

**EFFECTIVIDAD EN LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE POROS CON
EL USO DE TRANSDUCTOR (PPT) EN UN SUELO SATURADO BAJO
CONDICIONES DINÁMICAS**

JOSÉ RICARDO PRADA LARGO



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍASFÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

**EFFECTIVIDAD EN LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE POROS CON
EL USO DE TRANSDUCTOR (PPT) EN UN SUELO SATURADO BAJO
CONDICIONES DINÁMICAS**

JOSÉ RICARDO PRADA LARGO

**Trabajo de Grado Modalidad Investigación
Para optar al Título de Ingeniero Civil**

**Director:
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

**A mis padres Jorge y Marina, porque sin su apoyo, este
trabajo no sería una realidad.**

**A mi abuela María Luisa, porque desde la distancia
siempre estuve presente en sus oraciones.**

AGRADECIMIENTOS

Principalmente agradezco a mis padres, por permitirme vivir una de las mejores experiencias de mi vida, por ser el apoyo incondicional con el que siempre podré contar, y por enseñarme que el trabajo duro siempre tiene su recompensa.

Agradezco a la Universidad de Oklahoma, la cual me acogió durante esos maravillosos meses en los cuales crecí en miles de aspectos, a las personas que conocí allá y aportaron a mi vida. A Natalia Rubio, a Jessica Campario, Ai-ling Schoolderman y Tania Serrano, quienes fueron mi segundo hogar durante mi estancia en Norman.

Al Doctor Gerard Miller, por depositar un voto de confianza en mí para realizar esta primera investigación.

A Doctor Eduardo Castañeda, por aceptar ser mi director de proyecto y hacerle seguimiento en Colombia.

A Margarita Reyes y Sergio Botia, por ser el apoyo incondicional que siempre tendré a mi lado.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 17 |
| 2. OBJETIVO | 26 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL: | 26 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS: | 26 |
| 3. INSTRUMENTATION | 28 |
| 3.1 TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DE POROS | 28 |
| 3.2 CONTENEDOR | 29 |
| 3.3 MESA VIBRATORIA | 30 |
| 4. METODOLOGÍA | 32 |
| 4.1 EXPERIMENTACIÓN EN CONDICIONES SECAS | 33 |
| 4.2 EXPERIMENTACIÓN EN CONDICIONES SATURADAS | 33 |
| 4.3 EXPERIMENTACIÓN CON SUELO SATURADO | 34 |
| 5. ADQUISICIÓN DE DATOS | 38 |
| 6. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS | 40 |
| 7. CONCLUSIONES | 50 |
| 8. AVANCES | 52 |

| | |
|--------------|----|
| BIBLIOGRAFÍA | 53 |
| ANEXOS | 55 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Experimentos practicados en el laboratorio | 33 |
| Tabla 2. Presiones de poros máximas | 41 |
| Tabla 3. Presiones de poros mínimas | 42 |

-

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|------|
| Figura 1. Niigata, Japón 1964 | 17 |
| Figura 2. Transductores de presión de poros | 21 |
| Figura 3. Sistema de elementos finitos | 22 |
| Figura 4. Respuesta experimental y determinada por EF de la presión de poros. | 23 |
| Figura 5. Sección transversal del transductor | 28 |
| Figura 6. Strain Gauge Piezometer, modelo 52599, RST Instrumentation. | 29 |
| Figura 7. Sección Transversal del Contenedor | 30 |
| Figura 8. Mesa vibratoria APS Electro-Seis. | 31 |
| Figura 9. Mesa vibratoria APS de la experimentación. | 31 |
| Figura 11. Configuración total del transductor dentro del contenedor en la mesa vibratoria (válvula de saturación) | 36 |
| Figura 12. Transductor de presión de poros dentro del contenedor. | 36 |
| Figura 13. Control de frecuencia, control de amplitud y contenedor | 37 |
| Figura 14. Presión de poros en posición horizontal y condiciones secas | 43 |
| Figura 15. Presión de poros en posición vertical y condiciones secas | 43 |
| Figura 16. Presión de poros en posición vertical y condiciones saturadas | 44 |
| Figura 17. Presión de poros en posición horizontal y condiciones saturadas | 44 |
| Figura 18. Presión de poros en posición vertical e inmerso en suelo | 45 |
| Figura 19. Presión de poros en posición horizontal e inmerso en el suelo | 46 |
| Figura 20. Presión de Poros en Condiciones Secas en dirección Vertical y Horizontal. | 47 |
| Figura 21. Presión de Poros en Condiciones Saturadas en dirección Vertical y Horizontal. | 47 |

Figura 22. Presión de Poros inmerso Suelo en dirección Vertical y Horizontal. 48

LISTA ANEXOS

| | Pág. |
|--|------|
| ANEXO A. REPRESENTACIÓN GRÁFICA EN DIRECCIÓN HORIZONTAL, VARIANDO FRECUENCIA Y AMPLITUD | 55 |
| ANEXO B. REPRESENTACIÓN GRÁFICA EN DIRECCIÓN VERTICAL, VARIANDO FRECUENCIA Y AMPLITUD | 62 |

RESUMEN

TITULO: EFECTIVIDAD EN LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE POROS CON EL USO DE TRANSDUCTOR (PPT) EN UN SUELO SATURADO BAJO CONDICIONES DINÁMICAS*

AUTOR: JOSE RICARDO PRADA LARGO**

PALABRAS CLAVES:

Efectividad de la presión de poros, transductor, presión de poros, sismos, condiciones dinámicas, mesa sísmica, frecuencia, amplitud.

DESCRIPCION:

Un estudio preliminar sobre la efectividad en la medición de la presión de poros en condiciones saturadas y dinámicas es presentado en este trabajo de investigación. Una serie de experimentos son llevados a cabo para entender el comportamiento del uso de un transductor de presión de poros utilizados en la instrumentación en la medición de la presión de poros de un suelo bajo condiciones dinámicas y saturadas. El primer experimento busca entender el comportamiento del transductor en condiciones aisladas, permitiendo así identificar la influencia de los diferentes materiales que componen el transductor en la respuesta del mismo. Un segundo experimento es ejecutado bajo condiciones saturadas, el espacio entre la piedra porosa y el diafragma del transductor es saturado, hallando la incidencia del agua en la respuesta del transductor. Finalmente una tercera prueba es generada bajo unas condiciones específicas, el contenedor diseñado para estas pruebas es llenado con arena Ottawa, seguidamente de una saturación de agua basándose en la norma AASTHO T99-01, compactación de suelo. Estas pruebas permiten analizar la respuesta del aparato inmerso en un determinado suelo. El desarrollo de cada uno de estos experimentos permite identificar los diferentes factores, (frecuencia, amplitud, posición el transductor y tiempo) que alteran la verdadera respuesta del transductor, determinando la auténtica efectividad en la medición de la presión de poros.

* Proyecto de Grado

** Facultad: Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela: Ingeniería civil. Director: Eduardo A. Castañeda.

ABSTRACT

TITLE: EFFECTIVENESS OF PORE WATER PRESSURE MEASUREMENTS USING A PORE WATER TRANSDUCER (PPT) IN A SATURATED SOIL UNDER DYNAMIC CONDITIONS*

AUTHOR: JOSE RICARDO PRADA LARGO**

KEY WORDS:

Effectiveness of pore water pressure, pore water pressure transducer, pore pressure, earthquake, dynamic conditions, seismic table, frequency, amplitude.

DESCRIPCION:

A preliminary study on the effectiveness of pore pressure measurements under saturated and dynamics conditions is presented in this research. A series of experiments are conducted to understand the pore water pressure transducer behavior used in instrumentation of a soil pore water pressure under dynamic and saturated conditions. Three major experiments are performed in this work; the first experiment carried out tries to understand the behavior of the transducer in isolated conditions, identifying the influence of different transducer materials response in the system. A second experiment is performed under saturated conditions; the gap between the pore stone and the diaphragm of the pore water transducer is filled with water, finding the incidence of the fluid in the transducer response. Finally a third test is generated under specific conditions, a container developed for this experiments is filled with Ottawa sand and then this container is saturated with water based on AASTHO T99-01 method, soil consolidation, this process analyzes the response of the device immersed in a soil. The developments of each of these experiments allows identifying how different factors (frequency, amplitude, position of the transducer and time) affect the true transducer response, and allow, at the same time, to determine the real effectiveness in pore pressure measurements.

* Proyecto de Grado

** Facultad: Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela: Ingeniería civil. Director: Eduardo A. Castañeda.

INTRODUCCIÓN

La licuefacción, debido a los movimientos sísmicos, en diferentes tipos de suelos se ha convertido en un tema importante en los últimos años y diversos estudios y pruebas han sido llevados a cabo con el fin de analizar este problema. El daño generado por la licuefacción empezó a ser remarcable e importante a partir de los años sesenta y setenta con los sismos de Alaska y Niigata, desde aquellos tiempos muchos investigadores han devotado su vida y trabajo a entender los aspectos más importantes de este fenómeno, todo esto con el fin de reducir el efecto negativo generado dentro de dicho evento.

Mientras muchos aspectos del proceso de licuefacción han sido bien entendidos, pocos estudios de investigación se han enfocado en analizar el comportamiento y desempeño de los aparatos de medición, como lo es el transductor de presión de poros, el cual ha sido utilizado en el análisis de estos procesos. Es por esto que un estudio dirigido hacia la instrumentación y eficacia en la medición de la presión de poros es necesario para determinar la veracidad de los datos obtenidos dentro de tales eventos.

El propósito de esta investigación está basado en el análisis preliminar de la efectividad en la medición de presión de poros a través de un transductor (PPT, Pore Pressure Transducer) bajo condiciones sísmicas en un suelo saturado. Diferentes investigaciones han demostrado que la respuesta de este aparato depende del comportamiento y correlación de cada uno de sus componentes con el suelo en contacto. Con el fin de alcanzar este objetivo, una serie de experimentos fueron realizados a partir del uso de dos herramientas principales, la primera de ellas es el transductor de presión de poros, el cual permitió la adquisición de datos requeridos para este estudio y la segunda herramienta fue

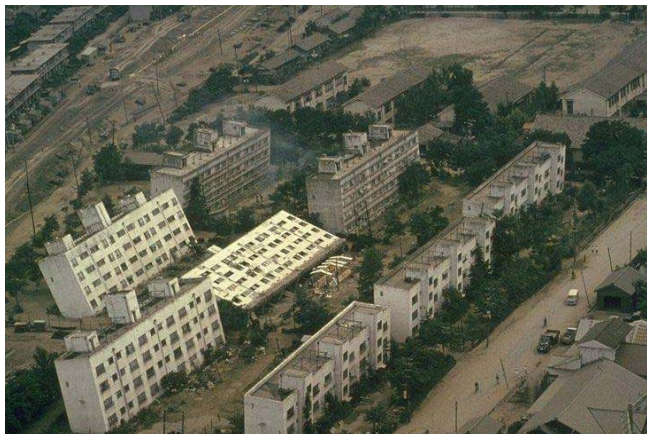
una mesa vibratoria, que permitió simular las condiciones sísmicas a las cuales el transductor podría encontrarse. Además de estos elementos, un contenedor fue diseñado y construido para permitir la interacción de estos dos dispositivos.

1. MARCO TEÓRICO

Durante los sismos, el movimiento del terreno puede causar una pérdida de la firmeza o rigidez del suelo, dando como resultado el desplome de edificaciones, deslizamientos de tierra, daños en las tuberías, entre otros. El proceso que conduce a esta pérdida de firmeza o rigidez es conocido como licuefacción del suelo, este fenómeno está principalmente relacionado con suelos saturados poco cohesivos. El término licuefacción o licuación, abarca todos los fenómenos donde se dan excesivas deformaciones o movimientos como resultado de repetidas o transitorias perturbaciones de suelos.

Gracias a las enormes magnitudes de los efectos destructivos de la licuefacción durante el terremoto de Niigata, Japón en 1964, surgió la necesidad de darle explicación a este paradigma. Desde entonces se ha avanzado a pasos agigantados para entender el fenómeno y sus consecuencias, analizando y evaluando el potencial de licuación de un lugar además de desarrollar nuevas tecnologías que mitigan las acciones destructoras de un terremoto.

Figura 1. Niigata, Japón 1964



Fuente:http://earthquake.usgs.gov/regional/world/events/1964_06_16.php

Los piezómetros fueron los primeros instrumentos de medición de presión de poros en los suelos, sin embargo, estos aparatos no permitían una adquisición de datos de una forma eficiente, su tiempo de respuesta era muy lento y la veracidad de los datos no era totalmente cierta. Por esto los piezómetros aunque permitían registrar la variación de la presión de poros en un sitio determinado, no suplían adecuadamente las necesidades a las cuales los investigadores estaban enfocados.

La necesidad de crear nuevos y eficientes aparatos en la medición de la presión de poros abrió un nuevo campo para los geotecnistas e ingenieros. En los años 50's se dieron las primeras apariciones de elementos capaces de tomar datos en campo de una forma más rápida y eficiente. Estos aparatos, en comparación con los piezómetros, los cuales tardaban varios días para obtener una serie de datos, permitían la adquisición de datos en segundos, que posteriormente eran compilados y guardados en una base de datos. La palabra transductor fue la utilizada para designar dichos aparatos, debido a su capacidad de transformar un determinado tipo de esfuerzo de entrada (presión de de poros del agua) en una señal eléctrica de forma cuantitativa. Los transductores están compuestos básicamente de tres partes importantes. La primera, es un elemento poroso el cual permite el paso del agua dentro del aparato restringiendo el paso de cualquier tipo de partícula ajena; la segunda parte es un elemento llamado diafragma, este elemento es altamente sensible al movimiento y la presión generada por el agua, y es a partir del diafragma y su deformación, que el transductor puede generar señales de presión dentro del suelo. Por último, existe un tercer elemento el cual es una cavidad entre el elemento poroso y el diafragma, este al ser totalmente saturado permite una correcta toma de datos debido a la incompresibilidad de líquido inmerso en ella. Actualmente la configuración de estos aparatos sigue siendo la misma y a pesar de la innovación tecnológica, estos tres elementos han perdurado a través de la evolución de los transductores.

En 1951, Hvorslev analizó el tiempo de respuesta y la permeabilidad del suelo a partir del uso de piezómetros, basado en la premisa de que, la presión de poros medida por el aparato es raramente igual a la presión original o real del suelo. Un flujo de agua desde el suelo hacia el piezómetro es el factor afectante en estas mediciones y solo hasta que la diferencia de presiones entre estos dos medios es eliminada, el aparato alcanzara una adquisición de datos adecuada. Por otra parte, el tiempo en que el aparato alcanza el equilibrio depende del tipo y dimensiones del sistema y la forma de instalación; a su vez este lapso de tiempo es inversamente proporcional a la permeabilidad del suelo, indicando así que en suelos poco permeables el tiempo de equilibrio es más largo que en suelos altamente permeables.

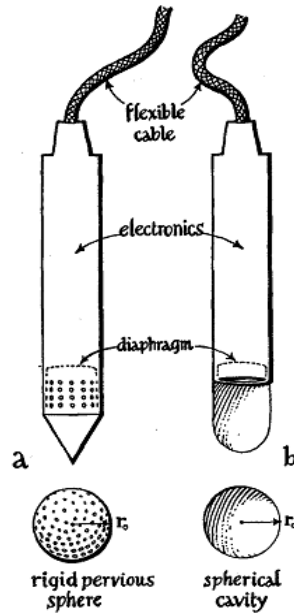
Una estimación preliminar del tiempo de respuesta es necesaria para diseñar y seleccionar el tipo de instalación, permitiendo así determinar una adecuada presión de poros para unas condiciones dadas. Sin embargo, a pesar que Hvorslev asumió una isotropía del suelo alrededor del piezómetro y además que este era saturado e infinito en extensión, sin ningún tipo de consolidación o expansión, Penman (1960) demostró años después a través de pruebas en el laboratorio con suelos arcillosos que, bajo las condiciones y restricciones mencionadas anteriormente, el tiempo de respuesta en la presión de poros no era como se esperaba, y por tanto el enfoque realizado por Hvorslev no era el apropiado ni aplicable para determinar la presión de poros en los diferentes tipos de suelos.

En 1960 Penman presentó un artículo, en la conferencia organizada por la Sociedad Nacional Británica, en donde estudió la respuesta de diferentes tipos de piezómetros y transductores. Estos aparatos, caracterizados por sus diferencias de forma y materiales, permitieron demostrar la variación en la medición de la presión de poros de estos elementos debido a la interacción entre el suelo y el instrumento.

Nuevas tecnologías permitieron el desarrollo de mejores aparatos de medición con menor tamaño y menor tiempo de respuesta. Sin embargo, gracias a complejidad de los diafragmas y a la resistencia del flujo del agua en el suelo, la efectividad en la respuesta de los transductores seguía siendo un enigma. Un tipo de transductor resultado del análisis del movimiento del agua y la deformación del suelo permitió obtener una reducción en el tiempo de respuesta hasta segundos y fracciones de segundo.

De Josselin De Jong realizó un estudio sobre estos últimos tipos de medidores de presión, los cuales consistían en instrumentos cilíndricos alrededor de los 20 centímetros de longitud y 3.6 centímetros de diámetro. En su estudio, dos tipos de transductores fueron analizados. En el primero, el diafragma está en contacto con el volumen de agua encerrado por una cámara rígida, agujeros alrededor de las paredes del transductor permitían el contacto del agua del suelo con el agua en el sistema. Por otra parte en el segundo caso, el diafragma está en contacto con un volumen de agua que llena una cavidad en el suelo, la conexión entre el volumen de agua y el agua generada por la presión en el suelo está en contacto directo.

Figura 2. Transductores de presión de poros



Fuente: De Jong, G. De Josselin, Consolidation Around Pore Pressure Meters. Applied Physics, Volume 24, Number 7, July 1953. Pag. 923.

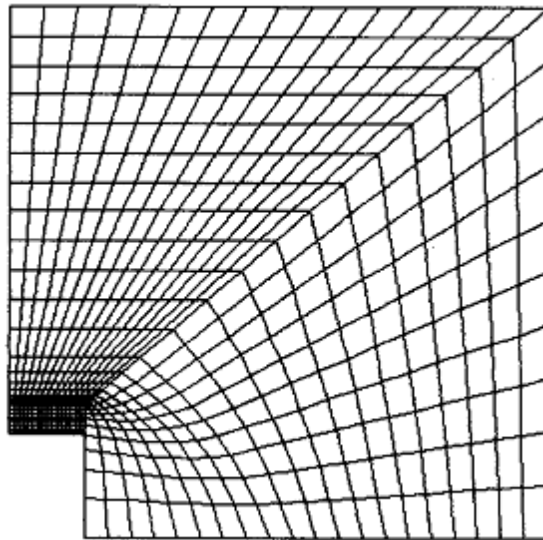
A partir de estas configuraciones y basado en la teoría de consolidación tridimensional de Biot, de Josselin De Jong determino y estableció una solución analítica para la respuesta de la presión de poros. En este análisis se trato la influencia de las condiciones de cargas armónicas simples del suelo alrededor del instrumento a partir de un test triaxial, en donde se usaron diferentes tipos de frecuencias.

Por otra parte Gibson usando la teoría de consolidación de Terzaghi relacionó la compresibilidad, permeabilidad y tiempo de respuesta del suelo, su enfoque fue dirigido a definir lo parámetros que afectan las mediciones en la presión de poros. Las investigaciones generadas por Gibson definieron una expresión matemática para el tiempo de respuesta de la presión de poros en condiciones no drenadas de un test triaxial en arcillas.

Los resultados obtenidos tanto por Gibson como De Josselin De Jong, con sus diferentes enfoques fueron exactamente los mismos, ratificando así que las premisas sobre un suelo incompresible debían ser reconsideradas.

En 1988, Kutter publico un artículo en el cual mediante un análisis de elementos finitos y pruebas en el laboratorio demuestra que la respuesta de un transductor de presión de poros típico es altamente afectada por las no uniformidades de la presión de poros alrededor del aparato. En este análisis, el sistema suelo-transductor fue modelado como un problema simétrico con propiedades del material lineal y elástico. Aunque es bien sabido que el suelo no es un material elástico, existen numerosas aplicaciones en las cuales es conveniente asumir un comportamiento elástico. La configuración del sistema de elementos finitos es mostrada en la Fig. 3.

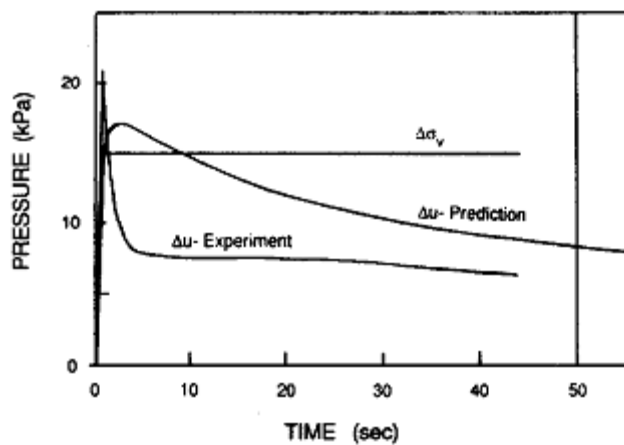
Figura 3. Sistema de elementos finitos



Fuente: Kutter, B.L., Sathialingam, N., and Herrmann, L.R. "Effects of Arching on Response Time of Miniature Pore Pressure Transducer in Clay", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 13, No. 3, September 1990, Pag 167.

Este análisis permitió predecir la respuesta del transductor en diferentes condiciones, variando la permeabilidad, el modulo de elasticidad del suelo y del diafragma. Por otra parte las pruebas de laboratorio del transductor en una arcilla dentro de un test triaxial mostraron una semejanza en el comportamiento del transductor con el sistema de elementos finitos, Fig. 4

Figura 4. Respuesta experimental y determinada por EF de la presión de poros.



Fuente: Kutter, B.L., Effects of Local Arching and Consolidation on Pore Pressure Measurements in Clay, Centrifuge 88; Proceedings of International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Paris, 25-27 April 1988.

Aunque con este análisis, Kutter permitió demostrar que las medidas del transductor pueden ser altamente influenciadas por la concentración de esfuerzos alrededor del transductor, fue hasta 1990 que se pudo concluir que esta influencia es debida a factores como la geometría, los materiales y propiedades tanto del aparato de medición como el suelo en el cual se encuentra inmerso, o también a partir de la dirección de los esfuerzos principales generados sobre el aparato.

Previas investigaciones solo se han enfocado a determinar el comportamiento de la presión de poros del suelo con una carga gradual o estática, sin embargo no se ha desarrollado ningún tipo de contribución en cuanto a la influencia de cargas

dinámicas o sismos en la efectividad de la medición de la presión de poros, y por ello la necesidad de un estudio en este campo.

Debido a la complejidad de los sismos y terremotos, diferentes modelos han sido desarrollados y usados como prototipos de estos tipos de comportamiento para simplificar las circunstancias reales a las cuales los investigadores se deben enfrentar. Estos tipos de experimentos o análisis se dividen en dos diferentes grupos, los primeros son los modelos realizados bajo el campo gravitacional de la tierra, como las pruebas en mesas sísmicas; y los segundos, son modelos desarrollados bajo un campo de gravitación más alto, como los usados en pruebas centrifugas. Las pruebas con mesas sísmicas son bien utilizadas en diferentes tipos de problemas, como análisis de licuefacción, asentamientos post-sismos, respuesta de fundaciones o problemas de presión lateral. Diferentes trabajos, usando este aparato han ayudado a entender algunas de las más importantes características del suelo y su comportamiento.

Sin embargo, uno de los problemas relacionado con este tipo de análisis es la compleja reproducción de un sismo debido a los altos estándares para mantener y operar un sistema que represente seis grados de libertad en una mesa sísmica, es por esto que una reducción y simplificación a un solo grado de libertad es imperante y suficiente para analizar la respuesta del suelo en diferentes estructuras como muros de contención o terraplenes.

Diferentes investigaciones mediante experimentos y pruebas en el laboratorio han demostrado que la respuesta y falla de este tipo de estructuras no es influenciada por los otros cinco grados de libertad. Gopikrishna diseñó una mesa vibratoria en la cual se permitiera aplicar vibraciones sinusoidales armónicas en dirección longitudinal. Además de esto, determinó que el rango en el cual la frecuencia es predominante para terremotos o sismos es alrededor de 1 a 2 Hz con un pico promedio de amplitud de aceleración alrededor de los 0.5 g.

Investigadores dedicados a entender la licuefacción a través del uso de mesas sísmicas o vibratorias han encontrado de suma importancia la buena instrumentación en sus análisis. Hushmand demostró que la locación de un transductor de presión de poros dentro de un espécimen prueba es tan importante como la correcta calibración de los elementos de medición, concluyendo así que entre más aislado se encuentre el aparato de los elementos en los cuales el espécimen se encuentra embebido como la base o bordes del contenedor, mejor y más real será la respuesta del aparato.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GENERAL:

El objetivo principal de esta investigación está dirigido a analizar y entender, de forma preliminar, la efectividad y veracidad de un transductor de presión de poros como aparato de medición en un suelo saturado bajo condición dinámicas y cómo puede afectar los resultados de la presión de poros real en el suelo. Con el fin de alcanzar esta meta, una serie de experimentos fueron desarrollados en el laboratorio.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Analizar la influencia de la rigidez del transductor en la efectividad de la presión de poros en condiciones sísmicas, para esto un primer ensayo mide la respuesta del transductor en condiciones aisladas permitiendo así entender la influencia de las fuerzas inerciales desarrolladas por el mismo aparato debido a movimientos dinámicos.
- Estudiar la influencia del agua dentro de la cavidad del transductor en la respuesta de la presión de poros bajo condiciones sísmicas. Un segundo ensayo mide la respuesta del transductor en condiciones saturadas, con el fin de entender y analizar la relación entre el agua presente en la cavidad del transductor y la respuesta de la presión de poros.
- Analizar la influencia de parámetros como la frecuencia, la amplitud y la posición del aparato en la respuesta de la presión de poros. Un último ensayo está enfocado a medir la respuesta de un suelo saturado, simulando las condiciones reales en las cuales el sistema se puede encontrar.

Los experimentos fueron controlados bajo un determinado número de condiciones dinámicas (amplitud y frecuencia), las cuales fueron seleccionadas debido a limitaciones de la mesa vibratoria. Estas condiciones están enumeradas y explicadas en detalle en la sección 5. Metodología.

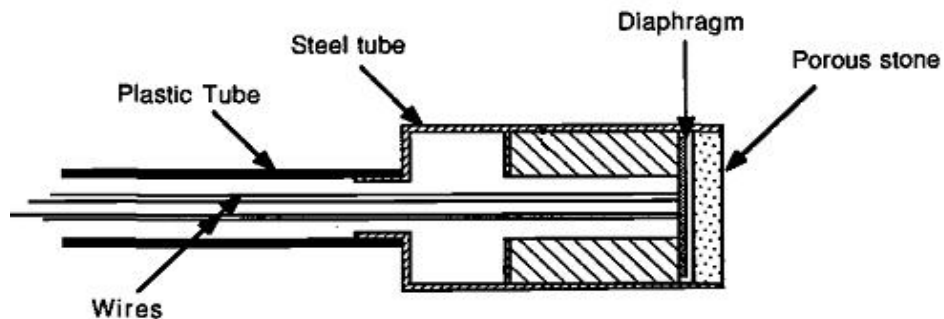
Por otra parte, un contenedor fue diseñado y construido para facilitar el cumplimiento de las tareas, permitiendo una buena instrumentación en el proceso y sirviendo como puente entre el transductor y la mesa vibratoria.

3. INSTRUMENTATION

3.1 TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DE POROS

El transductor, basado en la medición de deformación, permite la conversión de la presión de poros del agua en una señal eléctrica. La figura 4 muestra la sección transversal del transductor. Tres partes importantes son presentadas en la figura: una piedra porosa, que permite el flujo del agua entre el aparato y el medio, un diafragma, el cual transforma la presión del agua en señales eléctricas y una cavidad entre la piedra y el diafragma la cual en condiciones saturadas, está llena de agua.

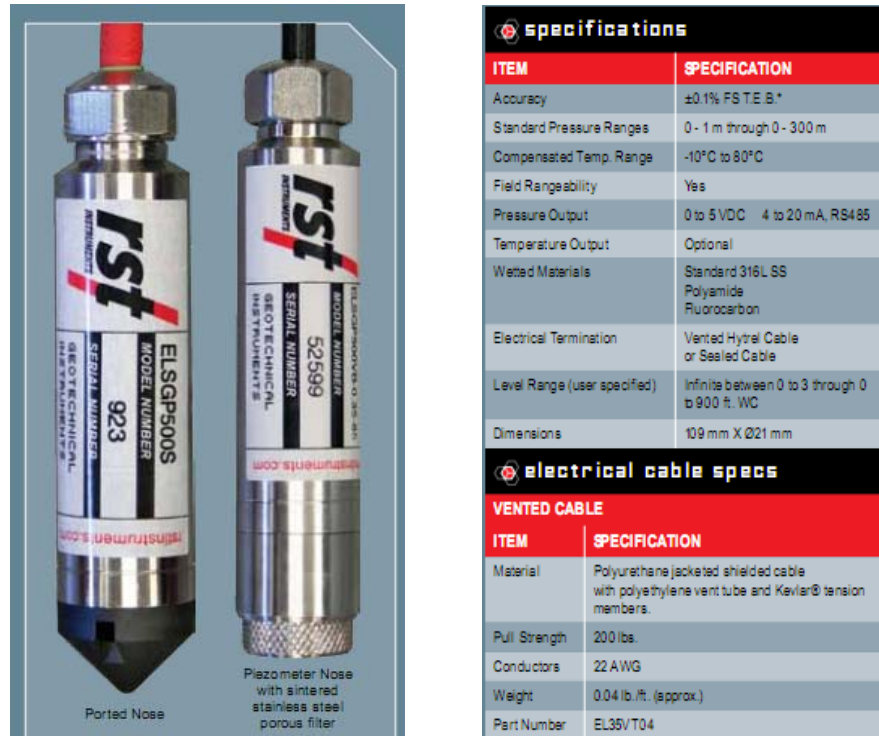
Figura 5. Sección transversal del transductor



Fuente: Kutter, B.L., Sathialingam, N., and Herrmann, L.R. "Effects of Arching on Response Time of Miniature Pore Pressure Transducer in Clay", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 13, No. 3, September 1990, Pag 167.

El transductor utilizado para la experimentación es un Strain Gauge Piezometer, modelo 52599 de la empresa RST instrumentation. Este aparato es específicamente diseñado para soportar todo tipo de ambientes agresivos, permitiendo mediciones repetitivas y precisas a diferentes profundidades.

Figura 6. Strain Gauge Piezometer, modelo 52599, RST Instrumentation.



| specifications | |
|------------------------------|--|
| ITEM | SPECIFICATION |
| Accuracy | ±0.1% F.S.T.E.B.* |
| Standard Pressure Ranges | 0 - 1 m through 0 - 300 m |
| Compensated Temp. Range | -10°C to 80°C |
| Field Rangeability | Yes |
| Pressure Output | 0 to 5 VDC 4 to 20 mA, RS485 |
| Temperature Output | Optional |
| Wetted Materials | Standard 316L SS Polyamide Fluorocarbon |
| Electrical Termination | Vented Hydral Cable or Sealed Cable |
| Level Range (user specified) | Infinite between 0 to 3 through 0 to 900 ft. WC |
| Dimensions | 109 mm X Ø21 mm |

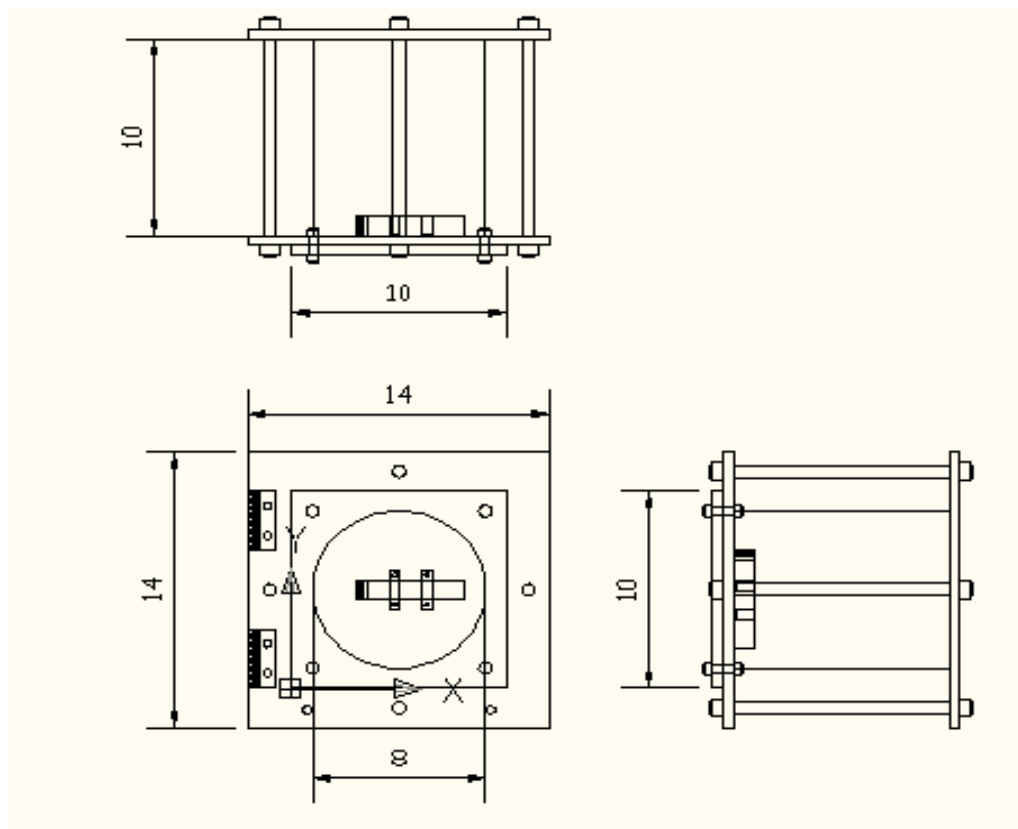
| electrical cable specs | |
|------------------------|---|
| VENTED CABLE | |
| ITEM | SPECIFICATION |
| Material | Polyurethane jacketed shielded cable with polyethylene vent tube and Kevlar® tension members. |
| Pull Strength | 200 lbs. |
| Conductors | 22 AWG |
| Weight | 0.04 lb./ft. (approx.) |
| Part Number | EL35V T04 |

Fuente: <http://www.rstinstruments.com/Strain%20Gauge%20Piezometer.html>

3.2 CONTENEDOR

Un contenedor fue diseñado y construido para alcanzar las condiciones deseadas en la experimentación, la Figura 7. muestra el diseño del contenedor. Dos placas de aluminio de 0.5 pulgadas apernadas entre sí con 4 tornillos de aproximadamente 12 pulgadas de longitud retienen un cilindro, el cual posee unos aros de silicona en cada extremo para permitir el correcto sellado del contenedor. En la placa inferior, un adaptador permite el acoplamiento del transductor dentro del sistema y los perfiles L ubicados a un extremo de las placas posibilitan la rotación del contenedor y así mismo el análisis en las dos direcciones.

Figura 7. Sección Transversal del Contenedor



3.3 MESA VIBRATORIA

La mesa vibratoria APS Electro-Seis posibilita el desplazamiento del sistema en una dirección. La placa metálica ubicada en la parte superior sirve como elemento de conexión entre la mesa y el contenedor. Este aparato está regido por dos parámetros importantes los cuales podemos controlar: el primer parámetro es la frecuencia o número de oscilaciones en una unidad de tiempo, la cual alcanza un rango máximo hasta de 100 Hz. El segundo parámetro es la amplitud, la cual se determina como distancia máxima en la cual la mesa vibratoria puede oscilar, el rango de este parámetro puede alcanzar las 6 pulgadas, sin embargo este valor es dependiente de la frecuencia a la cual se esté trabajando.

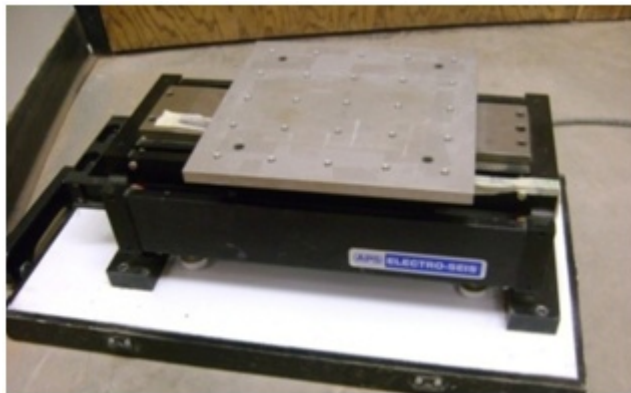
Figura 8. Mesa vibratoria APS Electro-Seis.



Fuente: http://www.apsdynamics.com/modal_shaker_aps113.php

Como se puede apreciar en la fig. 8 La mesa posee una lámina de aluminio con una serie de agujeros en los cuales el contenedor es apernado, permitiendo una rigidez entre la máquina y el contenedor. La fig. 9 es una imagen de la mesa vibratoria usada en la experimentación, la lámina de aluminio posee unas dimensiones de 10 x 10 pulgadas, los orificios en esta están separados cada 2 pulgadas.

Figura 9. Mesa vibratoria APS de la experimentación.



4. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para la adquisición de datos en esta experimentación está regida por diferentes parámetros:

- a) Frecuencia de vibración:** la cual es el número de oscilaciones en una unidad de tiempo (segundos) pueden alcanzar hasta un valor de 100 Hz. A pesar de este alto rango de variación el propósito de este estudio se enfocó en reproducir las situaciones más críticas a las cuales un suelo se pueda encontrar. Análisis previos, Gopikrishna 1990, determino que el rango crítico de un sismo oscila entre 1 a 2 Hz, sin embargo un rango entre 0.5 y 3 Hz fue el seleccionado en esta prueba.
- b) Amplitud de la mesa vibratoria:** es la distancia entre los valores picos de oscilación, tiene un valor máximo de 6 pulgadas. Sin embargo este parámetro es totalmente dependiente de la frecuencia de vibración y los valores disminuyen a medida que la frecuencia se incrementa.
- c) Posición del transductor:** mide la respuesta del aparato en dos direcciones, horizontal y vertical.
- d) Tiempo:** la duración de cada prueba es aproximadamente de 10 segundos, el programa que permite la adquisición de datos posibilita obtener 500 datos por segundo, llegando a tener alrededor de 5000 datos por prueba.

La tabla 1. Muestra los diferentes experimentos practicados en el laboratorio, como una conjugación entre frecuencia, amplitud y dirección del sistema.

Tabla 1. Experimentos practicados en el laboratorio

| | | | | | | |
|-----------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Frecuencia (Hz) | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.2 | 3 |
| Amplitud (in) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| | 3 | 3 | 3 | | | |
| Posición | Horizontal y vertical | | | | | |

Una vez los parámetros para cada experimento son definidos y conociendo el número de pruebas (40 pruebas), la experimentación puede ser llevada a cabo. Tres pruebas son desarrolladas en la adquisición de datos:

4.1 EXPERIMENTACIÓN EN CONDICIONES SECAS

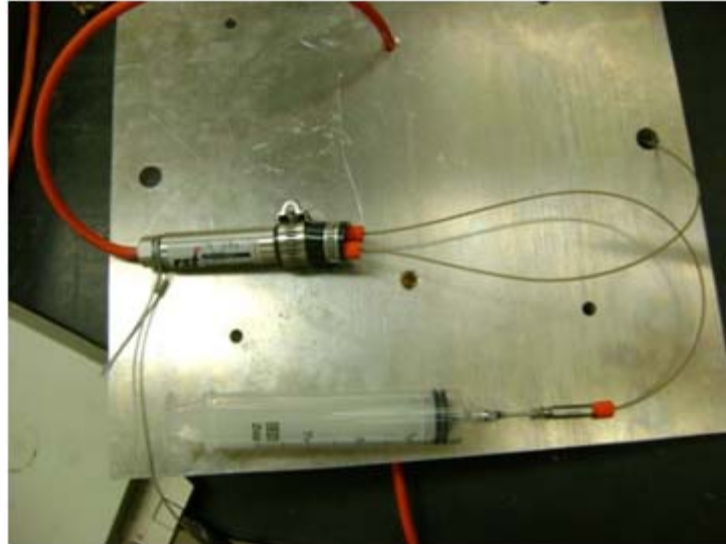
Esta primera fase está enfocada a determinar la respuesta de la rigidez del diafragma en el transductor de presión de poros en condiciones aisladas. El aparato es ubicado dentro del contenedor el cual es apernado a la mesa vibratoria, ninguna clase de material ni sustancia es usada en el transductor con el fin de adquirir una respuesta clara del sistema.

4.2 EXPERIMENTACIÓN EN CONDICIONES SATURADAS

La segunda fase de este trabajo está basada en analizar la reacción del transductor cuando está totalmente saturado, con el fin de alcanzar este propósito, una tapa especial fue diseñada para eliminar todo tipo de aire presente en la cavidad entre el diafragma y el elemento poroso. La figura 10 muestra la tapa acoplada al transductor, está cubierta posee dos orificios a los cuales dos tubos de 0.1 pulgadas aproximadamente son embebidos, uno de estos está unido a una

jeringa para realizar la saturación del aparato, el agua desairada es introducida con ayuda de la jeringa mientras el aire es liberado por el otro tubo. Una serie de suaves golpes se realizan durante la saturación para liberar las burbujas de aire que pueden quedar adheridas a las paredes de la cavidad.

Figura 10. Acoplamiento de la tapa al transductor



4.3 EXPERIMENTACIÓN CON SUELO SATURADO

Esta última fase busca determinar el comportamiento del transductor a través de una simulación de condiciones reales a las cuales el aparato se puede encontrar. Para esta experimentación, se seleccionó la arena Ottawa debido a su bajo nivel cohesivo y sus bien conocidas propiedades. La arena fue ubicada dentro del contenedor en 5 capas de aproximadamente 2 pulgadas cada una, después de la segunda capa el transductor fue ubicado en el medio del contenedor para continuar el aporte de Hushmand, el cual enfatiza la ubicación y aislamiento del aparato dentro de un sistema o elemento. La compactación de cada una de estas capas fue realizada con un martillo de compactación de 4.5 Kg (10 lbs.) a una

altura de 45.7 centímetros, 25 golpes por capa fueron realizados de acuerdo con la norma AASTHO T99-01, compactación de suelos (Proctor Modificado).

Una vez compactado el suelo dentro del recipiente, se prosigue a la saturación del mismo. La saturación del suelo se realiza con agua potable a una temperatura de 20° C, el agua entra por una válvula ubicada en la parte baja del recipiente circular, y esta asciende dentro del contenedor hasta alcanzar la saturación completa de la muestra. Este proceso tarda aproximadamente 3 horas debido a que el caudal de entrada del agua en la saturación es muy baja para no generar ningún tipo de burbujas de aire dentro de la muestra. Teniendo lista la arena saturada, la válvula de saturación es cerrada, el contenedor es sellado y apernado y un sistema de aire a presión es acoplado a una de las válvulas ubicadas en la lámina superior del contenedor. El ajuste de este sistema permite simular una presión normal a la cual cualquier tipo de suelo puede encontrarse, un medidor de presión de aire permite el control de la presión dentro del recipiente. La muestra es sometida a una presión de 3 psi, la cual se mantiene durante toda la última fase de la experimentación.

Las siguientes imágenes muestran la configuración de la experimentación en conjunto.

Figura 11. Configuración total del transductor dentro del contenedor en la mesa vibratoria (válvula de saturación)

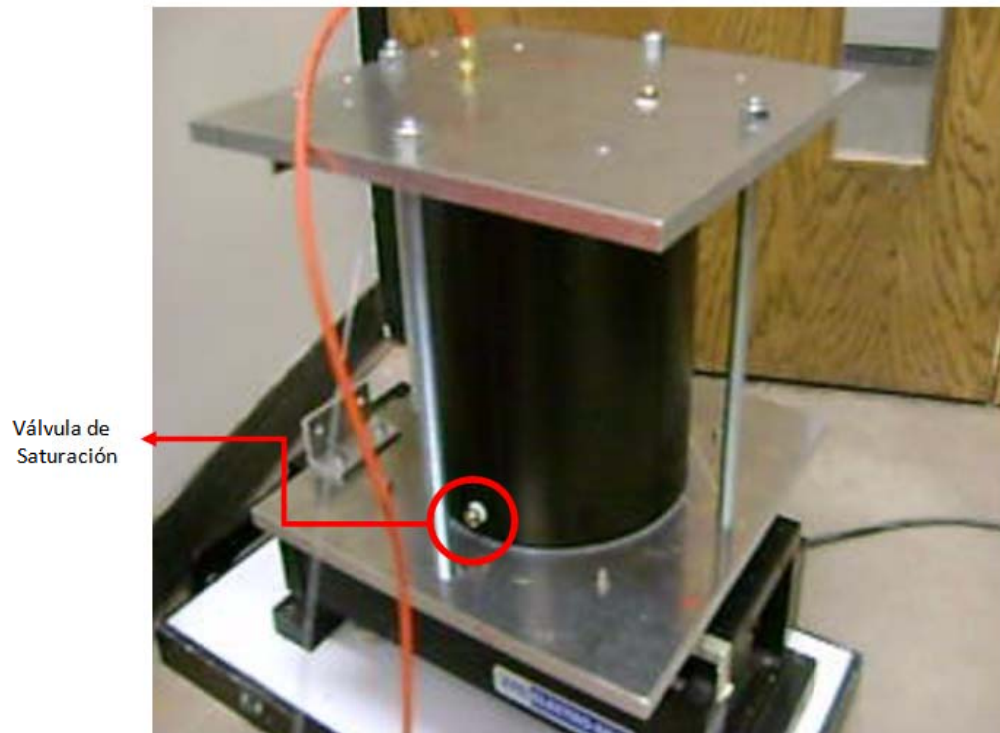


Figura 12. Transductor de presión de poros dentro del contenedor.



Figura 13. Control de frecuencia, control de amplitud y contenedor



5. ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos fue realizada a través del programa Data Acquisition System, desarrollado por el departamento de Geotecnia de la Universidad de Oklahoma, el cual cuenta con diferentes canales de respuesta para la adquisición de datos en las diferentes pruebas y experimentaciones como el test triaxial y corte directo entre otros. Sin embargo un solo canal fue necesario para almacenar la respuesta del transductor. Los datos fueron almacenados en un archivo .LVM que puede ser leído a través de un bloc de notas o Excel.

El uso de Matlab permitió una representación gráfica de los datos obtenidos en las diferentes pruebas, así mismo un ajuste de datos a un tipo de curva permitió acoplar los datos a una ecuación. El comportamiento de las pruebas se caracterizaron de la misma forma, comportamientos sinusoidales en los cual los factores controlados (amplitud, frecuencia, tiempo y dirección) nombrados previamente en la metodología influenciaron en la variación de este comportamiento. El tipo de curva esta expresado en la ecuación 6.1. modelo general de Fourier (grado 8).

fittedmodel(x)

$$\begin{aligned} &= a_0 + a_1\cos(xw) + b_1\sin(xw) + a_2\cos(2xw) + b_2\sin(2xw) \\ &+ a_3\cos(3xw) + b_3\sin(3xw) + a_4\cos(4xw) + b_4\sin(4xw) \\ &+ a_5\cos(5xw) + b_5\sin(5xw) + a_6\cos(6xw) + b_6\sin(6xw) \\ &+ a_7\cos(7xw) + b_7\sin(7xw) + a_8\cos(8xw) + b_8\sin(8xw) \end{aligned}$$

Ecuación 1. Modelo General De Fourier

La representación gráfica de los resultados de las pruebas se ilustran en el anexo A y un ejemplo se muestra a continuación, la línea roja representa el ajuste de

Matlab a los datos obtenidos en el laboratorio, una misma figura contiene el comportamiento del transductor en las tres fases a la cuales fue experimentado, la primera es en condiciones aisladas, la segunda bajo la saturación del aparato y la última dentro del suelo saturado.

Este trabajo es una exploración preliminar que a grandes rasgos permitió establecer los diferentes factores que afectan la efectividad de los datos adquiridos por un transductor de presión de poros. A pesar de que no fue usado en esta investigación, un modelo altamente acoplable a este estudio, es el Diseño Factorial 2^k con bloques¹, el cual permite analizar cada uno de los factores influyentes de forma aislada y en conjunto, mostrando la incidencia de estos dentro de la respuesta de la presión de poros. Una de las razones por las cuales no se manejó este análisis fue debido a la variación de presión en la última fase, en la cual el sistema se encontraba inmerso en suelo saturado. Esta variación dio a entender que el sellado no era totalmente hermético y que las fugas de aire influían en la presión generada durante el desarrollo de la experimentación. Y por lo tanto la veracidad de los datos obtenidos imposibilitaba la aplicación del modelo anteriormente descrito, siendo un desgaste de tiempo y dinero que no generaría ningún tipo de logro.

¹GONZALES, David Ph. D.; RODRÍGUEZ, Cynthia MS. Student; ANAYA, Ángela. ME. Manual de diseño y análisis de experimentos.

6. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

La interpretación de los datos adquiridos en el laboratorio se realiza a partir de la obtención de los valores máximos y mínimos absolutos, en cada uno de los ensayos. Se hace de esta manera, debido a que durante los diferentes procedimientos y las diferentes condiciones dadas, el transductor generó tanto presiones positivas como negativas.

El comportamiento sinusoidal de los ensayos realizados se vio reflejado en las diferentes graficas generadas en Matlab, (Anexo A y Anexo B). A partir de estos datos, se agruparon los valores máximos y mínimos de cada uno de los experimentos y basados en una estadística descriptiva se estableció un valor máximo y mínimo. La desviación estándar de todos los ensayos fue menor a 0.001.

La tabla 2 muestra los valores máximos, obtenidos en las pruebas, y las gráficas 14 a 19 representan cada uno de estos valores.

Tabla 2. Presiones de poros máximas

| | | PRESIÓN DE POROS (PSI) | | | | | |
|-----|-----|------------------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| | | POSICIÓN | | | | | |
| | | HORIZONTAL | | | VERTICAL | | |
| | | CONDICIÓN | | | CONDICIÓN | | |
| HZ | IN | SECA | SATURADA | CON SUELO | SECA | SATURADA | CON SUELO |
| 0.5 | 0.5 | -0.19421404 | -0.22146002 | | -0.22108744 | -0.32108752 | 2.48546792 |
| | 1 | -0.19467772 | -0.2213074 | 2.4852234 | -0.22406622 | -0.33628544 | 2.49044168 |
| | 2 | -0.19671586 | -0.22308344 | 2.48273924 | -0.22518966 | -0.32308344 | 2.50415628 |
| | 3 | -0.19588588 | -0.34439702 | 2.4712164 | | | |
| 1 | 0.5 | -0.19547696 | -0.22077614 | 2.47777684 | -0.22458546 | -0.36044326 | 2.49815022 |
| | 1 | -0.19629474 | -0.22093494 | 2.49002056 | -0.22540934 | -0.3619874 | 2.49798532 |
| | 2 | -0.19658796 | -0.22398678 | 2.49054532 | -0.22537874 | -0.34970104 | 2.49826012 |
| | 3 | -0.19719912 | -0.22093494 | 2.48999014 | -0.2252447 | -0.36680284 | 2.49721048 |
| 1.5 | 0.5 | -0.19855336 | -0.22336426 | 2.49130248 | -0.22592172 | -0.3749084 | 2.49130248 |
| | 1 | -0.20329572 | -0.22473184 | 2.50166636 | -0.2264648 | -0.37595224 | 2.50169666 |
| | 2 | -0.20115984 | -0.2305784 | 2.49660644 | -0.22614154 | -0.37778312 | 2.5027714 |
| | 3 | -0.2014771 | -0.2355894 | 2.50072006 | -0.22614138 | -0.3785585 | 2.48970952 |
| 2 | 0.5 | -0.200781 | -0.22780146 | 2.49631364 | -0.22561058 | -0.3802124 | 2.50322282 |
| | 1 | -0.1998163 | -0.23156112 | 2.5030459 | -0.22666624 | -0.38140302 | 2.49750322 |
| | 2 | -0.20091576 | -0.24821776 | 2.49077736 | -0.22628162 | -0.38356322 | 2.4959903 |
| 2.2 | 0.5 | -0.20357052 | -0.2326782 | 2.49918236 | -0.2282107 | -0.38604138 | 2.50442468 |
| | 1 | -0.20529812 | -0.23704832 | 2.50508986 | -0.22692234 | -0.3874022 | 2.49314572 |
| | 2 | -0.20563358 | -0.25389406 | 2.50065292 | -0.22738624 | -0.38826882 | 2.50302764 |
| 3 | 0.5 | -0.20576768 | -0.23685918 | 2.50004882 | -0.22706888 | -0.38843976 | 2.50938744 |
| | 1 | -0.206024 | -0.24511696 | 2.51011982 | -0.22803324 | -0.38934342 | 2.51011982 |

Tabla 3. Presiones de poros mínimas

| | | POSICIÓN | | | | | |
|-----|-----|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| | | HORIZONTAL | | | VERTICAL | | |
| | | CONDICIÓN | | | CONDICIÓN | | |
| HZ | IN | SECA | SATURADA | CON SUELO | SECA | SATURADA | CON SUELO |
| 0.5 | 0.5 | -0.18720066 | -0.21094952 | | -0.20998534 | -0.30636606 | 2.475586 |
| | 1 | -0.187585 | -0.21068116 | 2.46768846 | -0.21134028 | -0.31243316 | 2.47897958 |
| | 2 | -0.18901978 | -0.2121642 | 2.46834734 | -0.21456302 | -0.2121642 | 2.49321888 |
| | 3 | -0.18862852 | -0.3301084 | 2.4629876 | | | |
| 1 | 0.5 | -0.18856738 | -0.2105042 | 2.4691282 | -0.21456201 | -0.3463133 | 2.47877822 |
| | 1 | -0.18897104 | -0.20966784 | 2.47751446 | -0.21501458 | -0.34754048 | 2.483459 |
| | 2 | -0.18965478 | -0.21005868 | 2.48162876 | -0.2156125 | -0.36376344 | 2.4867245 |
| | 3 | -0.18954488 | -0.20966784 | 2.47446318 | -0.21501458 | -0.35211196 | 2.47749006 |
| 1.5 | 0.5 | -0.19171706 | -0.21198094 | 2.47527448 | -0.21556992 | -0.36010134 | 2.47527448 |
| | 1 | -0.19116848 | -0.21085812 | 2.4871576 | -0.21627818 | -0.36196914 | 2.48582774 |
| | 2 | -0.19320096 | -0.20813598 | 2.4810551 | -0.2155331 | -0.36350712 | 2.49204762 |
| | 3 | -0.19308512 | -0.2015866 | 2.48250734 | -0.21533184 | -0.36429412 | 2.47830834 |
| 2 | 0.5 | -0.1932315 | -0.21490476 | 2.47908936 | -0.21585694 | -0.36765118 | 2.49066754 |
| | 1 | -0.19226128 | -0.21274436 | 2.49209022 | -0.21505714 | -0.36851184 | 2.48164716 |
| | 2 | -0.19202902 | -0.20178806 | 2.4826721 | -0.21596676 | -0.36959266 | 2.48107334 |
| 2.2 | 0.5 | -0.19118668 | -0.21699854 | 2.48197058 | -0.21779792 | -0.37208878 | 2.49158368 |
| | 1 | -0.19267612 | -0.21505716 | 2.49001438 | -0.21630276 | -0.37276016 | 2.48129928 |
| | 2 | -0.19200466 | -0.19839432 | 2.48571792 | -0.21651022 | -0.3732179 | 2.48647436 |
| 3 | 0.5 | -0.19541026 | -0.21437988 | 2.48950196 | -0.21652248 | -0.37402342 | 2.4922427 |
| | 1 | -0.19467752 | -0.20462636 | 2.49858414 | -0.21699854 | -0.37414544 | 2.49858414 |

Figura 14. Presión de poros en posición horizontal y condiciones secas

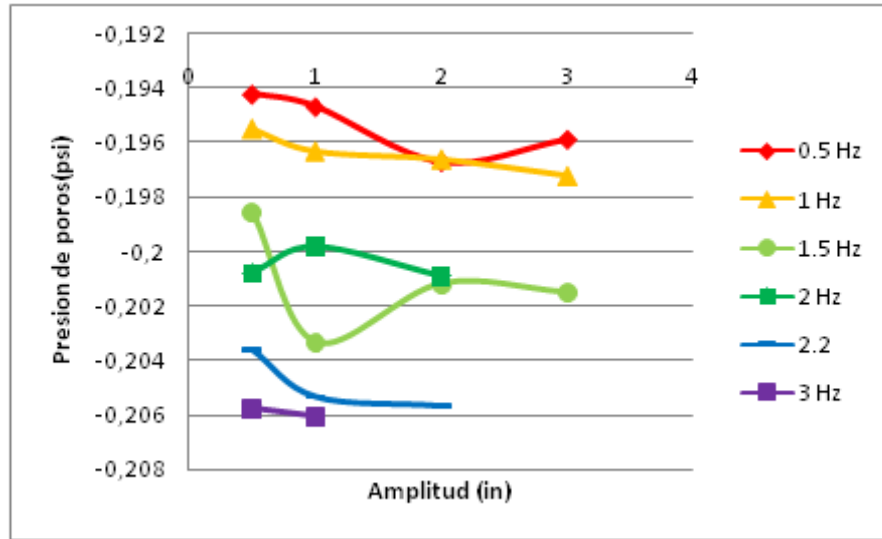
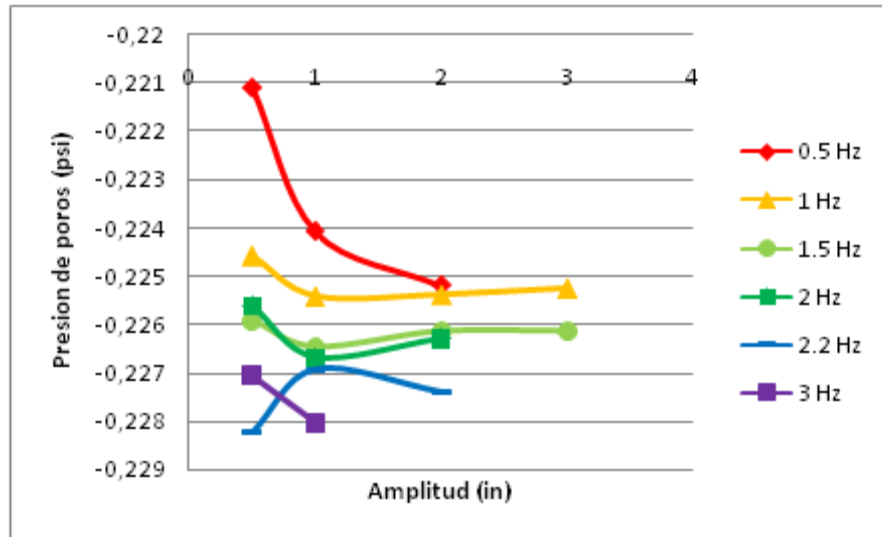


Figura 15. Presión de poros en posición vertical y condiciones secas



Como se puede apreciar en las anteriores gráficas, la presión originada dentro del transductor aumenta progresivamente con el aumento en la frecuencia y la amplitud para cada uno de los casos tratados. La variación de presiones generada por el cambio de frecuencia es más notable y variable que el aumento en la amplitud de cada caso. En la figura 15 se puede reconocer de una forma más

clara este comportamiento gradual. El incremento de la presión debido a la posición del transductor se hace notable al localizar de forma vertical el aparato en cuestión.

Figura 16. Presión de poros en posición vertical y condiciones saturadas

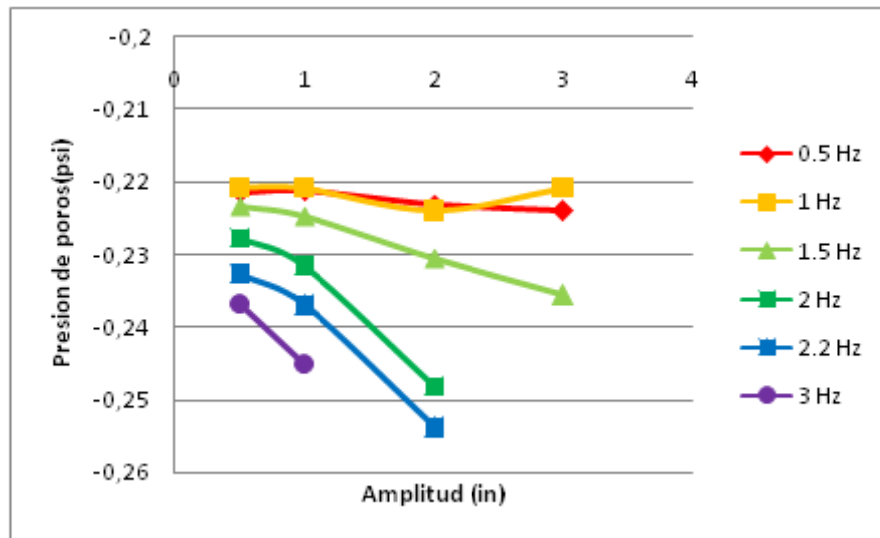
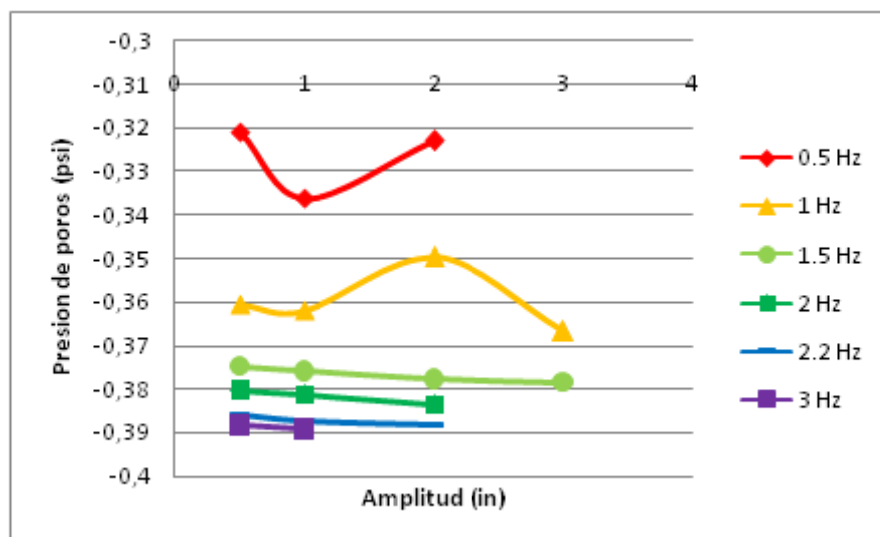


Figura 17. Presión de poros en posición horizontal y condiciones saturadas



Para las condiciones saturadas, se puede apreciar un comportamiento similar en cada una de las frecuencias, sin embargo esta conducta se hace más notable en la dirección vertical. La figura 16. muestra que el aumento de presión de poros de un amplitud a otra no es el mismo, de hecho, este rango aumenta a medida que la amplitud va en ascenso. Por otra parte, la variación de presiones en la Figura 17. no es tan variable como en la Figura 16. pero los valores de presión son mayores cuando el aparato esta en dirección horizontal.

La variación de la presión entre cambios de frecuencias se hace más notable en condición saturada que en condiciones secas, es posible que este incremento se deba a la fuerza producida por la inercia del agua dentro de la cavidad libre del transductor.

Figura 18. Presión de poros en posición vertical e inmerso en suelo

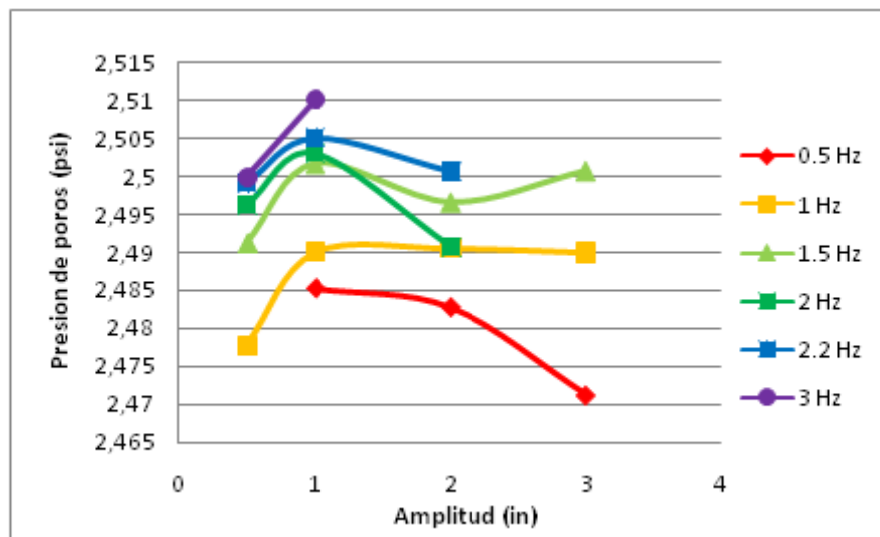
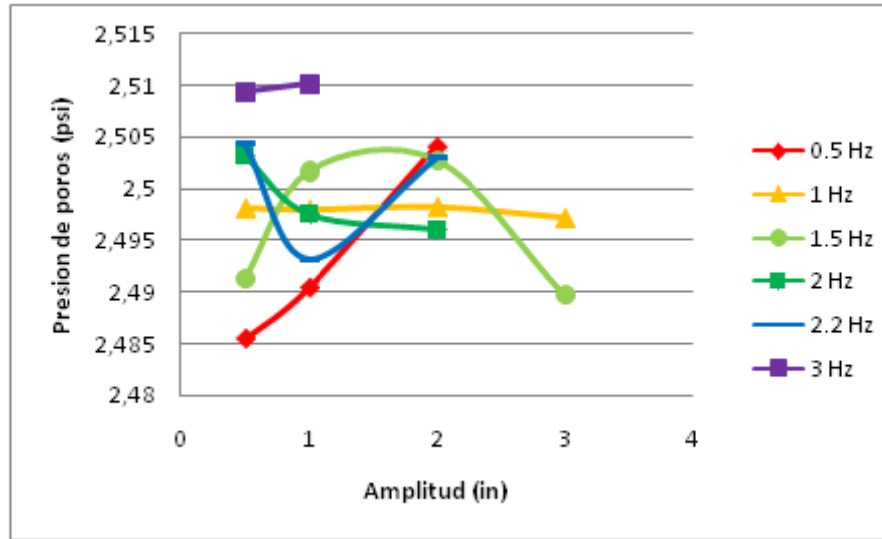


Figura 19. Presión de poros en posición horizontal e inmerso en el suelo



Las figuras 18 y 19 muestran el comportamiento del transductor de presión de poros inmerso en un suelo saturado, a diferencia de los casos anteriores, las presiones generadas en estos ensayos son positivas y su comportamiento no es tan representativo como en los casos previos, es decir no presenta un patrón de comportamiento tan notable como en las condiciones secas y saturadas. Sin embargo esta conducta puede ser debida a las condiciones propias en las cuales se desarrollaron los experimentos, la presión aplicada a las muestras no fue estrictamente controlada, ya que la regulación de esta presión fue determinada de forma manual con una perilla. En las gráficas generadas por Matlab, (Anexo A y Anexo B), existen unas caídas de presión en estos ensayos, dando por entendido que el sistema no se encontraba en condiciones totalmente herméticas y las presiones internas no eran constantes.

Durante el proceso de experimentación del aparato inmerso en el suelo (fase 3), los resultados de presión obtenidos no fueron los esperados, a pesar que la presión aplicada a la muestra fue de 3 psi el registro obtenido por el transductor fue menor al aplicado, como se puede observar en las figuras 18 y 19. Dando a

entender que factores como el agua y la inercia del aparato son elementos que intervienen en el comportamiento y desarrollo del transductor y de esta forma la efectividad del sistema.

Figura 20. Presión de Poros en Condiciones Secas en dirección Vertical y Horizontal.

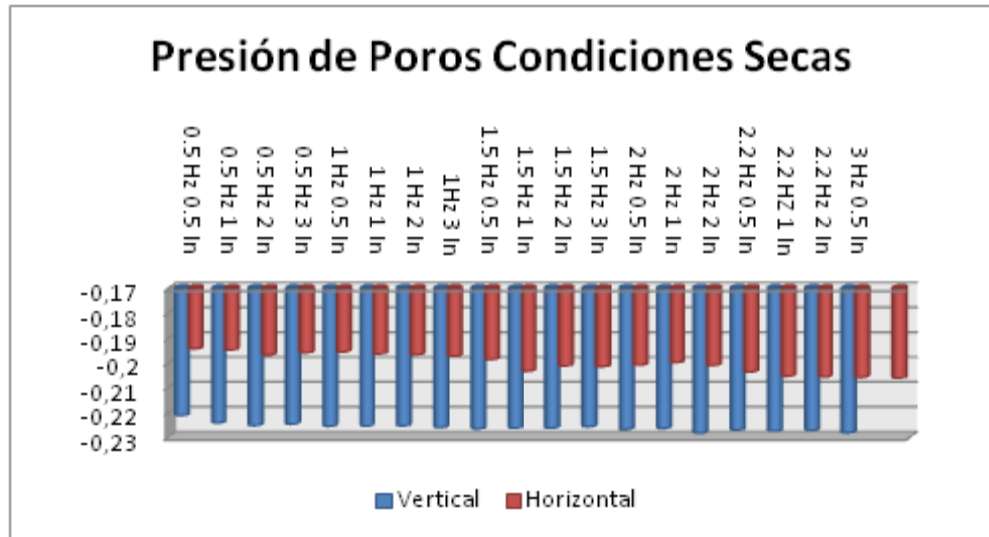


Figura 21. Presión de Poros en Condiciones Saturadas en dirección Vertical y Horizontal.

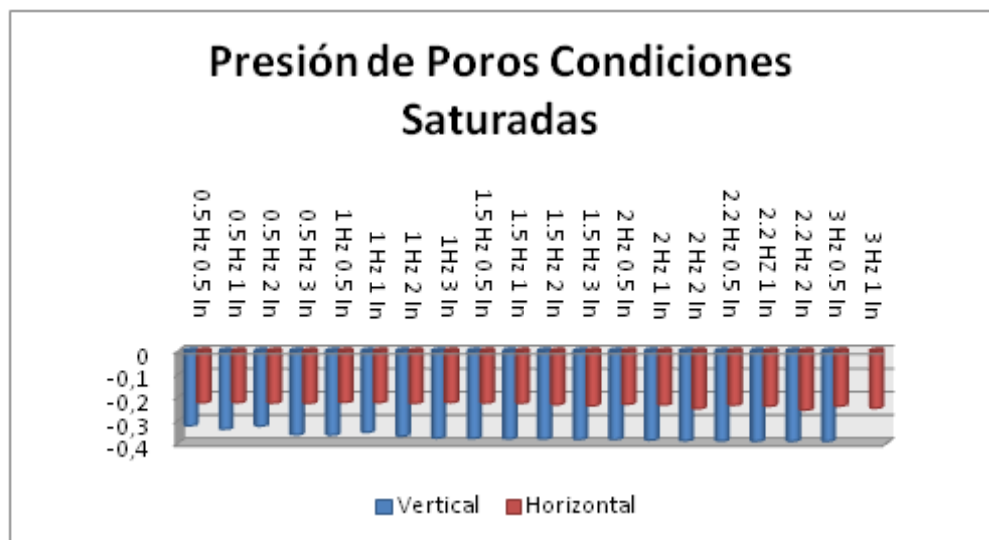
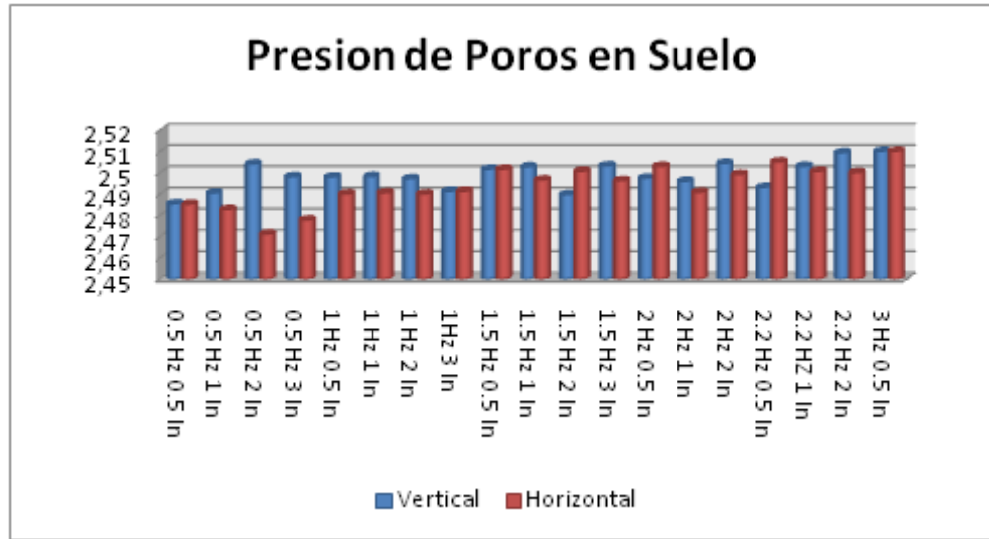


Figura 22. Presión de Poros inmerso Suelo en dirección Vertical y Horizontal.



De forma global, es importante resaltar que la influencia de la posición del transductor juega un papel importante para determinar la presión de poros dentro del transductor (Figuras 20, 21, 22). En todos los tratamientos a las cuales el aparato fue sometido en este trabajo, se notó un incremento de la presión al pasar de una dirección horizontal a una vertical, contrario a lo se esperaba, ya que se suponía que el transductor al estar en la misma posición en la cual la mesa vibratoria generaba su movimiento iba a producir mayor energía inercial lo cual produciría mas movimiento y presión dentro del sistema.

Por simple inspección de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas podemos asumir que las presiones generadas dentro del aparato son acumulables, es decir, la presión generada en el aparato saturado con agua, es el resultado de la presión producida por la inercia del mismo aparato mas la presión generada por el agua al entrar en contacto con el diafragma; y a su vez la presión desarrollada dentro del suelo saturado es la sumatoria de las presiones generadas por la inercia, el agua, y las condiciones externas a las cuales el transductor se encuentra, es por esto que el resultado final de la fase 3 genera presiones menores a las esperadas, porque las presiones producidas por la inercia y el agua

son opuestas a la presión generada dentro de la muestra. Sin embargo, cabe recordar que estos resultados se vieron afectados por la eficiencia de los instrumentos o las características propias de los demás instrumentos utilizados en el laboratorio.

7. CONCLUSIONES

Dentro del marco del desarrollo de nuevas investigaciones enfocadas a determinar la efectividad de la presión de poros con el uso de una correcta instrumentación, como lo es el transductor de presión de poros (PPT) en este caso, la necesidad de expandir el conocimiento en este campo es imperante, y aún más cuando el estudio de este comportamiento bajo condiciones sísmicas es muy escaso con una tendencia a ser casi nulo. Es por ello que este trabajo permitió, de una forma general, introducir un nuevo campo de investigación en cuanto a la respuesta de la presión de poros a partir de los diferentes elementos utilizados bajo una serie de condiciones dinámicas.

En primera instancia, se podría concluir que la efectividad en la adquisición de datos se ve altamente afectado por factores ajenos a las características propias de un sismo. Factores como la presión generada por la fuerza inercial propia del aparato o el agua presente dentro de la cavidad en el transductor son elementos determinantes a la hora de establecer la correcta respuesta del sistema. Las presiones negativas generadas por estos elementos disminuye el valor real de la presión de poros del suelo.

La respuesta de cada uno de estos factores podría variar de un aparato a otro, sin embargo una buena instrumentación podría determinar un valor general para todos los transductores siempre y cuando las especificaciones y estándares se mantengan.

Dentro del análisis de cada una de las condiciones, la posición del transductor es el elemento más importante a la hora de determinar los valores reales de la presión de poros, una inadecuada localización del aparato puede estropear todo el

correcto proceso de análisis. Es por esto que es de suma importancia que al generar prácticas reales en campo, se tenga conocimiento de la historia sísmica y la tendencia de respuesta dinámica del sitio, lo cual permitirá establecer la localización óptima del aparato.

En última instancia, la frecuencia y la amplitud jugaron un papel relevante en la variación de presión en cada uno de los experimentos. Es notable la influencia de estos elementos en la determinación de la presión de poros. Sin embargo es necesaria la implementación de más ensayos para determinar si existe un rango en el cual se maximice el valor de la presión o por el contrario el comportamiento de la presión se de de forma gradual para cada uno de estos componentes.

8. AVANCES

Actualmente, el grupo de investigación de Geotecnia de la Universidad de Oklahoma, está llevando a cabo estudios más avanzados y especializados para determinar un factor de corrección para la presión de poros con el uso de este tipo de aparatos, dentro de estas investigaciones, la característica más importante, en cuestión de mejor instrumentación, es la utilización de un contenedor de capas anidadas, el cual disminuye la fuerza generada en las paredes del contenedor que se producen con el movimiento de la mesa vibratoria. Estas investigaciones y experimentaciones aun siguen en curso y están abiertas para todo tipo aporte que permitan generar un bien dentro de la academia y de los resultados de dichas investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

Conference on Pore Pressure and Suction in Soils, A Study of the Response Time of Various Types of Piezometers. Conference organized by the British National Society of the International Society of Soil Mechanics and Foundation.

Farrell, Robert; de Alba, Pedro; Benoit, Jean; Piezometer Design and Installation for Earthquake Pore Water Pressure Measurement. Geotechnical Instrumentation News. December 2004.

Juul, M., Time Lag and Soil permeability in ground-water observations. Geotechnical Special Publication, American Society of Civil Engineer, New York, 2002, Vol 118, pp. 452-504.

Kutter, B.L, Effects of Local Arching and Consolidation on Pore Pressure Measurements in Clay. Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modeling, Paris, France, 1988.

Kutter, B.L., Sathialingam, N., and Herrmann, L.R."Effects of Arching on Response Time of Miniature Pore Pressure Transducer in Clay", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 13, No. 3, September 1990, Pag 167.

Lee, F.H., "Frequency Response of Diaphragm Pore Pressure Transducer in Dynamic Centrifuge Model Tests" Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol 13, No. 3, September 1990, pp. 201-207.

Prasad,S.K., Towhata,I, Chandradhara, G.P,Nanjundaswamy,P. Shaking Table Tests in Earthquake Geotechnical Engineering. Special Section: Geotechnics And Earthquake Hazards. Vol 87, No. 10 November 2004.

UNITED STATES. American Society of civil engineer. Time lag and soil permeability in ground-water observations. Juul, M. Geotechnical special publication. New York: American Society of civil engineer.

ANEXOS

ANEXO A. REPRESENTACIÓN GRÁFICA EN DIRECCIÓN HORIZONTAL, VARIANDO FRECUENCIA Y AMPLITUD

Figura A.1. Amplitud = 0.5 pulg, Frecuencia = 0.5 Hz

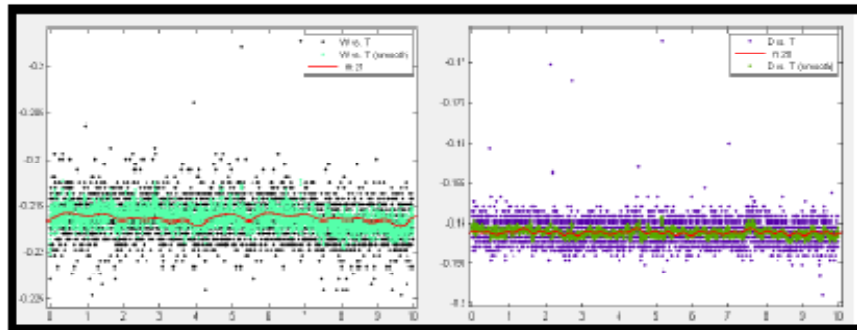


Figura A.2. Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 0.5 Hz

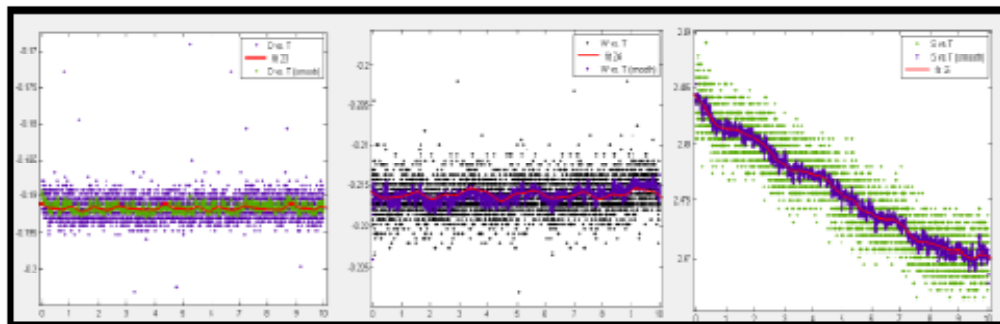


Figura A.3. Amplitud = 2 Pulg, Frecuencia = 0.5 Hz

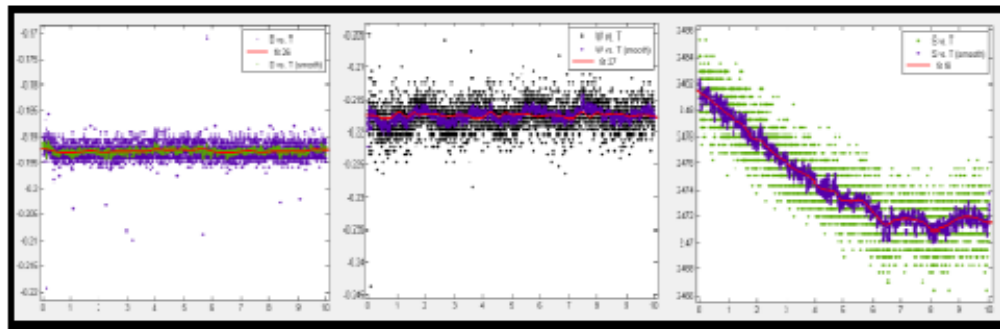


Figura A.4. Amplitud = 3 Pulg, Frecuencia = 0.5 Hz

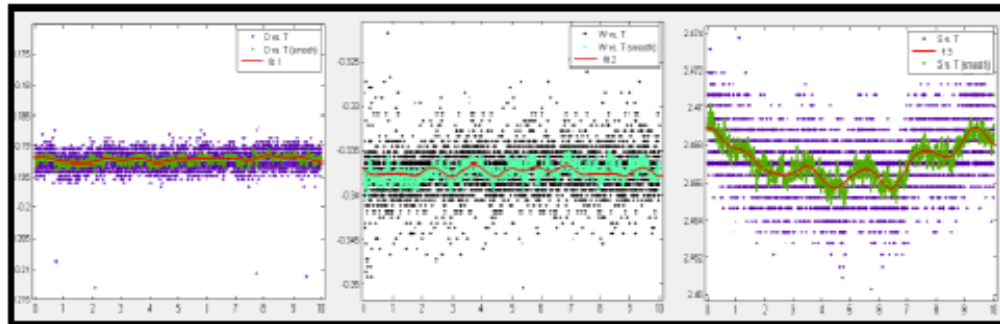


Figura A.5. Amplitud = 0.5 Pulg, Frecuencia = 1 Hz

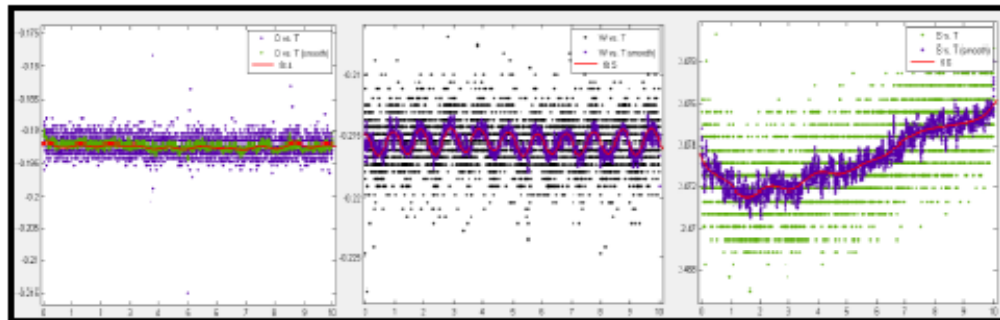


Figura A.6. Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 1 Hz

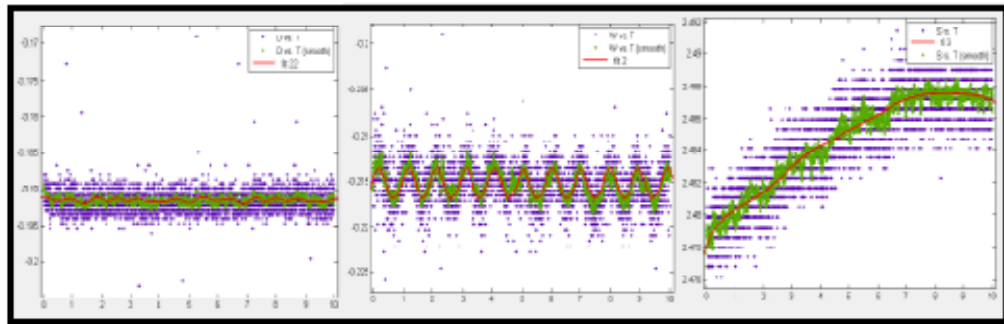


Figura A.7. Amplitud = 2 Pulg, Frecuencia = 1 Hz

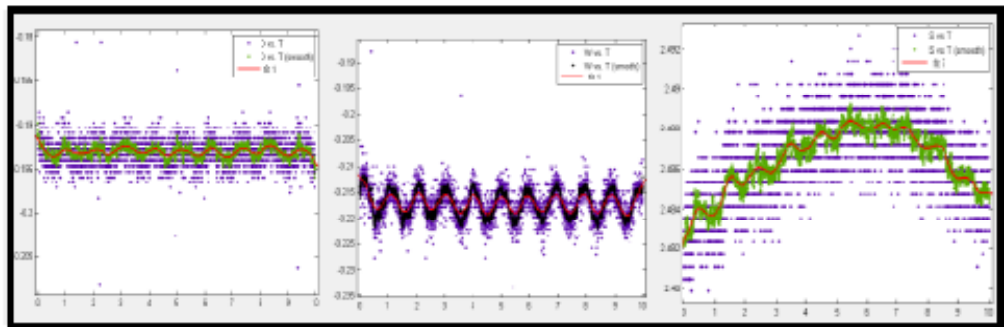


Figura A.8. Amplitud = 3 Pulg, Frecuencia = 1 Hz

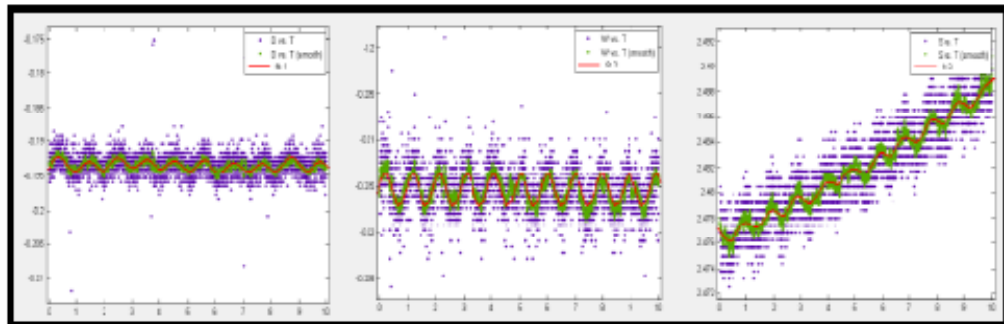


Figura A.9. Amplitud = 0.5 Pulg, Frecuencia = 1.5 Hz

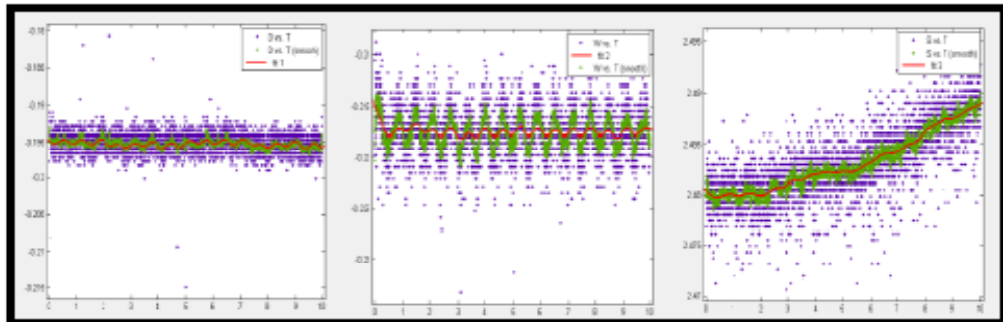


Figura A.10. Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 1.5 Hz

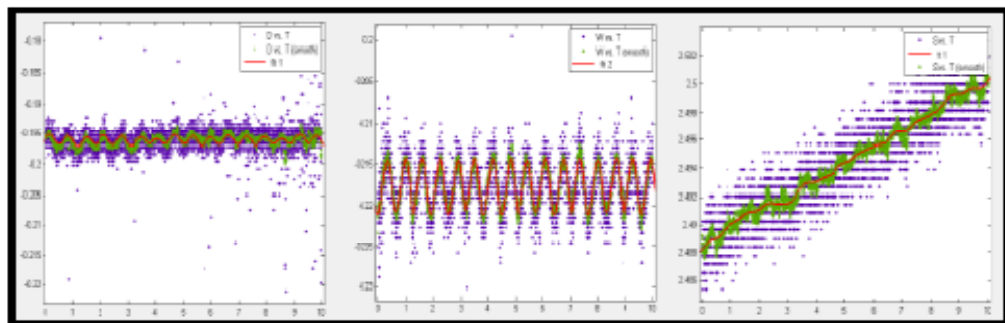


Figura A.11. Amplitud = 2 Pulg, Frecuencia = 1.5 Hz

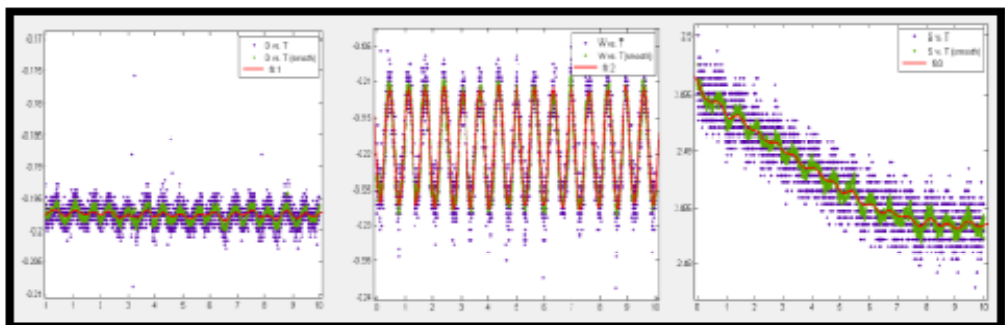


Figura A.12. Amplitud = 3 Pulg, Frecuencia = 1.5 Hz

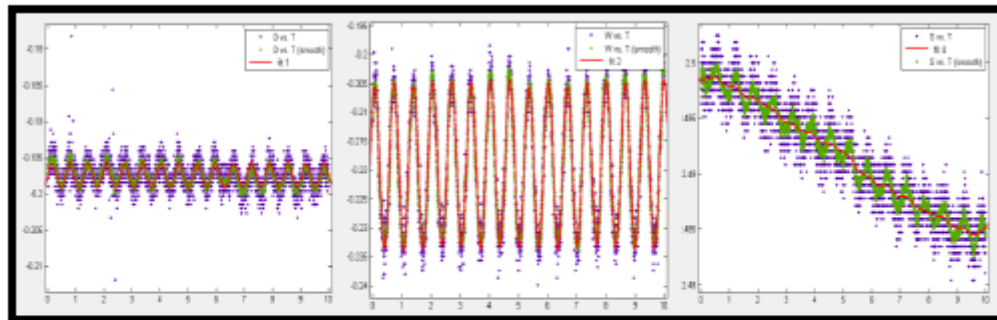


Figura A.13. Amplitud = 0.5 Pulg, Frecuencia = 2 Hz

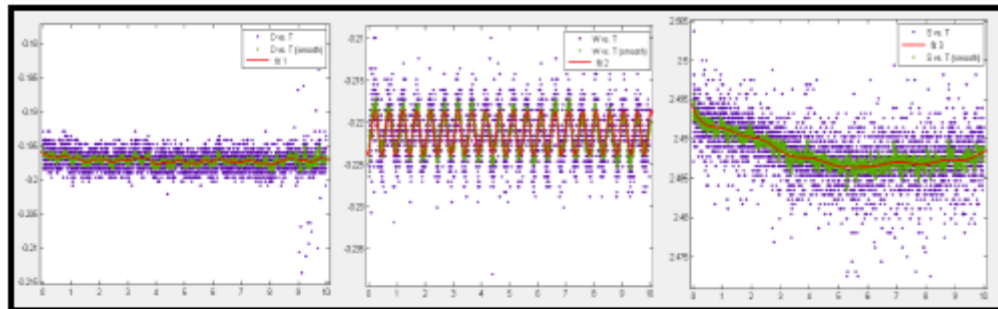


Figura A.14. Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 2 Hz

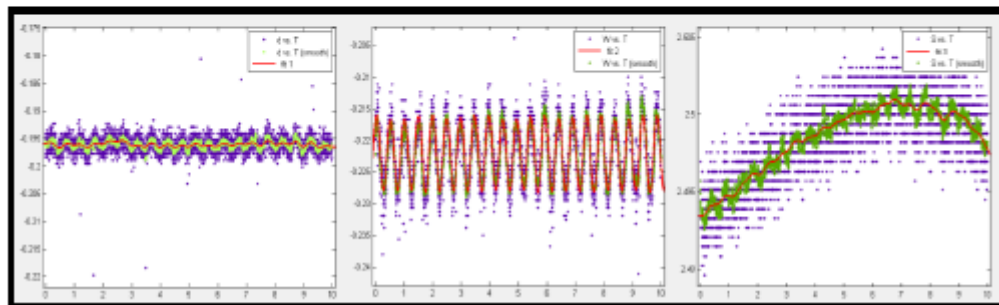


Figura A.15. Amplitud = 2 Pulg, Frecuencia = 2 Hz

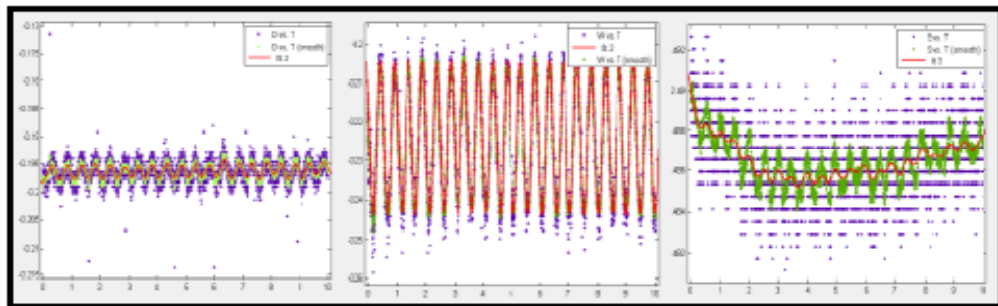


Figura A.16. Amplitud = 0.5 Pulg, Frecuencia = 2.2 Hz

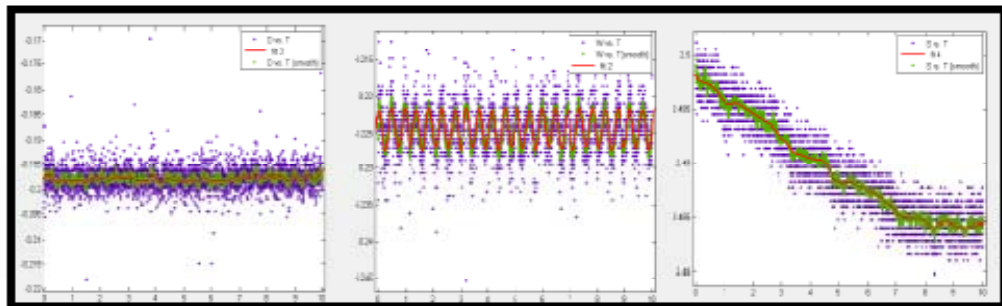


Figura A.17. Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 2.2 Hz

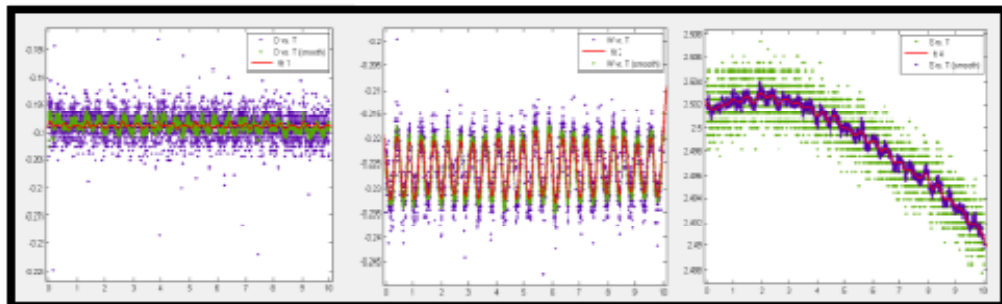


Figura A.18. Amplitud = 2 Pulg, Frecuencia = 2.2 Hz

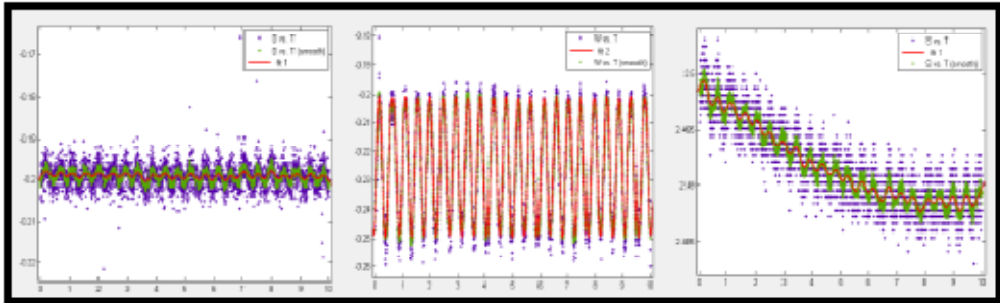


Figura A.19. Amplitud = 0.5 Pulg, Frecuencia = 3 Hz

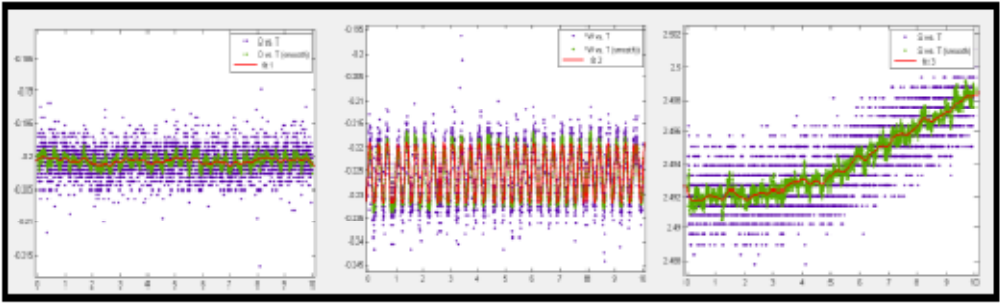
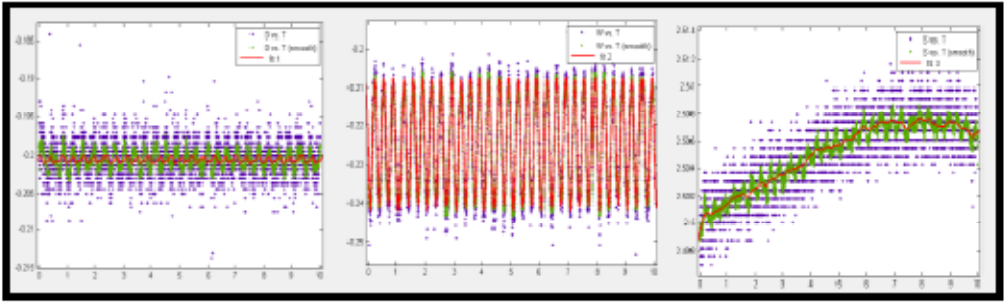


Figura A.20. Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 3 Hz



ANEXO B. REPRESENTACIÓN GRÁFICA EN DIRECCIÓN VERTICAL, VARIANDO FRECUENCIA Y AMPLITUD

Figura B.1. Amplitud = 0.5 Pulg, Frecuencia = 0.5 Hz

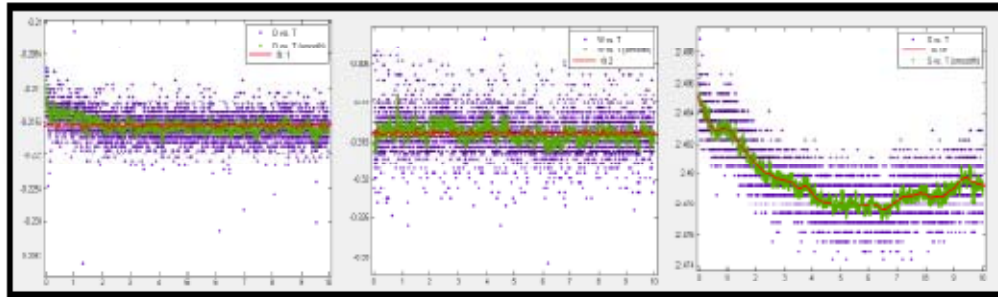


Figura B.2 Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 0.5 Hz

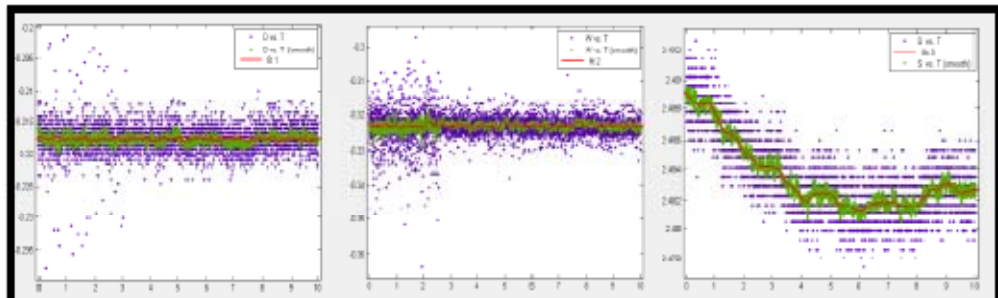


Figura B.3. Amplitud = 2 Pulg, Frecuencia = 0.5 Hz

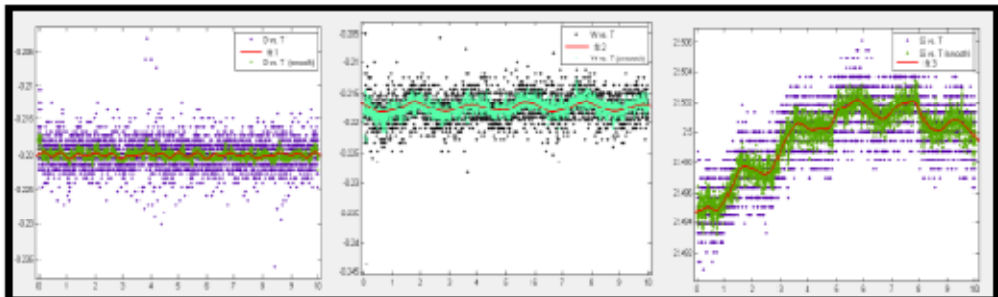


Figura B.4. Amplitud = 0.5 Pulg, Frecuencia = 1 Hz

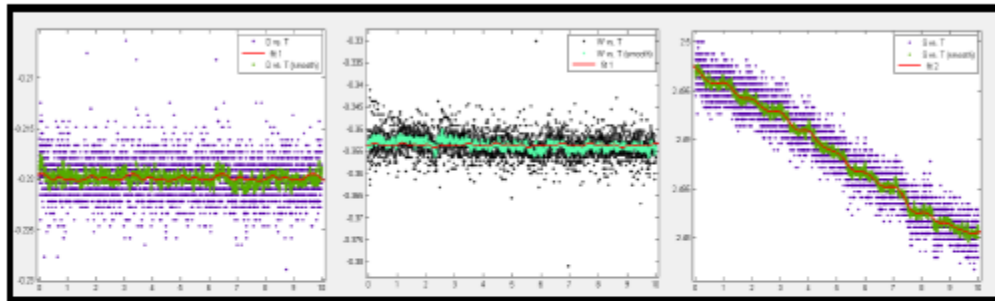


Figura B.5. Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 1 Hz

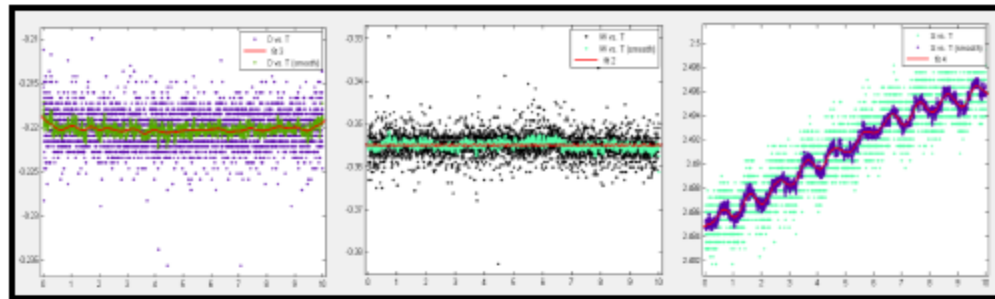


Figura B.6. Amplitud = 2 Pulg, Frecuencia = 1 Hz

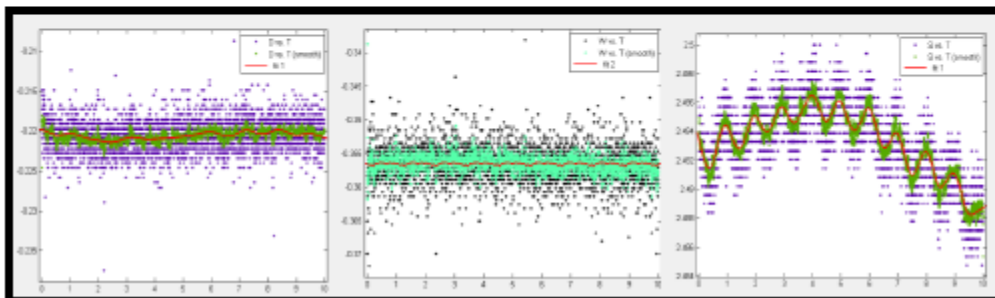


Figura B.7. Amplitud = 3 Pulg, Frecuencia = 1 Hz

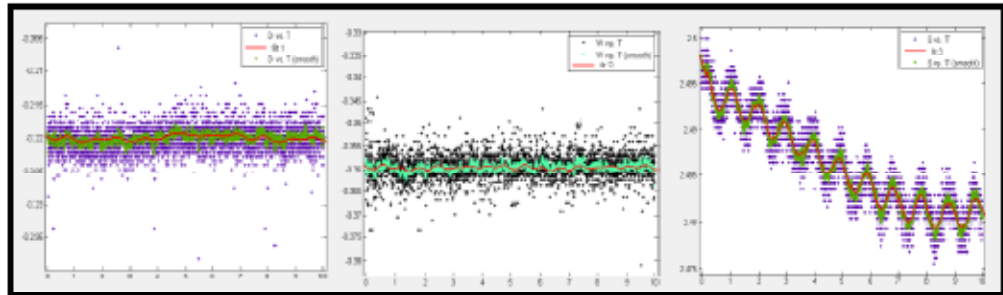


Figura B.8. Amplitud = 0.5 Pulg, Frecuencia = 1.5 Hz

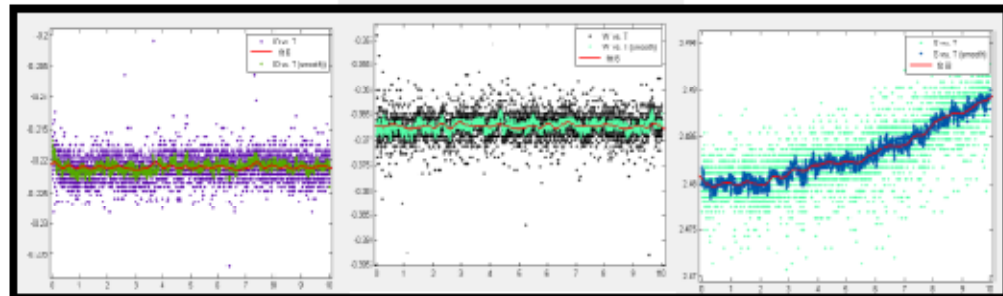


Figura B.9. Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 1.5 Hz

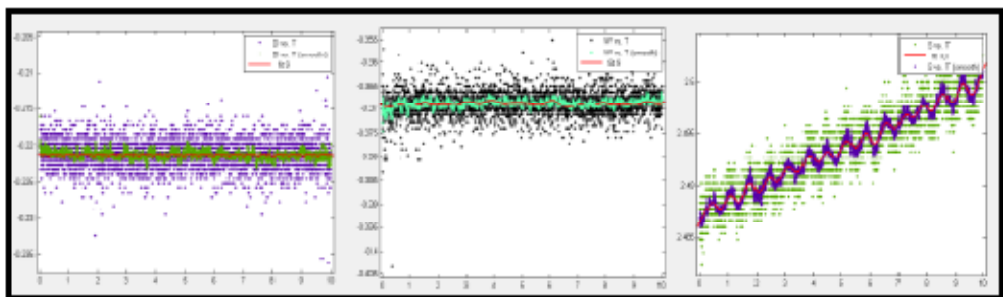


Figura B.10. Amplitud = 2 Pulg, Frecuencia = 1.5 Hz

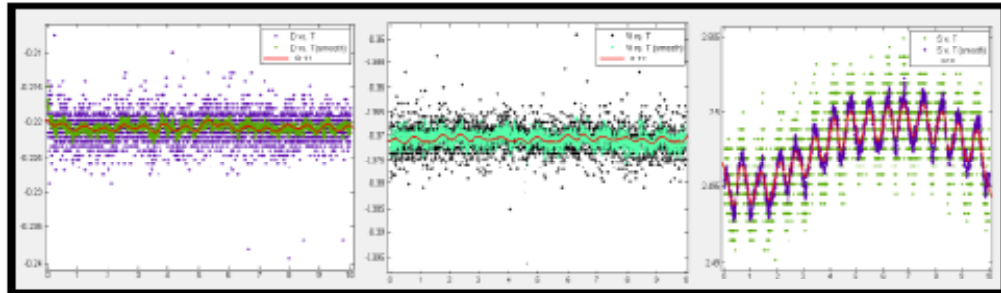


Figura B.11. Amplitud = 3 Pulg, Frecuencia = 1.5 Hz

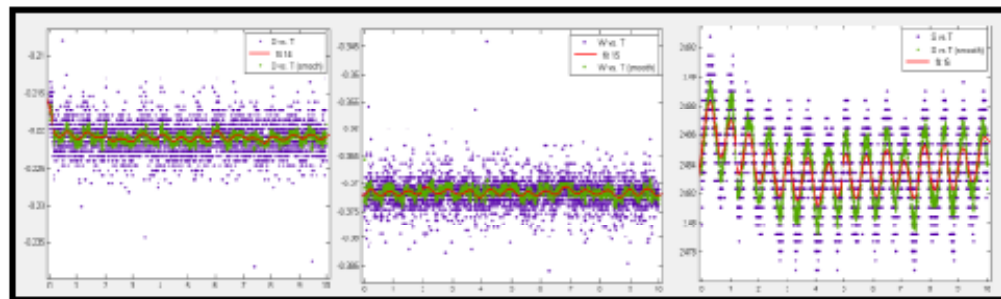


Figura B.12. Amplitud = 0.5 Pulg, Frecuencia = 2 Hz

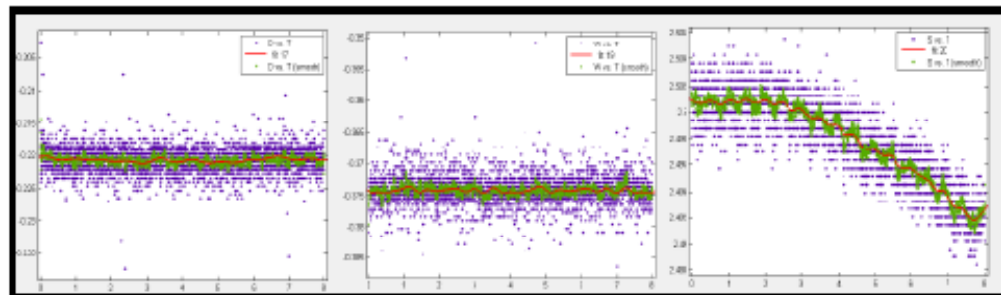


Figura B.13. Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 2 Hz

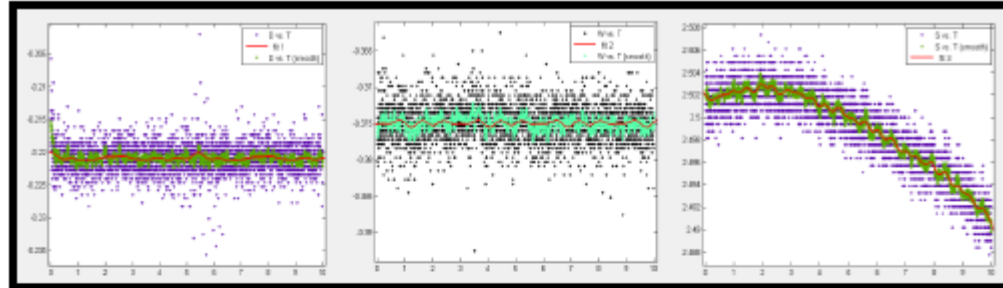


Figura B.14. Amplitud = 2 Pulg, Frecuencia = 2 Hz

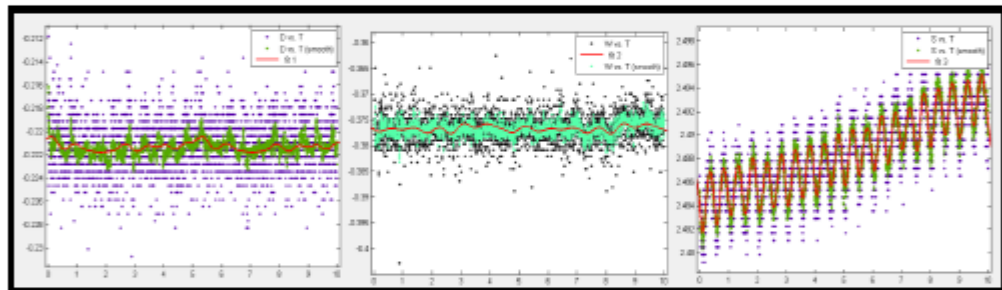


Figura B.15 Amplitud = 0.5 Pulg, Frecuencia = 2.2 Hz

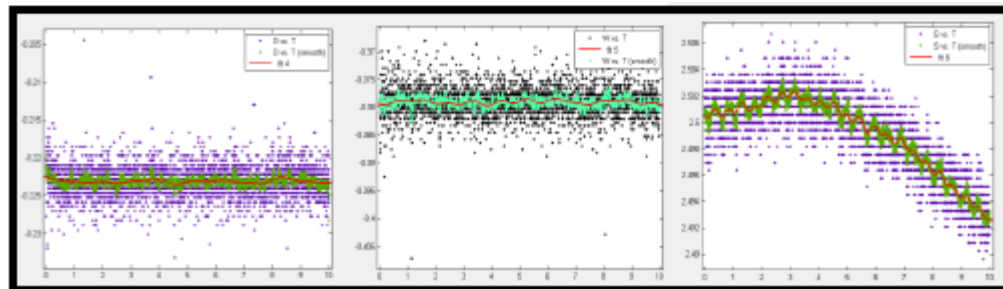


Figura B.16. Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 2.2 Hz

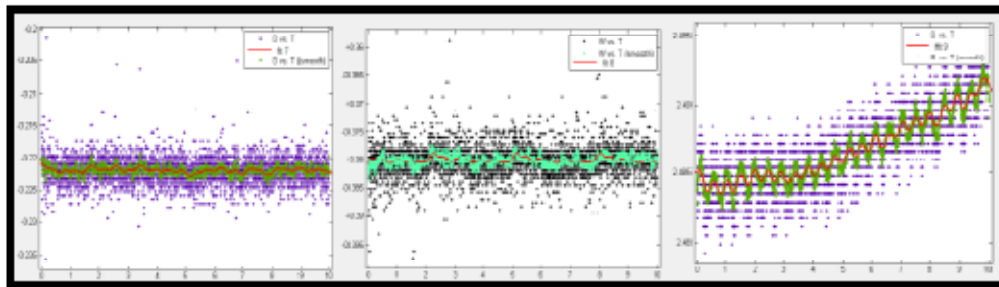


Figura B.17 Amplitud = 2 Pulg, Frecuencia = 2.2 Hz

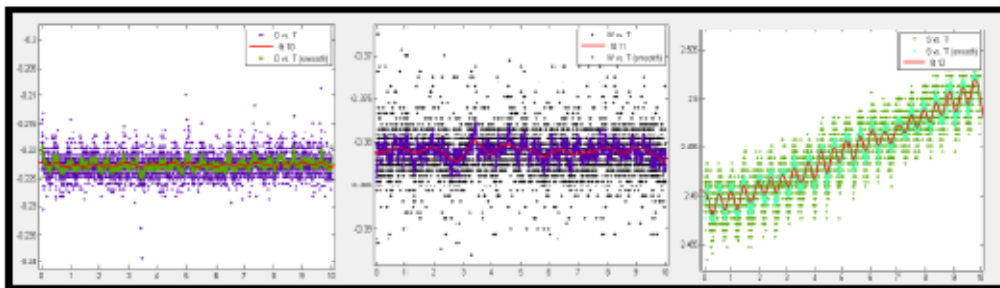


Figura B.18 Amplitud = 0.5 Pulg, Frecuencia = 3 Hz

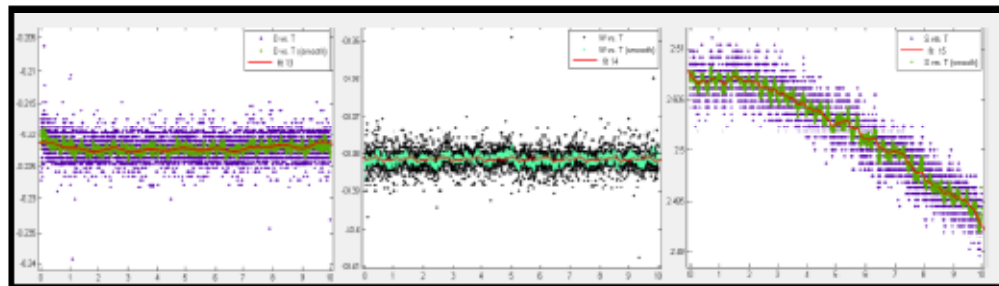


Figura B.19 Amplitud = 1 Pulg, Frecuencia = 3 Hz

