agregaron los siguientes 10 litros de agua. En ese momento se observó una nueva disminución de la frecuencia de 1.25%. Es posible observar que esta disminución coincide con un aumento del grado de saturación del suelo por sobre el 40% en los 10 cm más superficiales. Se observa que una vez que el grado de saturación se redujo por debajo del 40% la frecuencia natural aumentó y retornó al valor que tenía antes.

Cuando se agregaron los últimos 10 litros a las 43 horas se observó el mismo comportamiento que el registrado a las 20 horas. La frecuencia natural del modelo disminuyó en 1.2 %, coincidiendo con un aumento en el grado de saturación del suelo en los primeros 10 cm de profundidad por sobre el 40%. Se cree que la pérdida de rigidez de la estructura se debe a la disminución en la tensión efectiva generada por la capilaridad. La capilaridad se pierde una vez que el contenido de humedad aumenta demasiado en los primeros 10 cm. Posteriormente la frecuencia natural aumentó cuando el grado de saturación en los 10 primeros cm bajó del 40%.

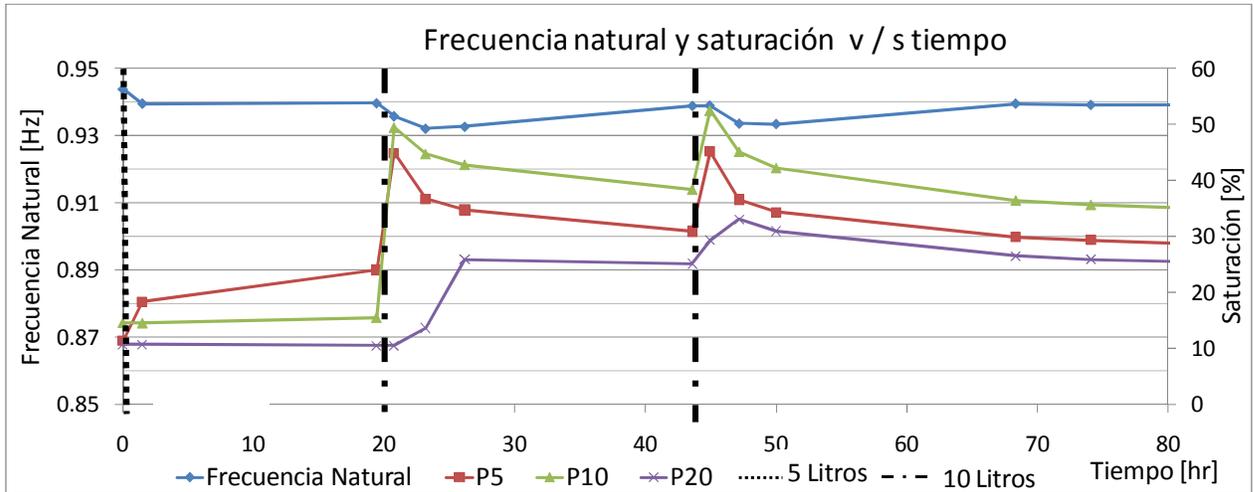


Figura 4. 35: Frecuencia y Saturación v/s Tiempo Desplazamiento Controlado primeras 80 horas de medición

En la figura 4.36 se muestra el registro del segundo ensayo durante todo el periodo de medición. Se puede observar que la frecuencia natural de la estructura se mantuvo estable en 0.94 Hz durante todo el ensayo, excepto cuando el grado de saturación del suelo en los primeros 10 cm supero el 40%, lo que genero una disminución en la frecuencia natural.

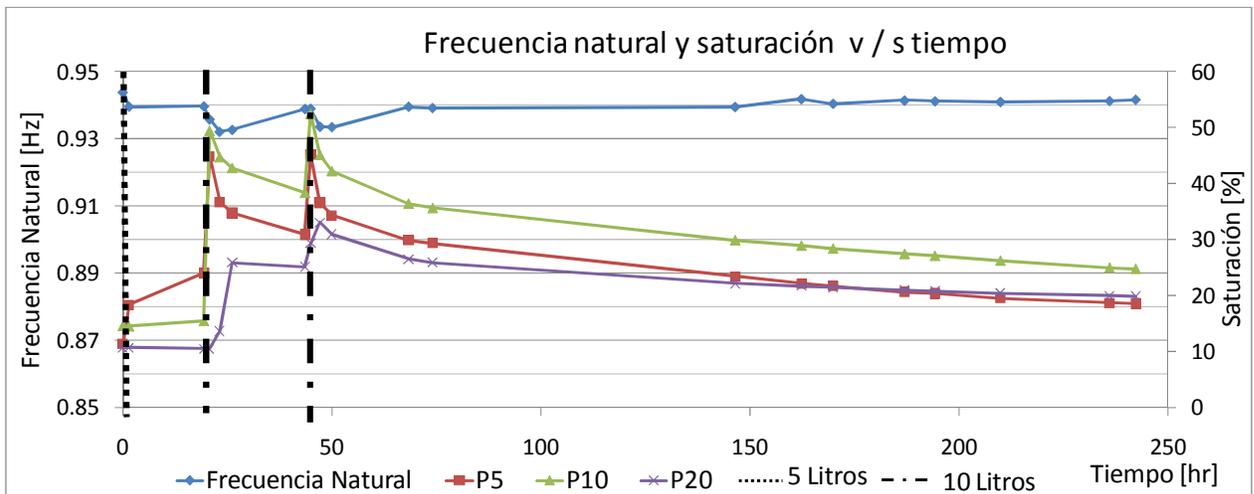


Figura 4. 36: Frecuencia y Saturación v/s Tiempo Desplazamiento Controlado

En la figura 4.37 se muestran dos perfiles del grado de saturación registrados a las 20 y 43 horas, justo después de haber agregado 10 litros de agua. En estos instantes de tiempo se observó una disminución de la frecuencia natural del modelo de un 1.2%. En la figura es posible apreciar que el contenido de humedad del suelo en los primeros 10 cm de profundidad es similar en los dos perfiles y que, bajo los 10 cm, el contenido de humedad es diferente. La frecuencia natural del modelo varía producto de los cambios que se observan en los costados y en la base de la

fundación, pero no se vería afectada por los cambios en el contenido de humedad que ocurre bajo el sello de fundación.

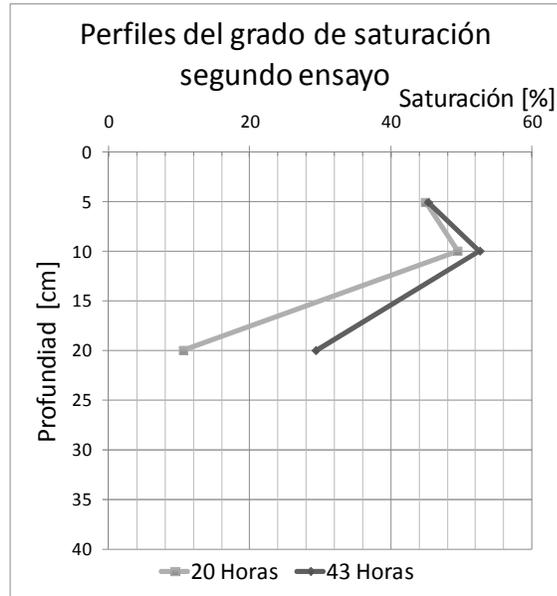


Figura 4. 37: Perfil de Grado de Saturación en dos tiempos diferentes

4.6.2 ENSAYOS DE MEDICIONES AMBIENTAL

Antes de iniciar el ensayo de medición ambiental se obtuvo la frecuencia natural de la estructura fundada en el suelo seco. La figura 4.38 muestra la frecuencia natural durante 60 horas de registro y análisis, apreciándose que se mantuvo estable en 1.02 Hz. Este valor es mayor a la frecuencia natural obtenida en el primer ensayo de desplazamiento controlado que fue de 0.93 Hz. Esta diferencia se debe a que el suelo en el ensayo de medición ambiental se colocó a una densidad mayor, lo que se traduce en un suelo de fundación más rígido y se refleja en una frecuencia natural de la estructura mayor.

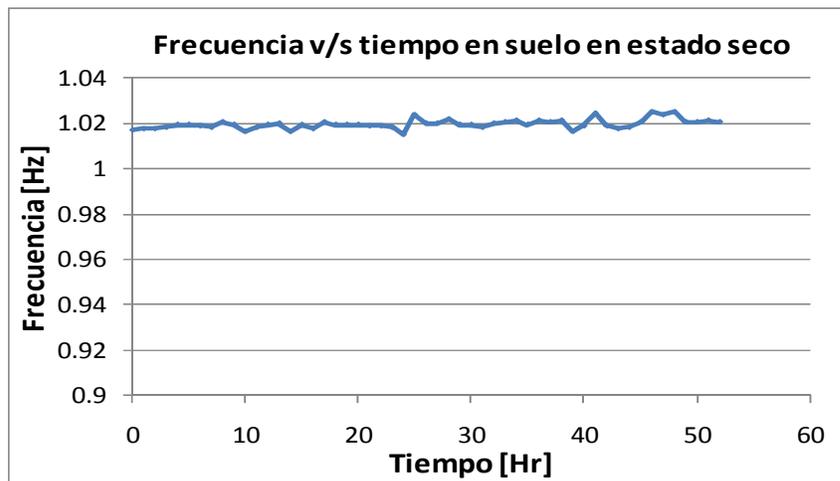


Figura 4. 38: Frecuencia natural de la estructura fundada en suelo en estado seco

A continuación se presentan los resultados y registros obtenidos en el ensayo de medición ambiental, el cual duro 8 semanas. En la figura 4.39 se muestra la frecuencia natural y el grado de saturación a 5 cm, 10 cm y 20 cm de profundidad en los primeros cuatro días de la primera semana de medición. Se aprecia que el valor de inicio de la frecuencia natural de la estructura es de 1.01 Hz y difiere de lo obtenido en el ensayo previo con el suelo en estado seco, esta diferencia se debe al efecto de un cable que se conectó justo antes de iniciar este ensayo. Se observa que tal como sucedió en la experiencia de desplazamiento controlado, al agregar agua al suelo en estado seco el modelo se rigidizó producto del aumento de tensiones efectivas por capilaridad, reflejándose en un aumento de la frecuencia natural. Este aumento corresponde a un 0.38% y se mantiene durante el transcurso de la semana. Cabe destacar que al agregar los 10 litros de agua solo se observó un aumento en el grado de saturación a los 5 cm de profundidad, alcanzando un valor cercano al 45%. A medida que el agua descendió dentro del modelo, el grado de saturación a los 5 cm disminuyó mientras que a mayor profundidad aumentó levemente. Este cambio en el contenido de humedad del suelo no afecto visiblemente la frecuencia natural del modelo a escala.

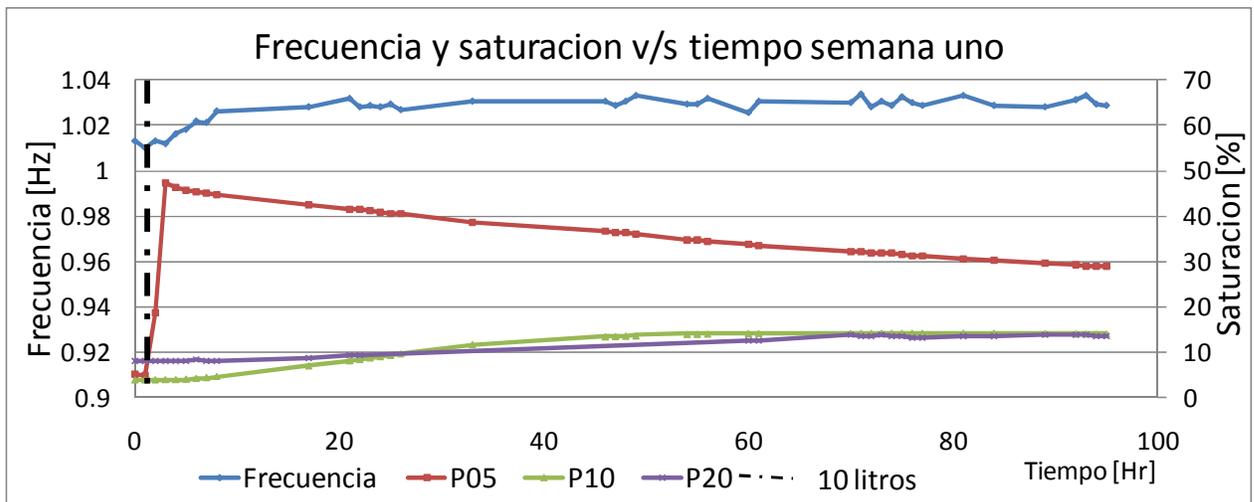


Figura 4. 39: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana uno

La figura 4.40 muestra los perfiles del grado de saturación del suelo al inicio, a las 3 horas y a las 55 horas. Se aprecia un aumento importante en el grado de saturación a los 5 cm en las primeras horas, periodo en que se produce la rigidización del modelo, por lo que se vuelve a observar que cambios en el contenido de humedad suelo en los costados de la fundación tienen un efecto en el comportamiento de la estructura.

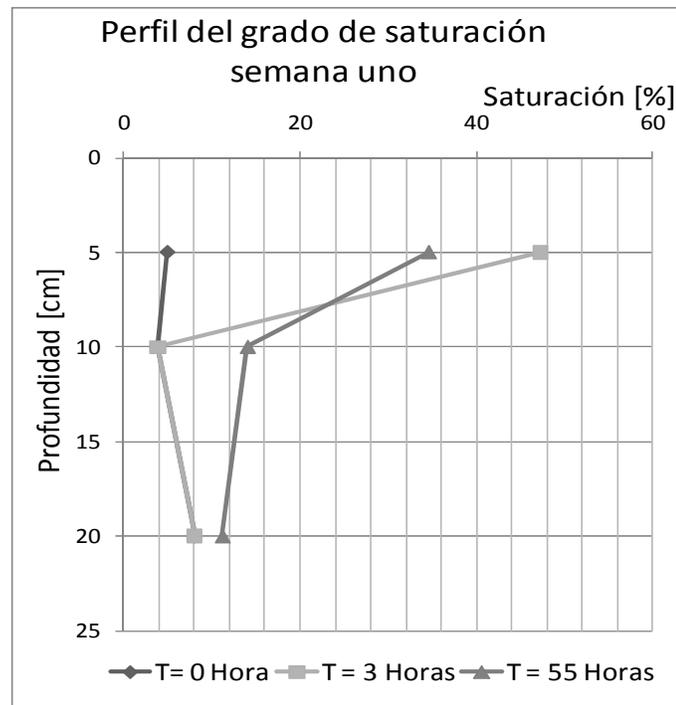


Figura 4. 40: Perfiles de contenido de humedad en el suelo en semana uno

En la figura 4.41 se muestran las mediciones efectuadas en la segunda semana de ensayos y se aprecia que la frecuencia del modelo se mantuvo estable en torno a 1.03Hz en las primeras 26 horas. En ese momento se esparcieron 10 litros de agua a la superficie del modelo y se observó una disminución de la frecuencia en un 1.65%. En ese momento el grado de saturación en los primeros 10 cm de suelo aumentó rápidamente, llegando a un valor de 50% a los 5 cm y a 40% a los 10 cm de profundidad. Una vez que el grado de saturación a los 5 cm bajó del 45% la frecuencia natural comenzó a aumentar, hasta alcanzar un valor similar al que tenía al comienzo de la segunda semana.

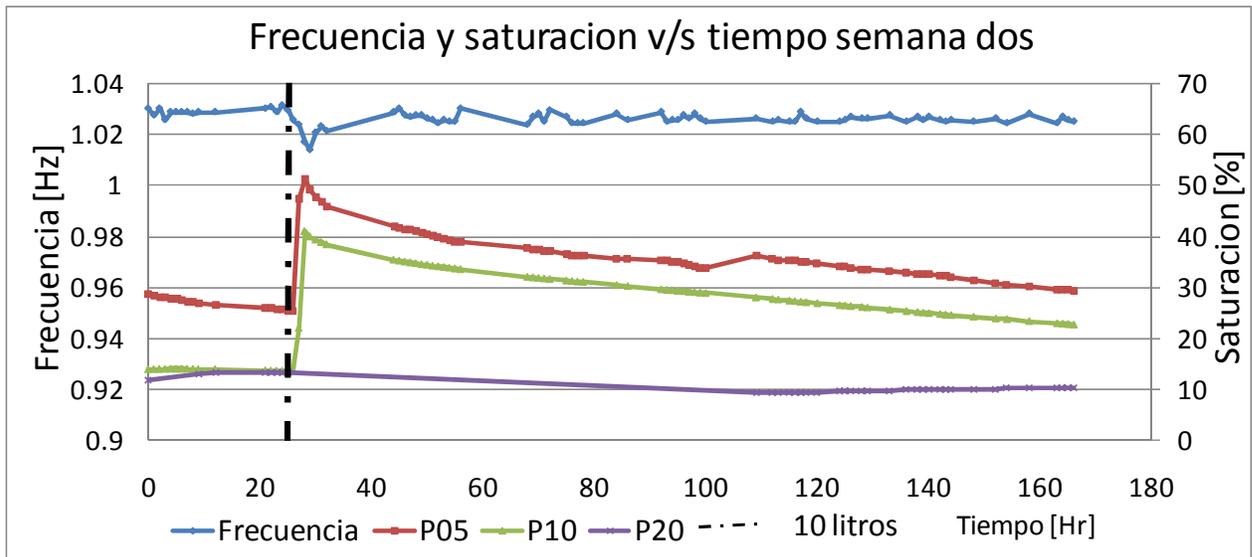


Figura 4. 41: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana dos

La figura 4.42 muestra los registros del grado de saturación y la frecuencia natural obtenida en la tercera semana de ensayo. En esta oportunidad se agregaron 10 litros a las 48 horas y 10 litros a las 96 horas, pudiéndose observar claramente como la frecuencia comenzó a disminuir justo después de estos eventos. A las 50 horas se observa una disminución del 1.3% de la frecuencia y un aumento del grado de saturación en los primeros 10 cm de suelo, alcanzando valores entre 45% y 50%. El sensor P20 registró al comienzo un leve aumento en el contenido de humedad, como se aprecia en la figura 4.41. Sin embargo, luego de 20 horas de haber agregado el agua el contenido de humedad a los 20 cm de profundidad comenzó a aumentar significativamente, hasta alcanzar un valor de un 30% en el grado de saturación a las 96 horas. En ese momento el contenido de humedad de todo el modelo era bastante uniforme. Una hora después, es decir a las 97 horas se agregaron nuevamente 10 litros de agua, observándose un aumento en el grado de saturación en las tres profundidades instrumentadas, superando un valor

de 45%. Consistentemente con los casos anteriores, la frecuencia natural disminuyó y luego se recuperó a los valores iniciales. El momento en que este aumento ocurrió coincide nuevamente con el instante en que el grado de saturación del suelo a 5 cm bajó de un valor cercano al 45%.

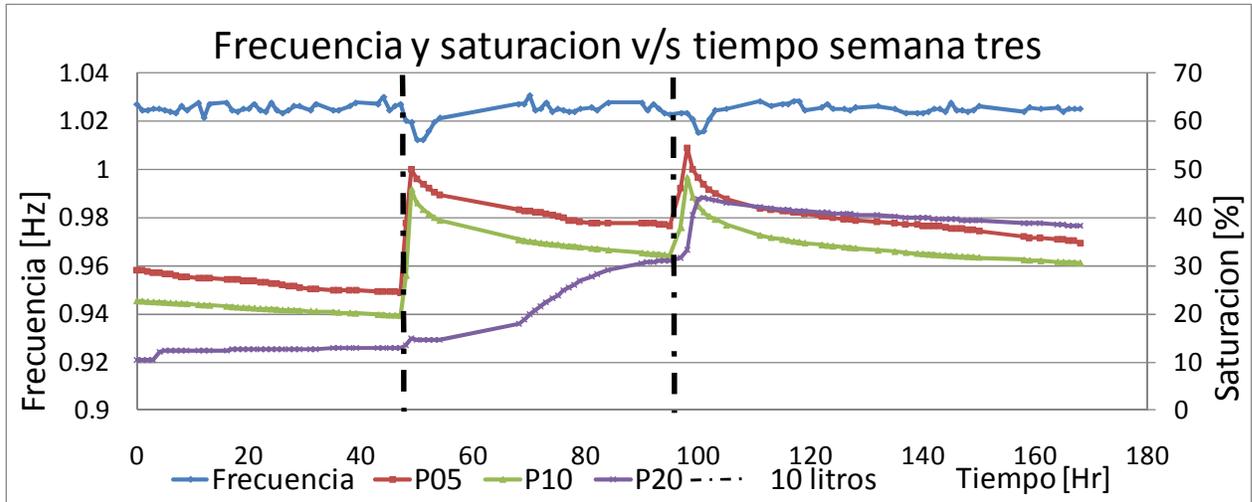


Figura 4. 42: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana tres

En la figura 4.43 se aprecian los perfiles de saturación del suelo justo después de agregar agua al modelo. Se puede observar que en la hora 49 y 98 el contenido humedad en los 10 primeros centímetros es similar, y a 20 centímetros el contenido de humedad es diferente, el valor de la frecuencia natural en esos instantes es prácticamente el mismo a pesar de la diferencia en el contenido de humedad en torno a los 20 cm de profundidad.

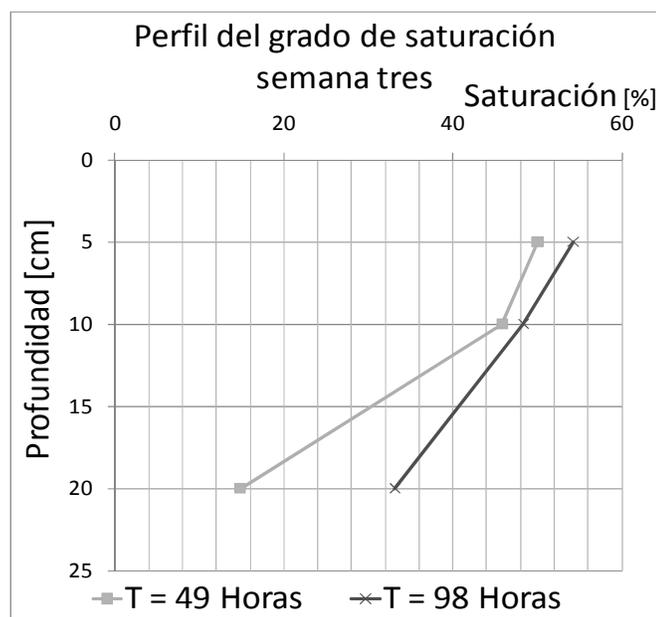


Figura 4. 43: Perfiles de contenido de humedad en el suelo en semana tres

En el transcurso de la cuarta semana de ensayos, no se agregó agua al modelo por lo que el contenido de humedad del suelo descendió notoriamente. Esta disminución se aprecia tanto en la figura 4.44 como en la figura 4.45, donde se observan los perfiles del grado saturación del suelo a las 0 horas, 74 y 167 horas de medición. Se observa que la disminución del contenido de humedad no es uniforme, traduciéndose en un descenso más acelerado registrado en el sensor P5 que en los sensores P10 y P20. También durante esta semana de ensayos se aprecia un alza de la frecuencia natural de la estructura de un 0.3%. Se cree que este leve aumento se debe a que la disminución del contenido de humedad, generando una leve rigidización del suelo de fundación.

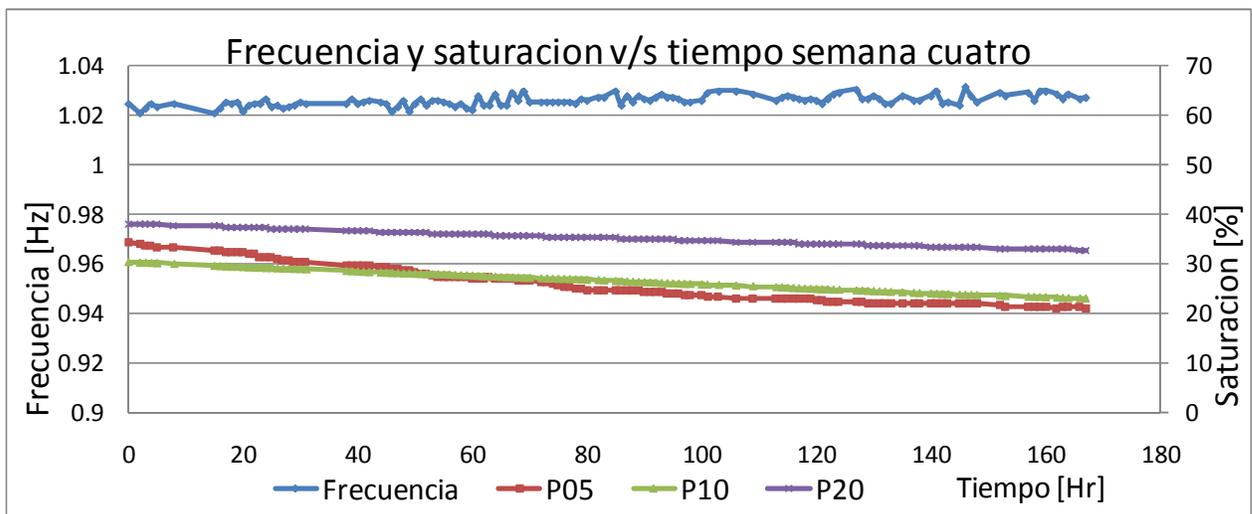


Figura 4. 44: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana cuatro

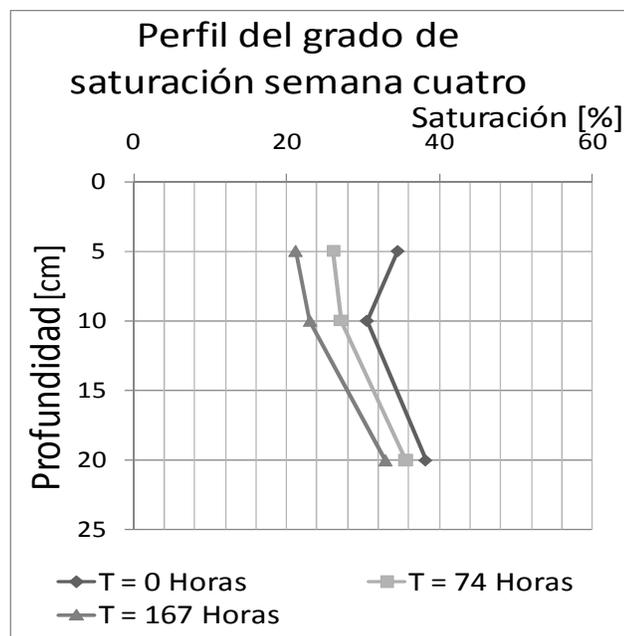


Figura 4. 45: Perfiles de contenido de humedad en el suelo en semana cuatro

Durante la quinta semana de ensayo, cuyos resultados se muestran en la figura 4.46, se observa la misma respuesta que en las semanas anteriores. Al momento de agregar 10 litros de agua a las 50 horas, el grado de saturación del suelo en los primeros 10 cm de profundidad aumenta por sobre el 45 %, que coincide con una disminución de la frecuencia natural. Cuando el grado de saturación baja de valores del 40%, la frecuencia natural de la estructura vuelve a los valores obtenidos al inicio de la semana. El sensor P5 no presenta registros después de la hora 95, puesto que este sensor presentó problemas en la lectura de datos y no se registró el contenido de humedad a 5cm de profundidad en las últimas 60 horas de medición de la quinta semana y en las primeras 50 horas de la sexta semana de medición.

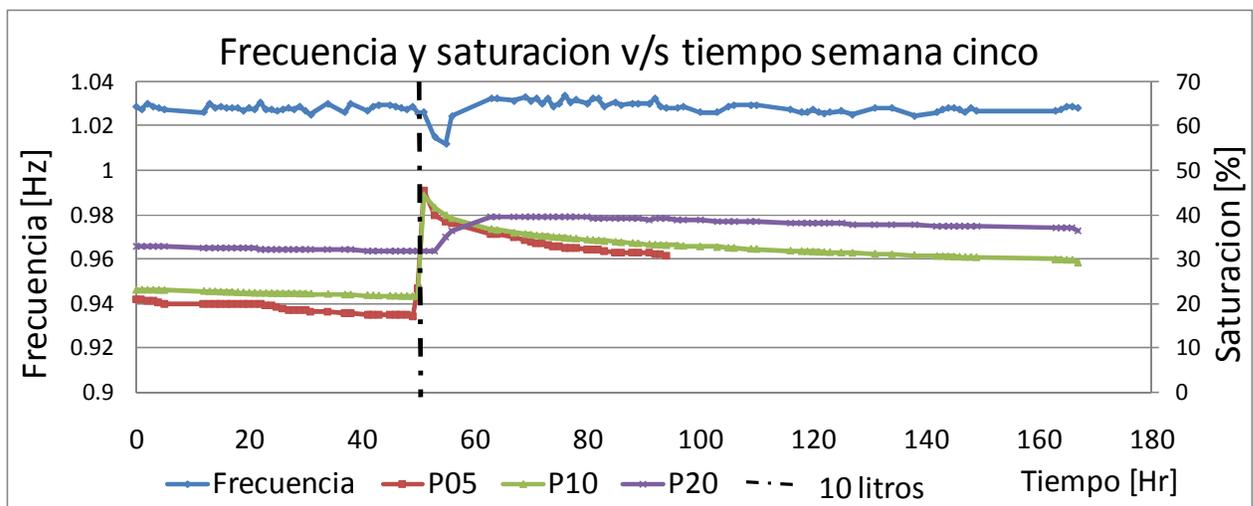


Figura 4. 46: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana cinco

En la sexta semana de medición, cuyos resultados se muestran en la figura 4.47, se esparcieron 10 litros de agua sobre la superficie del suelo a las 48 horas. La frecuencia natural de la estructura se mantuvo constante durante toda la semana a excepción del momento justo después de haber agregado el agua. La frecuencia natural de la estructura disminuyó en un 1.15%, al mismo momento se observó un aumento en el contenido de humedad en todo el modelo, siendo este aumento mayor en los primeros 10 cm de profundidad, donde se alcanzan valores cercanos al 50% de saturación. Esta respuesta del modelo es muy similar a las observadas en las semanas anteriores, lo que indica una muy buena repetitividad de los ensayos.

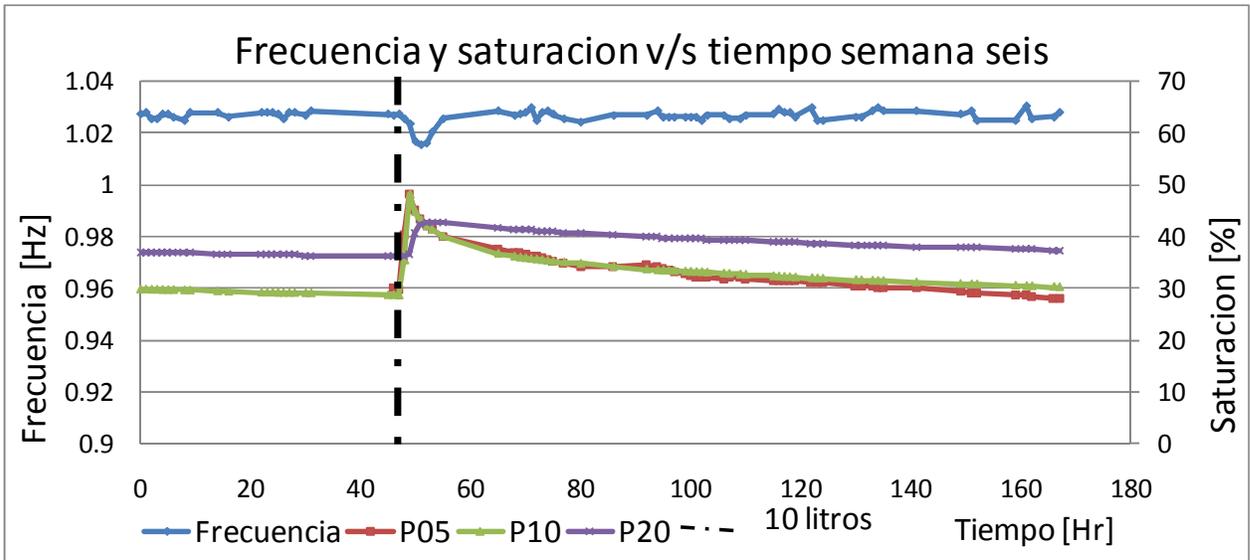


Figura 4. 47: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana seis

En la semana siete, cuyos resultados se muestran en la figura 4.48, se agregaron 10 litros de agua a las 21 horas. Al igual que en semanas anteriores la frecuencia se mantuvo constante durante el transcurso de toda la semana, excepto en el momento después de agregado el agua. La disminución de la frecuencia natural de la estructura obtenida esta semana es de 0.7%. Al mismo instante de tiempo el grado de saturación del suelo aumentó en las tres profundidades instrumentadas, siendo este aumento más significativo en los 10 cm superficiales, donde se alcanzan valores cercanos al 50% de saturación.

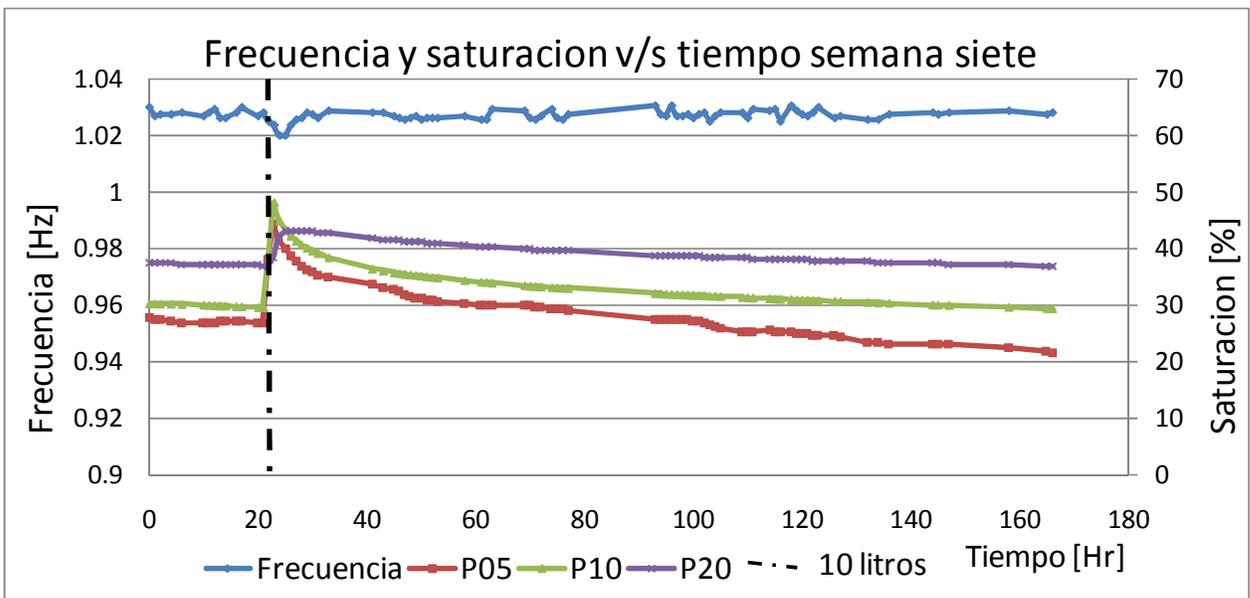


Figura 4. 48: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana siete

En la octava semana de medición, cuyos resultados se presentan en la figura 4.49, se agregaron 10 litros de agua a las 22 horas. Se observa un aumento en el contenido de humedad en todo el modelo, siendo este aumento más significativo a 10 cm y 20 cm de profundidad, donde se alcanzaron valores cercanos al 45% de saturación. Mientras que a 5 cm de profundidad el grado de saturación no supera el 40%. Al mismo instante se aprecia una disminución de la frecuencia natural de la estructura en un 0.87%. En forma simultánea cuando el contenido de humedad a los 10 cm de profundidad bajó del 40% de saturación, la frecuencia natural de la estructura aumentó retornando a los valores obtenidos al inicio de esta semana.

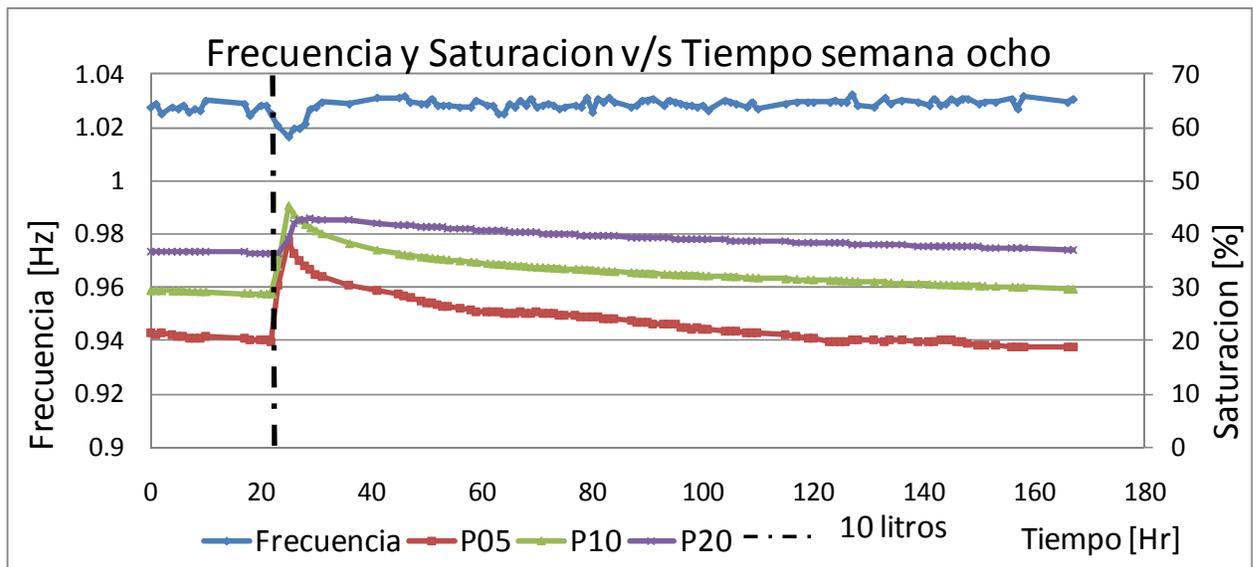


Figura 4. 49: Frecuencia y saturación v/s tiempo semana ocho

4.6.3 ANALISIS DE RESULTADOS

Se observó una disminución en la frecuencia natural de la estructura que coincide con un aumento del contenido de humedad del suelo en los primeros 10 cm de profundidad. La disminución de la frecuencia se percibe cuando el aumento del contenido de humedad sobrepasa el 40% de saturación en los ensayos de desplazamiento controlado y un 45% en los ensayos de mediciones ambientales. Se cree que esta diferencia se produjo por la distinta densidad del suelo en ambos ensayo.

Aunque bajo el sello de fundación se registraron cambios en el contenido de humedad, no se observó una clara relación entre los cambios en el contenido de humedad a los 20 cm de profundidad y la frecuencia natural.

Por otra parte se observó un aumento de la frecuencia natural de la estructura al inicio de los ensayos. En los dos tipos de ensayos, al agregar por primera vez agua, aumentó la tensión efectiva del suelo debido al efecto de capilaridad. Este aumento de la tensión efectiva rigidiza el modelo traduciéndose en un aumento de la frecuencia natural de la estructura. Cuando la frecuencia se estabiliza se mantuvo en esos valores por todo el periodo de ensayo a excepción de los momentos justo después de haber agregado agua, en el transcurso de los ensayos.

La prolongación de la disminución de la frecuencia es de 5 a 6 horas, este periodo de tiempo se limita debido a que durante ese lapso el contenido de humedad esta por sobre el 40% de saturación y al finalizar este periodo el grado de saturación disminuyó a valores por debajo del 40%.

Al finalizar el ensayo de desplazamiento controlado se detectó una alteración en la interacción suelo – estructura, que se traduce en una disminución de la frecuencia natural de la estructura. Esta alteración se debe al constante desplazamiento que fue provocada a la estructura lo que provocó una pérdida de rigidez del suelo cercano a la estructura. Además se detectó un descenso de la superficie del suelo en 1.5 cm debido al aumento de tensiones efectivas mientras se dejo secar el suelo en la segunda experiencia. Esto produjo un aumento en la densidad en el suelo, que se traduce en la obtención de frecuencias distintas a las obtenidas durante el ensayo. Por estas razones se repitieron los ensayos cambiando el procedimiento a mediciones ambientales y se aumento la densidad seca del suelo con el fin de evitar una alteración en la interacción del suelo con la estructura en este tipo de ensayos.

CAPITULO V

DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo de título se analizó el efecto del contenido de humedad del suelo de fundación en la frecuencia natural de una estructura a escala. El interés de realizar este estudio nació a raíz de los cambios observados en la frecuencia natural de la biblioteca Millikan en Estados Unidos y del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción, que coincidieron con la ocurrencia de fuertes lluvias.

Para desarrollar este estudio se construyó un modelo a escala reducida de una estructura de un grado de libertad con un periodo de oscilación cercano a un segundo. Esta estructura, que tenía una altura de 35 cm, fue fundada en un suelo areno-limoso. El suelo utilizado tenía un tamaño de partículas limitado a 4.75 mm (malla #4). El contenido de humedad del suelo se midió en tres distintas profundidades utilizando sensores de humedad. Finalmente, para obtener la frecuencia natural de la estructura se implementaron dos procedimientos:

- El primer procedimiento se realizó mediante desplazamiento controlado, y se utilizó el acelerómetro Kistler modelo 8310A2. El suelo utilizado se colocó a una densidad seca de $1.44 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$, que corresponde al 70% del Proctor modificado. Se efectuó un desplazamiento lateral del tope de la estructura en 1.5 cm y luego se dejó oscilar libremente. El análisis de resultados fue hecho con el método de Ibrahim para el dominio del tiempo.
- El segundo procedimiento se realizó mediante mediciones ambientales, que fueron medidas con un acelerómetro EPISensor modelo FBA ES-U2. Con este sensor se registraron microvibraciones de la estructura. El suelo utilizado tenía una densidad seca de $1.65 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$, que corresponde al 80% del Proctor modificado. El análisis de resultados se efectuó con el método de densidad de espectro de potencia (PSD).

Durante la realización del ensayo con desplazamiento controlado se observó que la frecuencia natural de la estructura tenía una variación que duraba aproximadamente 5 horas después de haber agregado agua al modelo. Para capturar esta variación era necesario realizar el

desplazamiento de la estructura y el registro de datos de manera muy frecuente. De manera de no alterar el suelo adyacente a la fundación se llevaron a cabo estos ensayos cada dos horas a excepción de las noches y fin de semanas donde no se podía realizar registros. A pesar de todo, estos reiterados desplazamientos terminaron afectando la interacción entre el suelo y la estructura, lo que se reflejó en un cambio en la frecuencia natural cerca del final del ensayo. Debido a este efecto en la interacción suelo-estructura y la necesidad de realizar mediciones de manera frecuente, incluso durante la noche y los fines de semana, se tomó la decisión de llevar a cabo otro ensayo, pero utilizando esta vez el segundo procedimiento. En este ensayo se optó por aumentar la densidad del suelo, debido a que en el primer ensayo se produjo una densificación del suelo debido al incremento de tensión efectiva producto de la capilaridad.

Las principales ventajas del procedimiento mediante mediciones ambientales son la posibilidad de monitorear en forma continua la frecuencia natural y que no es necesario el desplazamiento de la estructura. Esto permitió observar de forma más precisa el comportamiento de la estructura en el tiempo. El problema principal que se presentó al utilizar este procedimiento es la baja sensibilidad de la estructura ante vibraciones externas, dificultando la obtención de la frecuencia en determinados momentos del día.

Los resultados de ambos procedimientos muestran que los cambios en el contenido de humedad del suelo si afectan la frecuencia natural de la estructura. Cuando se agregó agua por primera vez se observó un aumento de la frecuencia de la estructura de un 0.4%, en el caso de desplazamiento controlado, y de un 1.8% en mediciones ambientales. Esto ocurre por la rigidización del suelo generada por el efecto de la capilaridad. Sin embargo en las ocasiones siguientes en que se agregó agua y el contenido de humedad del suelo aumentó, fue posible apreciar una disminución de la frecuencia de hasta un 1.25% en el ensayo de desplazamiento controlado, y de hasta un 1.65% en el ensayo de mediciones ambientales. Esta disminución de la frecuencia natural, que ocurrió cuando el grado de saturación del suelo en los primeros 10 cm de profundidad sobrepasó un valor entre el 40% y 45%, se debió a la reducción de las tensiones efectivas del suelo por la disminución del efecto de la capilaridad.

Si bien es cierto que la magnitud de la variación de la frecuencia natural es distinta en ambos procedimientos, la dirección de la variación es la misma, lo que muestra una tendencia

clara del comportamiento de la frecuencia natural frente a variaciones en el contenido de humedad. En el ensayo de desplazamiento controlado la frecuencia natural se obtuvo en forma discreta, por lo que es muy probable que no se haya registrado la máxima variación en la frecuencia.

Los resultados obtenidos en este trabajo son similares a los de la bibliografía analizada, en donde se observó una variación de la frecuencia natural con el aumento del contenido de humedad en el suelo. El modelo a escala y el edificio de la Cámara Chilena de la Construcción presentan una magnitud de la variación parecidos. Sin embargo en el edificio de la Cámara Chilena de la Construcción y en la biblioteca Millikan la frecuencia natural aumentó, mientras que en el modelo a escala disminuyó. Se cree que esta diferencia ocurre a causa de la naturaleza del suelo, ya que las estructuras reales se encuentran en depósitos de gravas mezcladas con arena, mientras que la estructura a escala fue fundada en un suelo granular con tamaños de partículas pequeñas. Por otra parte, en las estructuras reales la variación de la frecuencia natural tiene una duración de días, mientras que en el modelo dicha variación ocurre durante algunas horas. Se cree que el efecto de la escala del modelo incide en esta diferencia, por cuanto la distancia que debe recorrer el frente de agua para llegar al sello de fundación es mucho mayor en el caso de las estructuras reales.

La frecuencia teórica de la estructura fundada en una base rígida es de 1.12 Hz, mientras que la frecuencia obtenida en forma experimental es de 0.99 Hz. Por otra parte, cuando la estructura del modelo fue emplazada en suelo seco se obtuvo una frecuencia natural de 0.927Hz, en el caso de desplazamiento controlado, y de 1.02Hz, en medición ambiental. La razón de la primera diferencia radica en la aparición de una fisura localizada en una de las uniones entre la fundación y los pilares de la estructura, una vez que los ensayos concluyeron. Por este motivo, este valor será excluido de los análisis posteriores. La ubicación de la fisura añadió flexibilidad a la estructura, disminuyendo su frecuencia. La segunda diferencia, se debió a las distintas densidades de los suelos utilizados en los procedimientos. La mayor densidad tiende a rigidizar el modelo aumentando su frecuencia, como es en el caso de mediciones ambientales. La diferencia entre las frecuencias de la estructura construida en una base rígida y en suelo seco, ocurre porque este último no permite un empotramiento perfecto de la estructura, generando un “rocking” en la fundación de ésta, que disminuye su frecuencia.

Las principales conclusiones y que responden a los objetivos propuestos en este trabajo de título son:

- Existe una clara correlación entre la frecuencia natural y el contenido de humedad en el suelo situado en los costados y en el sello de fundación, es decir, los cambios de humedad del suelo próximo a la fundación influyen en el comportamiento de la estructura.
- No se observa que un cambio en el contenido de humedad del suelo bajo el sello de fundación tengan un efecto en el comportamiento de la estructura.

Lo anterior fue logrado gracias a la construcción exitosa de un modelo a escala, que permitió monitorear las variaciones de la respuesta dinámica de la estructura a causa de los cambios en la humedad del suelo.

Si se desea repetir la experiencia o continuar la línea de investigación de este trabajo de título se recomienda la siguiente:

- Medir la correlación entre los cambios en el contenido de humedad del suelo utilizado y su rigidez, para establecer la incidencia que tienen los cambios de rigidez en la frecuencia natural de la estructura.
- Como complemento, se recomienda utilizar metodologías adicionales de procesamiento de datos, como el método de identificación de subespacio estocástico (SSI).
- Si se desea repetir la experiencia con ensayos de mediciones ambientales, se recomienda construir una estructura más receptiva a vibraciones externas, de forma tal que se capture de mejor forma el comportamiento de su frecuencia.

- Realizar el procedimiento de mediciones ambientales en distintos tipos de suelo, con el fin de comprobar si los resultados obtenidos en este trabajo se cumplen en otras condiciones de emplazamiento de la estructura.

CAPITULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MARULANDA JOHANNIO, THOMSON PETER, MARULANDA A. JOHANNIO. 2000 “Monitoreo de Salud Estructural”, Ingeniería y Competitividad Universidad del Valle, Volumen 2 Numero 2 Artículo 4: 40-46

- [2] CLINTON JF, BRADFORD SK HEATON TH, FAVELA J. 2006 “The observed wander of the natural frequencies in a structure”. Bull Seimol Soc Am; 96 (1): 237-57

- [3] LAZCANO CORVALÁN, PATRICIO. 2008 “Variación de lo Parámetros del Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción a partir de Registros Ambientales y Sísmicos”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Santiago, Chile

- [4] PERU-V “Monitoreo de Salud Estructural” [En línea] http://www.ingenieria.peru-v.com/documentos/Monitoreo_de_salud_estructural.pdf, Consultado 25 de Junio de 2009.

- [5] GLISIC B, INAUDI D. 2007. “Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring”. Introduction to Structural Health Monitoring: 1-10.

- [6] TODOROVSKA MI, AL RJOUB Y. 2006 “2D plain strain soil- structure model for a building supported by a circular foundation embedded in a poroelastic half-space”. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26: 1-14

- [7] TODOROVSKA MI, AL RJOUB Y. 2006 “Effects of rainfall on soil-structure system frequency: Examples based on poroelastic and a comparison with full-scale measurements”. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26:708-717

- [8] ICT INTERNATIONAL “MPKIT Manual de Operación” MP406 Sonda de Humedad de Suelos, Teoría de Operación 6-11

- [9] GASKIN G.J, MILLER J.D. 1996. "Measurement of Soil water content using a simplified impedance measuring technique. J Agric Engng Res 63: 153- 160.
- [10] FONTANILLO, ANGEL. 2006 "Caracterización del nivel de confort del vehículo mediante ensayos de confort en banco" Tesis de Magister Universidad Politécnica de Catalunya.
- [11] KINEMATRICS INC. 2005 "EPISensor Force Balance Accelerometer Model FBA ES-U" Document 301929 Revision A, Reference, Theory of Operation: 29-31
- [12] LAMBE T. WILLIAM, WHITMAN ROBERT. 1972 "Mecánica de Suelos". Características de los conjuntos de partículas: 41-51
- [13] LORCA NORAMBUENA, NELSON. 2004 "Desarrollo de un modelo analítico para la identificación de las propiedades dinámicas de las Estructuras, mediante pruebas de impacto controlado". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- [14] NUÑEZ TOMAS. 2009 "Variación debido a cambios de Masa y Rigidez de las Propiedades Modales de un Edificio en Proceso Constructivo. Edificio Titanium La Portada" Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile y Magister en Ingeniería Sísmica. Santiago, Chile
- [15] ASTM D 422-63.2002: "Standard Test Method for Particle – Size Analysis of Soils."
- [16] ASTM D 1557-02: "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lcf/ft³ (2,700 kN-m/m³))"
- [17] ASTM D 854 – 06e1 "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer"

ANEXOS

CODIGOS MATLAB

ANEXO A: CODIGOS IBRAHIM

CODIGO 1:

```
%CODIGO QUE INTRODUCE DATOS PARA PROCESAR IBRAHIM2
function []=frec_ibrahim(nom_archi)
close all;
load (nom_archi);
humedad(nom_archi)
acel=A(:,4);
acel=detrend(acel);
Fs=200;
ini=10*Fs;
iret=Fs/2;
nvent=80*Fs;
impri=1;
name='ensayo01';
limitemin=[];
porc=[];
ngdlimp=1;
[fib,betaib,phiib,ngdlred]=Ibrahim2(acel,Fs,ini,iret,nvent,impri,name,limitemin,porc,ngdlimp)
```

CODIGO 2:

```
function
[fib,betaib,phiib,ngdlred]=Ibrahim2(x,Fs,ini,iret,nvent,impri,name,limitemin,porc,ngdlimp)
%[fib,betaib,phiib,ngdlred]=ibrahim(x,Fs,ini,iret,nvent,impri,name,limitemin,n,porc,ngdlimp)
%Identifica frecuencias, amortiguamiento y formas modales, segun el metodo de Ibrahim & Mikulcik
%x:          Matriz de datos obtenidos del ensayo
%Fs:         Frecuencia de muestreo
%ini:        Salta un numero de puntos desde el inicio de la medicion
[def=1*Fs]
%            (se recomienda: seg*Fs)
%iret:       Numero de adelantos en muestras en fila = numero de vent de analisis [def=Fs/2]
%nvent:      Tamaño de ventana de analisis (columnas) [def=3*Fs]
%limitemin: Porcentaje limite minimo de diferencia entre la razon de SV normalizados consecutivos, para definir el ngdl [def=5%]
%            SI ES VACIO, ELECCION DE GRADOS DE LIBERTAD EFECTIVO POR ANALISIS GRAFICO
%porc:       Porcentaje minimo de valor de ultimo SV, con respecto al mayor, ambos normalizados, para definir el ngdl [def=0.1%].
%            SI ES VACIO, ELECCION DE GRADOS DE LIBERTAD EFECTIVO POR ANALISIS GRAFICO
%ngdlimp:    es el numero de GDL impuestos de salida (independinte de utilizar mas valores singulares. (def:GDL dado por condiciones)
```

```

%UTILIZA: "linea", "plotfs", "Modoord", "Modonorm", "Modonormord".
%Nelson Lorca 21-06-04, rbk 29-01-04,16-06-04, 08-10-2004

if nargin < 3 | isempty(ini)      %si no se asigna valor de ini, salto desde el
inicio de la                      %medicion igual a 1*Fs
    ini=1*Fs;
end

if nargin < 4 | isempty(iret)    %si no se asigna valor de iret, se asumen 50
adelantos en                      %muestras en fila
    iret=50;
end

if nargin < 5 | isempty(nvent)   %si no se asigna valor de nvent,
nvent=Fs/2;                       %se asumen Fs/2 ventanas de analisis
end

if nargin < 6 | isempty(impri)
    impri=0;
end

if nargin < 7 | isempty(name)
    name='';
end

% if nargin < 8
%     limitemin=5;
%     porc=0.1;
% end

x=columna(x);
%% presenta señal
% grafica rectangulo de analisis
xx=( [ini (ini + nvent) (ini + nvent) ini ini]-1)/Fs;
minimo = min(min(x));
maximo=max(max(x));
minimo=-max(abs([minimo,maximo]));
maximo=max(abs([minimo,maximo]));

yy = [minimo minimo maximo maximo minimo];
temp=sprintf(' %s IBRAHIM Fs=%g - Tamaño Ventana=%i ',name,Fs,nvent)
t=time(x(:,1),Fs);plot(t,x,xx,yy);xlabel('Tiempo
[sec]');ylabel('Amplitud');title(temp);
ylim([-1.2*max(abs([maximo,minimo])),max(1.2*abs([maximo,minimo]))]);
xlim([t(1),t(end)]);
grid on;zoom on

if impri
    temp=sprintf('Vent_Ibra_%s.jpg',name);
    impresion(temp);
    temp2=sprintf('Vent_Ibra_%s',name);
    saveas(gcf,temp2, 'fig');
end

%una linea de datos por sensor
x=linea(x);
[nx,mx]=size(x);

```

```

% Integer a partir de tiempo i*Fs
ini=round(ini);
iret=round(iret);
nvent=round(nvent);

%tamaño mínimo del registro
if ini+nvent > mx
    temp=sprintf('IBRAHIM: Datos temporales [%i] insuficientes, REQUERIDOS:
%i',mx,ini+nvent+iret);
    error(temp)
end

% Genera la matriz de respuesta impulsiva h,
h=zeros((iret)*nx,nvent);      %matriz original
h2=zeros((iret)*nx,nvent);     %matriz desplazada en un intervalo de tiempo

% Desde Inicio. En Memoria k=nvent y i=iret
for j=0:(iret-1)
    h((nx*j)+1:nx*(j+1),1:nvent-iret)=x(:,ini+j:ini+j+nvent-iret-1);    %Ec.
(2.44)
    %construye la matriz h(t) ("h")
end

%Desde inicio + UN PASO
for j=0:(iret-1)
    h2((nx*j)+1:nx*(j+1),1:nvent-iret)=x(:,ini+j+1:ini+j+nvent-iret-1+1);
%Ec. (2.45)
    %construye la matriz h(t+delta t) ("h2")
end

%Descomposicion de valores singulares (SVD)
[u,s,v] = svd(h*h');          %Utiliza SVD para obtener matrices inversas, Ec.
(2.58)
diags=diag(s);

svnorm=(1/s(1,1))*diag(s);    %normaliza valores singulares (SV)

%Calculo de suma acumulada de los SV anteriores
%a la porcion (porc) definida
acumulado=0;
cont=0;
if ~isempty(porc)
    for j=1:length(svnorm)-1
        if svnorm(j) > porc/100
            acumulado=acumulado+svnorm(j,1);
            cont=cont+1;
        else
            break
        end
    end
else
    cont=length(svnorm);
end
end

```

```

%ELECCION DE GRADOS DE LIBERTAD REDUCIDOS POR PANTALLA O AUTOMATICO
if isempty(limitemin) | isempty(porc)

    %grafico de barras de valores de SV, semilogaritmico de SV y SV acumulados
    figure;bar(svnorm);xlabel('N° SV');ylabel('valor SV normalizados');...
        title ('SV Normalizados');grid off;zoom on;

    figure;semilogy(1:length(svnorm),svnorm);xlabel('N° SV');...
        ylabel('valor SV normalizados');title ('Valor SV
(semilogaritmico)');grid off;zoom on;

    figure;plot(1:length(svnorm),cumsum(svnorm));grid on;zoom on;...
        xlabel('N° SV');ylabel('valor SV normalizados');...
        title ('Valor acumulado de SV');grid off;zoom on;

    %Ingreso de grados de libertad reducidos por pantalla
    entrada=input...
        ('IBRAHIM:Ingresar el numero de Valores Singulares a considerar,
\n(ENTER para default): ', 's');
    ngdlred=str2double(entrada);
    %Default de "limitemin" y "porc"
    if isempty(entrada) %si no se asigna valor de limitemin, se asume
porcentaje de
        limitemin=5; %variacion entre SV consecutivos de 5%
        porc=0.1; %si no se asigna valor de porc, se asume valor
menor
        %de SV de 0.001 (0.1% del primero normalizado)

        j=0;
        ngdlred=1; % grados de libertad reducidos
        for i=1:length(diags)-1
            % pasa si se cumple condicion I y condicion II
            % Condicion I. Pasan todos los valores que tengan una diferencia
            % porcentual, con el valor siguiente, mayor a
limitemin.
            % condicion II. Pasan todos los que sean igual o mayor a porc/100
            % (ejemplos mayores que 0.5% del maximo.)
            if svnorm(i)>(1+(limitemin/100))*svnorm(i+1) &
svnorm(i)>(porc/100)*svnorm(i)
                ngdlred=ngdlred+1;
                j=j+1;
            else
                break
            end
        end
    end

else

    % Obtiene el rango de la matriz
    j=0;
    ngdlred=1;
    % grados de libertad reducidos
    for i=1:length(diags)-1
        % pasa si se cumple condicion I y condicion II

```

```

% Condicion I. Pasan todos los valores que tengan una diferencia
%          porcentual, con el valor siguiente, mayor a limitemin.
% condicion II. Pasan todos los que sean igual o mayor a porc/100
%          (ejemplos mayores que 0.5% del maximo.)
if svnorm(i)>(1+(limitemin/100))*svnorm(i+1) &
svnorm(i)>(porc/100)*svnorm(1)
    ngdlred=ngdlred+1;
    j=j+1;
else
    break
end
end

%limites para realizar graficos
%   limitex=[0; length(svnorm)];
limitex=[0; min(2*cont,length(svnorm))];
limitey=[acumulado; acumulado];
limitey2=[porc/100; porc/100];

%grafico de barras de valores de SV, semilogaritmico de SV y SV acumulados
%hasta porcion limite.

figure;bar(1:min(2*cont,length(svnorm)),svnorm(1:min(2*cont,length(svnorm))));
xlabel('N° SV');ylabel('SV normalizado');...
    title(['Valores Singulares, ',name,', Retardo:',num2str(iret),',
Orden def:',num2str(ngdlred)]);
    hold on;plot(limitex,limitey2,'r');grid off;zoom on;
xlim([0,min(2*cont,length(svnorm))]);
if impri
    impresion(['SV_',num2str(iret),'.jpg'])
end

figure;semilogy(1:length(svnorm),svnorm,limitex,limitey2);xlabel('N°
SV');...
    ylabel('valor SV normalizados');title('Valor SV y linea de porcion
limite');grid off;zoom on;

figure;plot(1:min(2*cont,length(svnorm)),cumsum(svnorm(1:min(2*cont,length(svnorm)))),limitex,limitey);grid on;zoom on;...
    xlabel('N° SV');ylabel('valor SV normalizados');...
    title('Valor acumulado de SV y linea de porcion limite');grid
off;zoom on;

end

ngdlred=floor(ngdlred/2);

% reduccion de las matrices de descomposicion, Ec. (2.62)
u=u(:,1:2*ngdlred);
s=s(1:2*ngdlred,1:2*ngdlred);
v=v(:,1:2*ngdlred);

ss=diag(s);

```

```

h2xhinv=(h2*h')*(v*(diag(1./ss))*u'); %Matriz inversa se obtiene de invertir
la diagonal
%de la descomposicion, Ec. (2.63)

if nargin <10 | isempty(ngdlimp)
    ngdlimp=ngdlred;
end

%Obtencion de propiedades dinamicas
opts.disp=0; % par que no muestre iteracion en ibrahim

[vect,val]=eigs(h2xhinv,2*ngdlimp,'LR',opts); %Obtencion de valores y
vectores propios, Ec. (2.50)
val=diag(val);
[nv,mv]=size(val);
r=real(val);
rr=r;
im=imag(val)';

[r,im]=modoord(r,im); %Ordena en forma ascendente las partes
reales e imaginarias de
%los valores propios segun la parte real
[rr,vect]=modoord(rr,vect); %Ordena en forma ascendente las partes
reales de los valores
%propios y los vectores propios

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%5

wib=Fs*atan(im(:)./r(:)); %Se obtiene frecuencias a partir
de los valores propios segun
%formula de Ibrahim (1/dt=Fs), Ec. (2.68)

betaib=(abs(0.5*Fs*log(r(:).^2+im(:).^2)./sqrt((0.5*Fs*log(r(:).^2+im(:).^2)).
^2+wib(:).^2)))';%amortiguamiento
%betaib=a/raiz(a^2+b^2), Ec. (2.69)

aux1=[]; % solo consideramos modos que tengan pares conjugados

for i=1:length(wib)-1
    if abs(wib(i)+wib(i+1))<0.01*wib(i) & abs(betaib(i)-
betaib(i+1))<0.01*betaib(i)
        aux1=[aux1,i];
    end
end

clear wib betaib

```

```

%
% im=im(1:2:end)'; %Se escogen partes reales e imaginarias, asi
como los
% r=r(1:2:end); %vectores propios, de manera alternada,
debido a que los
%
% %%% MALO corregido rbk 8-11-2004
% %phiib=vect(1:ngdlred,1:2:end); %originales incluyen valores
conjugados
% phiib=vect(:,1:2:end); %originales incluyen valores conjugados

im=im(aux1)'; %Se escogen partes reales e imaginarias, asi como
los
r=r(aux1); %vectores propios, de manera alternada, debido a
que los

%%%% MALO corregido rbk 8-11-2004
%phiib=vect(1:ngdlred,1:2:end); %originales incluyen valores
conjugados
phiib=vect(:,aux1); %originales incluyen valores conjugados

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

wib=Fs*atan(im./r); %Se obtiene frecuencias a partir de los
valores propios segun
%formula de Ibrahim (1/dt=Fs), Ec. (2.68)

betaib=(abs(0.5*Fs*log(r.^2+im.^2)./sqrt((0.5*Fs*log(r.^2+im.^2)).^2+wib.^2)))
'; %amortiguamiento
%betaib=a/raiz(a^2+b^2), Ec. (2.69)
[wib2,betaib]=modoord(abs(wib),betaib);
betaib=betaib(:);
[wib,phiib]=modonormord(abs(wib),phiib); %Normaliza y ordena
frecuencias y formas modales
%en forma descendente
[mw]=length(wib);
j=1;
c=0;
for j=1:mw %Elimina las frecuencias nulas y sus formas
modales asociadas
if wib(1,1)==0
wib=wib(2:end,1);
phiib=phiib(2:end,2:end);
betaib=betaib(2:end,1);
c=c+1;
[wib,phiib]=modonormord(abs(wib),phiib);
end
j=j+1;
end
fib=wib./(2*pi);

```

```

phiib=phiib(1:size(x,1),:); % las primeras filas corresponden a C x fi
ngdlred=2*ngdlred;

```

ANEXO B: CODIGO PARA HUMEDAD

```

%SE OBTIENE CONTENIDO DE AGUA DADO CALIBRACION DE SENSORES
function [hum] = humedad1(A)

sensor1 = A(:,1);
sensor2 = A(:,2);
sensor3 = A(:,3);

P05 = mean(sensor1);
%Prof5 = 1.286*P05-0.192;
P10 = mean(sensor2);
%Prof10 = 1.190*P10-0.139;
P20 = mean(sensor3);
%Prof20 = 1.149*P20-0.136;

hum = [P05 P10 P20];

```

ANEXO C: CODIGOS PSD

CODIGO 1: AUTOMATICO

```

%REALIZA PROCESO DE DATOS EN FORMA AUTOMATICA

function [] = automatico

archivo = dir('*.mat');
res2 = [0,0,0,0,0];
listarchi = [];
Fs = 200;
duracion = 60;

for i = 1:length(archivo);
    reg = archivo(i).name;
    disp(reg)

    load(reg);
    largoregistro = length(A)/(Fs*60);% largo registro en minutos

    for j = 0:duracion:largoregistro
        if largoregistro - j < duracion %Se realizo cambio en el if fecha
19-05-2009
            if largoregistro - j <= 0
                disp('Fin de Registro')
            end
        end
    end
end

```

```

        else disp('Menor Duracion')
            a = A(j*Fs*60+1:(largoregistro)*Fs*60,:);
            disp([num2str(j/duracion+1) ' de '
num2str(floor(largoregistro/duracion)) ])
            name = ['Registro ' reg ' Hora ' num2str(j/60) ];
            hum = humedad1(a);
            frec = psdGVV1c(a,Fs,name);
            time = j/60;
            % Obtener frecuencia estructura
            listarchi = [listarchi;reg]
            res1 = [time,hum(1),hum(2),hum(3),frec]
            res2 = [res2;time,hum(1),hum(2),hum(3),frec];
        end

        else a = A(j*Fs*60+1:(j+duracion)*Fs*60,:);
            disp([num2str(j/duracion+1) ' de '
num2str(floor(largoregistro/duracion)) ])

            name = ['Registro ' reg ' Hora ' num2str(j/60) ];
            hum = humedad1(a);
            frec = psdGVV1c(a,Fs,name);
            time = j/60;
            % Obtener frecuencia estructura
            listarchi = [listarchi;reg]
            res1 = [time,hum(1),hum(2),hum(3),frec]
            res2 = [res2;time,hum(1),hum(2),hum(3),frec];
        end
    end
    disp([reg '..' num2str(j) ' ... OK '])
end

save('Resultados', 'res2');
save('Listaarchivo', 'listarchi');
end

```

CODIGO 2: PSD

```

% PSD
function [frec] = psdGVV1c(A,Fs,name)

% function [f] = PSD(Y,Fs,nombre)

% Y      : Señal de registro
% Fs     : frecuencia de muestreo
% nombre: nombre grafico

close all
%home

% Datos iniciales -----
Tv = 40; % Tamaño ventana en [segundos]
TvRes = 40*Tv;
WINDOW = hanning(Tv*Fs);
NOVERLAP = Tv*Fs/2;
NFFT = TvRes*Fs; % multiples de Tv*Fs

```

```

% -----

Y = detrend(A(:,4));
nsensor = size(Y,2);

%--- Filtro
N = 4;
f1 = 0.2;
f2 = 25;
Yfilt = mfiltro(Y,Fs,N,f1,f2,[],[],0);

    Pyy = zeros(NFFT/2+1,nsensor);
    [Pyy, F] = pwelch(Yfilt,WINDOW,NOVERLAP,NFFT,Fs);
    frec = search(Pyy,1.00,0.15,Fs,NFFT);

    plot(F,Pyy);

    nombre = [name(11:18) ' Hora ' name(29:end)]; %Se cambio de posicion 19-
05-2009
    title(nombre);
    ylabel('PSD');
    xlabel('Frecuencia [Hz]');
    hold off
    grid;
    %nombre estaba aqui.
    saveas(gcf,nombre,'fig');
    %close(gcf)
End

% OBTIENE FRECUENCIA MAXIMA EN RANGO OTORGADO
function f = search(Pyy,fini,HZ,Fs,NFFT)

Hz = Hz*NFFT/Fs;
nfini = length(fin);
nsensor = size(Pyy,2);
fout = zeros(nfini,nsensor);
Pmax = zeros(nfini,nsensor);
f = zeros(1,nfini);

for i = 1 : nfini

for j = 1 : nsensor

    k = fini(i)*NFFT/Fs;
    [Pmax(i,j) fout(i,j)] = max(Pyy(k-Hz:k+Hz,j));
    fout(i,j) = fout(i,j) + (k-Hz-2);
end
end

[Pm im] = max(Pmax,[],2);

```

```

for i = 1:nfini
    f(i) = fout(i,im(i))*Fs/NFFT;
end

end

```

CODIGO 3: PWELCH

```

function varargout = pwelch(x,varargin)
%PWELCH Power Spectral Density estimate via Welch's method.
% Pxx = PWELCH(X) returns the Power Spectral Density (PSD) estimate,
% Pxx, of a discrete-time signal vector X using Welch's averaged,
% modified periodogram method. By default, X is divided into eight
% sections with 50% overlap, each section is windowed with a Hamming
% window and eight modified periodograms are computed and averaged.
%
% If the length of X is such that it cannot be divided exactly into
% eight sections with 50% overlap, X will be truncated accordingly.
%
% Pxx is the distribution of power per unit frequency. For real signals,
% PWELCH returns the one-sided PSD by default; for complex signals, it
% returns the two-sided PSD. Note that a one-sided PSD contains the
% total power of the input signal.
%
% Note also that the default window (Hamming) has a 42.5 dB sidelobe
% attenuation. This may mask spectral content below this value (relative
% to the peak spectral content). Choosing different windows will enable
% you to make tradeoffs between resolution (e.g., using a rectangular
% window) and sidelobe attenuation (e.g., using a Hann window). See
% WinTool for more details.
%
% Pxx = PWELCH(X,WINDOW), when WINDOW is a vector, divides X into
% overlapping sections of length equal to the length of WINDOW, and then
% windows each section with the vector specified in WINDOW. If WINDOW is
% an integer, X is divided into sections of length equal to that integer
% value, and a Hamming window of equal length is used. If the length of
% X is such that it cannot be divided exactly into integer number of
% sections with 50% overlap, X will be truncated accordingly. If WINDOW
% is omitted or specified as empty, a default window is used to obtain
% eight sections of X.
%
% Pxx = PWELCH(X,WINDOW,NOVERLAP) uses NOVERLAP samples of overlap from
% section to section. NOVERLAP must be an integer smaller than the WINDOW
% if WINDOW is an integer. NOVERLAP must be an integer smaller than the
% length of WINDOW if WINDOW is a vector. If NOVERLAP is omitted or
% specified as empty, the default value is used to obtain a 50% overlap.
%
% [Pxx,W] = PWELCH(X,WINDOW,NOVERLAP,NFFT) specifies the number of FFT
% points used to calculate the PSD estimate. For real X, Pxx has length
% (NFFT/2+1) if NFFT is even, and (NFFT+1)/2 if NFFT is odd. For complex
% X, Pxx always has length NFFT. If NFFT is specified as empty, the
% default NFFT -the maximum of 256 or the next power of two
% greater than the length of each section of X- is used.
%
% Note that if NFFT is greater than the segment the data is zero-padded.
% If NFFT is less than the segment, the segment is "wrapped" (using
% DATAWRAP) to make the length equal to NFFT. This produces the correct

```

```

% FFT when NFFT < L, L being signal or segment length.
%
% W is the vector of normalized frequencies at which the PSD is
% estimated. W has units of rad/sample. For real signals, W spans the
% interval [0,Pi] when NFFT is even and [0,Pi) when NFFT is odd. For
% complex signals, W always spans the interval [0,2*Pi).
%
% [Pxx,W] = PWELCH(X,WINDOW,NOVERLAP,W) where W is a vector of
% normalized frequencies (with 2 or more elements) computes the
% PSD at those frequencies using the Goertzel algorithm. In this
% case a two sided PSD is returned. The specified frequencies in W are
% rounded to the nearest DFT bin commensurate with the signal's
% resolution.
%
% [Pxx,F] = PWELCH(X,WINDOW,NOVERLAP,NFFT,Fs) returns a PSD computed as
% a function of physical frequency (Hz). Fs is the sampling frequency
% specified in Hz. If Fs is empty, it defaults to 1 Hz.
%
% F is the vector of frequencies at which the PSD is estimated and has
% units of Hz. For real signals, F spans the interval [0,Fs/2] when NFFT
% is even and [0,Fs/2) when NFFT is odd. For complex signals, F always
% spans the interval [0,Fs).
%
% [Pxx,F] = PWELCH(X,WINDOW,NOVERLAP,F,Fs) where F is a vector of
% frequencies in Hz (with 2 or more elements) computes the PSD at
% those frequencies using the Goertzel algorithm. In this case a two
% sided PSD is returned. The specified frequencies in F are rounded to
% the nearest DFT bin commensurate with the signal's resolution.
%
% [...] = PWELCH(...,'twosided') returns a two-sided PSD of a real signal
% X. In this case, Pxx will have length NFFT and will be computed over
% the interval [0,2*Pi) if Fs is not specified and over the interval
% [0,Fs) if Fs is specified. Alternatively, the string 'twosided' can be
% replaced with the string 'onesided' for a real signal X. This would
% result in the default behavior. The string 'twosided' or 'onesided'
% may be placed in any position in the input argument list after NOVERLAP.
%
% PWELCH(...) with no output arguments by default plots the PSD
% estimate in dB per unit frequency in the current figure window.
%
% EXAMPLE:
%   Fs = 1000;   t = 0:1/Fs:.296;
%   x = cos(2*pi*t*200)+randn(size(t)); % A cosine of 200Hz plus noise
%   pwelch(x,[],[],[],Fs,'twosided'); % Uses default window, overlap &
NFFT.
%
% See also PERIODOGRAM, PCOV, PMCOV, PBURG, PYULEAR, PEIG, PMTM, PMUSIC,
% SPECTRUM, DSPDATA.
%
% Author(s): R. Losada
% Copyright 1988-2006 The MathWorks, Inc.
% $Revision: 1.28.4.10 $ $Date: 2007/06/14 05:23:07 $
%
% References:
% [1] Petre Stoica and Randolph Moses, Introduction To Spectral
% Analysis, Prentice-Hall, 1997, pg. 15
% [2] Monson Hayes, Statistical Digital Signal Processing and
% Modeling, John Wiley & Sons, 1996.

```

```
error(nargchk(1,7,nargin));
error(nargoutchk(0,3,nargout));

esttype = 'psd';
if nargin > 1 & ischar(varargin{end}) & strcmpi(varargin{end}, 'ms'), %#ok
    esttype = 'ms';
    varargin(end)=[];
end

% Possible outputs are:
%     Plot
%     Pxx
%     Pxx, freq
[varargout{1:nargout}] = welch(x,esttype,varargin{:});
```