



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

**PRUEBAS DE LABORATORIO ESTÁTICAS Y DINÁMICAS CON PIEZÓMETROS
DE CUERDA VIBRANTE PARA PROPONER MEJORAS EN SUS
APLICACIONES DE CAMPO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RAFAEL GUSTAVO FERNÁNDEZ LABBÉ

PROFESOR GUÍA:
ROBERTO GESCHE SCHÜLER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SEBASTIÁN FINGERHUTH MASSMANN
GONZALO CORRAL JOFRÉ

SANTIAGO DE CHILE

2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: RAFAEL GUSTAVO FERNÁNDEZ LABBÉ
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: ROBERTO GESCHE SCHÜLER

PRUEBAS DE LABORATORIO ESTÁTICAS Y DINÁMICAS CON PIEZÓMETROS DE CUERDA VIBRANTE PARA PROPONER MEJORAS EN SUS APLICACIONES DE CAMPO

Los constantes avances y desarrollos en la ingeniería civil, en la tecnología y en los materiales de construcción han permitido la realización de proyectos cada vez de mayor magnitud, que puedan saciar las nuevas necesidades y demandas de una sociedad en constante desarrollo. Estos proyectos conllevan a su vez mayores impactos para la sociedad, ya sean positivos (beneficios) como también negativos (peligros), por lo que se deben tener presentes al momento del diseño, construcción y posterior puesta en marcha de la obra. Siguiendo lo anterior, cobra relevancia la instrumentación y el monitoreo de este tipo de estructuras. Dentro de este marco en Chile, la instrumentación geotécnica de suelos y estructuras conformadas por estos, como presas o depósitos de relaves, entre otras, ha tomado un rol crucial en situaciones mineras, con el objetivo de salvar vidas, disminuir costos y reducir riesgos. En particular, la medición de la presión de agua intersticial en los suelos es esencial, ya que afecta la capacidad resistente y la estabilidad de la obra. Dicho parámetro puede medirse mediante el uso de piezómetros.

Ahora bien, considerando la magnitud de los proyectos geotécnicos desarrollados en minería, se ha requerido la utilización de instrumentos y tecnología que entreguen datos fidedignos y en tiempo real para agilizar y optimizar el entendimiento del estado de las obras de infraestructura, y con ello disminuir el riesgo de quienes trabajen en ellas. Siguiendo lo anterior, el uso de piezómetros de cuerda vibrante se considera particularmente para este tipo de aplicaciones, donde se espera un monitoreo de la presión de agua en el suelo a largo plazo.

La motivación de este trabajo de título surge a partir de lo anterior, es decir, de la importancia que tiene el uso de estos piezómetros, por lo tanto, se establece la realización de siete pruebas de laboratorio (seis estáticas y una dinámica), con el objetivo general de determinar la exactitud y precisión de las mediciones (confiabilidad) de los piezómetros de cuerda vibrante al someterse a diferentes situaciones y con ello poder proponer mejoras en sus aplicaciones de campo, es decir, mejoras en su instalación, en su puesta en servicio y en su operación a largo plazo, indicando con ello las posibles limitaciones de su uso y las condiciones necesarias para su correcto funcionamiento. Además, con la finalidad de continuar el trabajo descrito en este informe y poder seguir avanzando con el entendimiento del comportamiento de estos sensores y su adecuado uso, se deja establecido un trabajo propuesto, considerando la realización de seis nuevas pruebas estáticas y dinámicas, tanto en laboratorio como en terreno.

Dedicado con mucho amor y cariño a mi familia, quienes me apoyaron incondicionalmente en este difícil y largo camino.

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres, Anka y Rafael, por haber estado siempre presentes, acompañándome en los momentos de grandes alegrías y risas como también conteniéndome en los no tan buenos. Muchas gracias por su amor, apoyo, comprensión, paciencia y constantes ánimos. Me han enseñado a ser la persona que soy hoy, mis principios y mis valores. Sin su apoyo incondicional no hubiera podido llegar hasta el final.

A mi hermana Claudia, quien me acompañó los últimos años acá en Santiago. Muchas gracias por ayudarme y apoyarme cuando lo necesitaba, por reírte de todo lo que digo y alegrar cada día. Se que serás una tremenda profesional, responsable y dedicada con tu trabajo y tus pacientes.

A mi hermano Javier, quien siempre tiene algo que contar y más de una risa sacar. Sigue siendo la gran persona que eres. Te deseo lo mejor para tu futuro. Siempre estaremos para ti.

Y a toda mi familia, por todas las risas, los grandes momentos y los buenos deseos cada vez que visitaba Arica, y que me permitían volver con toda la energía a afrontar los nuevos desafíos.

Quiero agradecer también a mi profesor guía, Roberto Gesche, por haberme permitido trabajar con él, por todo su apoyo, conocimientos, orientación y guía durante todo este proceso. Muchas gracias por su comprensión, disposición, paciencia y sus palabras de ánimo siempre, pero principalmente en los momentos cuando sentía que no avanzaba.

A mi profesor co-guía, Sebastián Fingerhuth, por su tremenda disposición y apoyo, por aclararme varias dudas y por sus palabras de ánimo cuando más las necesitaba. Muchas gracias por haber facilitado gran parte de los instrumentos necesarios para este trabajo.

Y a los encargados del Laboratorio de Sólidos, Medios Particulados y Estructuras, Omar González y Mario Carrillo, por toda la buena onda al momento de solicitar su ayuda. Muchas gracias por siempre estar dispuestos a ayudarme y a enseñarme cómo realizar ciertas pruebas.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis amigos de la vida, tanto de Arica como de Santiago, por pasar grandes momentos juntos, ya sea con alguna tarea, trabajo o estudio, así como también por siempre estar ahí cuando armaba algún partido de fútbol. Gracias a ustedes pude relajarme, alegrarme y reírme muchísimo.

Hoy puedo decir que termino este proceso con mucha felicidad y plenitud.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Introducción general	1
1.2.	Objetivos generales	3
1.3.	Objetivos específicos	3
1.4.	Alcances	3
1.5.	Metodología de trabajo	4
2.	Marco teórico	6
2.1.	Tipos de piezómetros	7
2.2.	Piezómetros de cuerda vibrante (CV)	11
2.2.1.	Funcionamiento piezómetro de cuerda vibrante.....	11
2.2.2.	Tipos de filtros	12
2.3.	Ventajas de los piezómetros de cuerda vibrante.....	14
2.4.	Desventajas de los piezómetros de cuerda vibrante	16
2.5.	Fiabilidad y rendimiento de los piezómetros de cuerda vibrante	16
2.6.	Precisión en las mediciones de los piezómetros de cuerda vibrante.....	18
2.7.	Errores en las mediciones de los piezómetros de cuerda vibrante.....	19
2.7.1.	Errores asociados a los filtros usados.....	19
2.7.2.	Errores asociados al mantenimiento	20
2.7.3.	Errores asociados a otros factores.....	20
2.8.	Métodos de instalación de los piezómetros de cuerda vibrante	21
2.8.1.	Método embebido en relleno de arena.....	21
2.8.2.	Método totalmente embebido en lechada de cemento	22
2.9.	Conceptos claves – Exactitud, Precisión y Error de medición	24
3.	Pruebas de laboratorio desarrolladas en este trabajo de título.....	26
3.1.	Piezómetros de cuerda vibrante (CV) utilizados	26
3.2.	Data logger y software utilizado	30
3.3.	Ensayos de suelo	35
3.3.1.	Ensayo de determinación de distribución granulométrica	35
3.3.2.	Ensayo de permeabilidad de carga constante	37
3.4.	Descripción de pruebas de laboratorio, estáticas y dinámicas, con piezómetros de cuerda vibrante (CV)	39

3.4.1.	Consideración de presión atmosférica – Lectura presión cero	41
3.4.2.	Verificación de calibración y prueba con carga hidráulica	42
3.4.3.	Verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros.....	43
3.4.4.	Verificación de mediciones con inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo)	45
3.4.5.	Verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo (dentro del contenedor)	46
3.4.6.	Verificación de mediciones con suelos de diferente permeabilidad.....	48
3.4.7.	Verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto).....	50
4.	Presentación de resultados	53
4.1.	Ensayos de suelo	53
4.1.1.	Ensayo de granulometría.....	53
4.1.2.	Ensayo de permeabilidad de carga constante	56
4.2.	Pruebas de laboratorio de los piezómetros de cuerda vibrante (CV).....	59
4.2.1.	Consideración de presión atmosférica – Lectura presión cero	60
4.2.2.	Verificación de calibración y prueba con carga hidráulica	62
4.2.3.	Verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros.....	63
4.2.4.	Verificación de mediciones con inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo)	65
4.2.5.	Verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo (dentro del contenedor)	71
4.2.6.	Verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad	75
4.2.7.	Verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto).....	77
5.	Análisis de los resultados – Pruebas de laboratorio	81
5.1.	Consideración de presión atmosférica – Lectura presión cero	81
5.2.	Verificación de calibración y prueba con carga hidráulica	82
5.3.	Verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros	83
5.4.	Verificación de mediciones con inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo).....	83

5.5.	Verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo (dentro del contenedor)	84
5.6.	Verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad	85
5.7.	Verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto)	86
6.	Conclusiones	88
7.	Trabajo propuesto.....	92
7.1.	Nueva verificación de mediciones con carga hidráulica	92
7.2.	Nueva verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo	92
7.3.	Tiempo de desaturación y saturación de los piezómetros de cuerda vibrante.....	93
7.4.	Nueva verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad.....	94
7.5.	Verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas sísmicas)	94
7.6.	Verificación de instalación y mediciones en un entorno de grout	94
8.	Bibliografía.....	96
Anexo A – Pruebas de laboratorio		99
A.1.	Capacidad máxima y error de medición de los piezómetros de cuerda vibrante (CV) utilizados	99
A.2.	Ensayo de granulometría	100
A.2.1.	Memoria de cálculo	101
A.3.	Ensayo de permeabilidad de carga constante	102
A.3.1.	Memoria de cálculo	102
Anexo B – Hojas de calibración		103
B.1.	Piezómetro CV – P190050. Sisgeo	103
B.2.	Piezómetro CV – P190051. Sisgeo	105
B.3.	Piezómetro CV – P190052. Sisgeo	107
B.4.	Piezómetro CV – P180263. Sisgeo	109
B.5.	Piezómetro CV – P171023. Sisgeo	110
B.6.	Piezómetro CV – P349983. Geosense	111
B.7.	Piezómetro CV – P571501. ACE	112

Índice de Tablas

Tabla 1: Diferencias entre filtros de piezómetros de cuerda vibrante (Roctest, 2014)	14
Tabla 2: Descripción de los piezómetros CV utilizados (elaboración propia).....	27
Tabla 3: Pruebas de laboratorio desarrolladas en este trabajo de título (elaboración propia)....	40
Tabla 4: Peso de la muestra de arena de mayor permeabilidad	53
Tabla 5: Datos ensayo de granulometría. Arena de mayor permeabilidad	53
Tabla 6: Diámetros característicos de la arena de mayor permeabilidad	54
Tabla 7: Coeficientes de uniformidad y curvatura de la arena de mayor permeabilidad	54
Tabla 8: Peso de la muestra de arena de relaves de menor permeabilidad	55
Tabla 9: Datos ensayo de granulometría. Arena de relaves de menor permeabilidad.....	55
Tabla 10: Diámetros característicos de la arena de relaves de menor permeabilidad	56
Tabla 11: Coeficientes de uniformidad y curvatura de la arena de relaves de menor permeabilidad	56
Tabla 12: Datos ensayo de permeabilidad de carga constante. Arena de mayor permeabilidad	56
Tabla 13: Resultados ensayo de permeabilidad de carga constante. Arena de mayor permeabilidad	57
Tabla 14: Coeficientes de permeabilidad. Arena de mayor permeabilidad	57
Tabla 15: Datos ensayo de permeabilidad de carga constante. Arena de relaves de menor permeabilidad	58
Tabla 16: Resultados ensayo de permeabilidad de carga constante. Arena de relaves de menor permeabilidad	58
Tabla 17: Coeficientes de permeabilidad. Arena de relaves de menor permeabilidad.....	58
Tabla 18: Presión registrada por el piezómetro CV P571501 en condición saturada y no saturada.....	60
Tabla 19: Grado de exactitud con respecto a la capacidad máxima de medición.....	85
Tabla 20: Resultados ensayo de verificación de mediciones con suelo de menor permeabilidad	86
Tabla A.1: Características de los piezómetros CV utilizados.....	99

Índice de Ilustraciones

Figura 1: Esquema piezómetro de tubo vertical o tipo Casagrande (Sisgeo, 2014).	8
Figura 2: Principio de medición de un piezómetro neumático (Dunncliff, 1993).....	9
Figura 3: Piezómetros piezo-resistivos (Sisgeo, Piezómetros Piezo-Resistivos, 2015).....	9
Figura 4: Piezómetros de cuerda vibrante (Sisgeo, Piezómetros de Cuerda Vibrante, 2020)....	10
Figura 5: Esquema piezómetro de cuerda vibrante (Geosense, 2020).....	12
Figura 6: Filtros de piezómetros de cuerda vibrante, LAE (gris oscuro) y HAE (blanco).....	13
Figura 7: Esquema instalación método embebido en relleno de arena. Piezómetro de tubo abierto (Ingeniería GCE, 2018).	21
Figura 8: Esquema instalación método embebido en relleno de arena. Piezómetro de cuerda vibrante (Ingeniería GCE, 2018).	21
Figura 9: Esquema instalación método embebido en lechada de cemento o grouted (Canary Systems, 2019).....	22
Figura 10: Gráfico Exactitud v/s Precisión, conceptos claves en este trabajo de título (Precisión y exactitud, 2022).	25
Figura 11: Esquema Exactitud v/s Precisión, conceptos claves en este trabajo de título (Zita Fernandes, 2017).	25
Figura 12: Gráfico y esquema Exactitud v/s Precisión, conceptos claves en este trabajo de título (QBPROFE, 2020).....	25
Figura 13: Analizador dinámico de cuerda vibrante de 8 canales, modelo CDM-VW305, marca Campbell Scientific.	31
Figura 14: Data logger CDM-VW305 en funcionamiento, 4 piezómetros CV conectados en simultáneo.	31
Figura 15: Data logger CDM-VW305 en funcionamiento, 7 piezómetros CV conectados en simultáneo.	32
Figura 16: DVW Toolbox - Configuración establecida para las pruebas de laboratorio estáticas y dinámicas.	33
Figura 17: Gráfico en tiempo real de la frecuencia dinámica de salida v/s el tiempo de cada piezómetro CV.....	34
Figura 18: DVW Toolbox - Alerta de advertencia. Se debe reajustar la Amplitud Resonante. ...	35
Figura 19: Set de tamices ASTM tipo.....	36
Figura 20: Esquema representativo del ensayo de permeabilidad de carga constante.	37
Figura 21: Ensayo de permeabilidad de carga constante - Preparación.....	38
Figura 22: Ensayo de permeabilidad de carga constante - Ejecución.	38
Figura 23: Ensayo de consideración de presión atmosférica. Sin filtro. Condición no saturada.	42

Figura 24: Ensayo de verificación de calibración y prueba con carga hidráulica. Sin filtro. Condición saturada.....	43
Figura 25: Ensayo de verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros. Filtros HAE. Condición saturada.	44
Figura 26: Ensayo de verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros. Filtros LAE. Condición no saturada.	44
Figura 27: Ensayo de verificación de mediciones con inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Sin filtro. Condición saturada.....	46
Figura 28: Configuración realizada para generar flujo en el sistema.....	47
Figura 29: Ingreso del agua por la zona inferior del contenedor.....	47
Figura 30: Ensayo de verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Filtros HAE. Condición saturada.....	48
Figura 31: Ensayo de verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Filtros LAE. Condición saturada.....	48
Figura 32: Nuevo sistema de evacuación de agua.....	49
Figura 33: Abertura superior sellada.....	49
Figura 34: Ensayo de verificación de mediciones con suelos de diferente permeabilidad. Arena (SP) de mayor permeabilidad. Condición saturada.....	50
Figura 35: Ensayo de verificación de mediciones con suelos de diferente permeabilidad. Arena de relaves (SP-SM) de menor permeabilidad. Condición saturada.....	50
Figura 36: Ensayo de verificación de mediciones en presencia de movimiento (se muestra secuencia de pruebas de impacto). Arena (SP) de mayor permeabilidad. Condición saturada.....	52
Figura 37: Ensayo de verificación de mediciones en presencia de movimiento (se muestra secuencia de pruebas de impacto). Arena de relaves (SP-SM) de menor permeabilidad. Condición saturada.	52
Figura 38: Curva de distribución granulométrica (CDG). Arena de mayor permeabilidad.....	54
Figura 39: Curva de distribución granulométrica (CDG). Arena de relaves de menor permeabilidad.....	55
Figura 40: Ejemplo gráfico ensayo consideración de presión atmosférica. Sin filtro. Condición no saturada.	59
Figura 41: Ejemplo gráfico ensayo de disminución de carga hidráulica. Filtro LAE. Condición saturada.	59
Figura 42: Ensayo 1 lectura presión cero. Sin filtro/ filtro LAE/ filtro HAE. Condición saturada..	60
Figura 43: Ensayo 1 lectura presión cero. Sin filtro. Condición saturada v/s no saturada.....	61
Figura 44: Ensayo 1 lectura presión cero. Filtro LAE. Condición saturada v/s no saturada.....	61
Figura 45: Ensayo 1 lectura presión cero. Filtro HAE. Condición saturada v/s no saturada.	62

Figura 46: Ensayo 2 carga hidráulica. Sin filtro. Condición saturada.....	62
Figura 47: Ensayo 2 carga hidráulica. Filtro LAE. Condición saturada.	63
Figura 48: Ensayo 3 distintas condiciones de saturación. Sin filtro. Condición saturada.	63
Figura 49: Ensayo 3 distintas condiciones de saturación. Filtro LAE. Condición no saturada. ..	64
Figura 50: Ensayo 3 distintas condiciones de saturación. Filtro LAE. Condición saturada.	64
Figura 51: Ensayo 3 distintas condiciones de saturación. Filtro HAE. Condición no saturada...	65
Figura 52: Ensayo 3 distintas condiciones de saturación. Filtro HAE. Condición saturada.....	65
Figura 53: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Sin filtro. Posición horizontal.	66
Figura 54: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Sin filtro. Posición vertical apuntando hacia abajo.....	66
Figura 55: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Sin filtro. Posición vertical apuntando hacia arriba.	67
Figura 56: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro LAE. Posición horizontal.	68
Figura 57: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro LAE. Posición vertical apuntando hacia abajo.....	68
Figura 58: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro LAE. Posición vertical apuntando hacia arriba.	69
Figura 59: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro HAE. Posición horizontal.	70
Figura 60: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro HAE. Posición vertical apuntando hacia abajo.....	70
Figura 61: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro HAE. Posición vertical apuntando hacia arriba.	71
Figura 62: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Primer grupo. Sin filtro.	72
Figura 63: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Primer grupo. Filtro LAE.....	72
Figura 64: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Primer grupo. Filtro HAE.....	73
Figura 65: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Segundo grupo. Sin filtro.	74
Figura 66: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Segundo grupo. Filtro LAE.....	74
Figura 67: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Tercer grupo. Filtro HAE.....	75

Figura 68: Ensayo 6 verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad. Arena (SP) de mayor permeabilidad.....	76
Figura 69: Ensayo 6 verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad. Arena de relaves (SP-SM) de menor permeabilidad.....	76
Figura 70: Ensayo 7 verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto). Primer grupo. Arena (SP) de mayor permeabilidad.....	78
Figura 71: Ensayo 7 verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto). Primer grupo. Arena de relaves (SP-SM) de menor permeabilidad.	78
Figura 72: Ensayo 7 verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto). Segundo grupo. Arena (SP) de mayor permeabilidad.	79
Figura 73: Ensayo 7 verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto). Segundo grupo. Arena de relaves (SP-SM) de menor permeabilidad.	80
Figura A.1: Curva Granulométrica.....	100
Figura A.2: Tabla para clasificación de suelos según ASTM D2487. Budhu (2011).	100
Figura B.1: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190050. Sisgeo. Parte 1 de 2.....	103
Figura B.2: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190050. Sisgeo. Parte 2 de 2.....	104
Figura B.3: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190051. Sisgeo. Parte 1 de 2.....	105
Figura B.4: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190051. Sisgeo. Parte 2 de 2.....	106
Figura B.5: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190052. Sisgeo. Parte 1 de 2.....	107
Figura B.6: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190052. Sisgeo. Parte 2 de 2.....	108
Figura B.7: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P180263. Sisgeo.	109
Figura B.8: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P171023. Sisgeo.	110
Figura B.9: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P349983. Geosense.	111
Figura B.10: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P571501. ACE.....	112

1. Introducción

1.1. Introducción general

A lo largo de toda la historia, la ingeniería y los avances que han ido ligados a ella han hecho posible el desarrollo de la humanidad, permitiendo con el paso de los años una notable mejora de la calidad de vida de las personas. En este sentido la ingeniería civil en particular ha tenido un papel fundamental en la capacidad del ser humano para adaptarse a su entorno gracias a la construcción de infraestructuras que han facilitado el transporte de materiales y personas, la comunicación, la captación de recursos naturales o la propia residencia y convivencia. Los nuevos avances y desarrollos en la disciplina, en la tecnología y en los materiales de construcción han permitido la realización de proyectos cada vez de mayor magnitud, que puedan saciar las nuevas necesidades y demandas de una sociedad en constante desarrollo. Los proyectos de mayor magnitud conllevan a su vez mayores impactos, ya sean positivos (beneficios) como también negativos (peligros), por lo que se deben tener presentes al momento del diseño, construcción y posterior puesta en marcha.

Siguiendo lo anterior, cobra relevancia la instrumentación y el monitoreo de las estructuras de gran magnitud durante su construcción y toda su vida útil. Por lo tanto, es necesaria la realización de mediciones para entender la condición de la obra y compararla con las condiciones para las cuales fue diseñada, y con ello determinar si las consideraciones establecidas en el diseño se realizaron correctamente, o si es necesario modificar o adecuar el diseño para cumplir las nuevas condiciones encontradas dentro de la estructura, ya sean por factores externos o por variables controladas y contempladas inicialmente.

En Chile la instrumentación y el monitoreo es fundamental en el campo de la ingeniería geotécnica, debido a los altos niveles de actividad sísmica¹ y que la minería es uno de los pilares más sólidos en que se sustenta el desarrollo económico y social del país². Dentro de este marco, la instrumentación geotécnica de suelos y estructuras conformadas por estos, como presas o depósitos de relaves, entre otras, ha tomado un rol importante en situaciones mineras, con el objetivo de salvar vidas, disminuir costos y reducir riesgos, al entregar información anticipada de un comportamiento inesperado e indeseado (W. Allen Marr, 2007). Para este tipo de proyectos, la presión de agua intersticial en los suelos toma un rol relevante, ya que altera el comportamiento real de estos, afectando la capacidad resistente y la estabilidad de la obra. Si bien existen diferentes instrumentos para medir esta variable, se miden principalmente con distintos piezómetros o celdas de presión a lo largo de la obra (Central Water Commission, 2018).

¹ Recuperado el 03 de noviembre de 2022, de <https://www.t13.cl/noticia/nacional/expertos-explican-hay-tantos-temblores-chile>

² SERNAGEOMIN. (2020). *Anuario de la minería de Chile*.

Existen dos tipos básicos de piezómetros para realizar mediciones de presión; los sensores hidráulicos, en los cuales la presión se obtiene directamente del efecto del agua en el instrumento, y los sensores eléctricos, en los cuales la presión se mide mediante manómetros o sensores neumáticos. Dentro de estos últimos se encuentran los piezómetros de cuerda vibrante. Las aplicaciones típicas de los piezómetros de cuerda vibrante, además de medir la presión de agua intersticial en los suelos, incluyen la evaluación de la estabilidad de taludes, deshidratación y gradientes hidráulicos en presas, y también niveles de agua subterránea. También se pueden usar para monitorear las presiones de levantamiento en presas de gravedad (Sisgeo, Piezómetros de Cuerda Vibrante, 2020).

Ahora bien, considerando la magnitud de los proyectos geotécnicos desarrollados en minería, se ha requerido la utilización de instrumentos autónomos³ que entreguen datos fidedignos y en tiempo real para agilizar y optimizar el entendimiento del estado de las obras de infraestructura, con el objetivo de tener mayor control de los problemas que pudieran surgir y con ello disminuir el riesgo de quienes trabajen en ellas. Siguiendo lo anterior, el uso de sensores de cuerda vibrante en el campo de la geomecánica se considera particularmente para este tipo de aplicaciones, donde se espera un monitoreo de la presión de agua en el suelo a largo plazo (Choquet, Juneau, Debreuille, & Bessette, 1999).

Por lo tanto, considerando la relevancia que tiene el uso de piezómetros de cuerda vibrante y el impacto que tienen sus mediciones sobre el riesgo de los trabajadores, surge la motivación de este trabajo de título, en donde la verificación de las mediciones obtenidas por estos instrumentos autónomos, mediante una serie de pruebas de laboratorio con diferentes ambientes y configuraciones, es necesaria para determinar la confiabilidad de estos, además de su correcto uso, y luego poder proponer mejoras en sus instalaciones y aplicaciones de campo.

En este trabajo se realizan siete pruebas de laboratorio, de las cuales seis son estáticas y una es dinámica, con el objetivo general de determinar la exactitud y precisión de las mediciones de los piezómetros de cuerda vibrante al someterse a diferentes situaciones. Al principio las mediciones se llevan a cabo en ambientes sin agua y sin suelo, luego sólo con agua y posteriormente con agua y suelo. En cuanto a las configuraciones, se consideran tres posiciones diferentes de colocación del instrumento, se utilizan dos tipos de filtros y se ejercen diferentes cargas de agua (presiones) sobre los sensores.

En particular, las primeras pruebas tienen como objetivo determinar la relevancia que tiene la saturación del instrumento en las mediciones, es decir, que tan exactas y precisas son, y cómo estas varían de acuerdo al tipo de filtro utilizado. Por otro lado, la finalidad de las pruebas con diferentes suelos saturados es poder determinar la posición óptima de colocación de los piezómetros de cuerda vibrante, es decir, la posición que permita realizar mediciones más exactas, así como también evidenciar las diferencias al medir en suelos con diferente permeabilidad a través de las pruebas de impacto dinámico, en donde se observa el tiempo de

³ Instrumentación autónoma: instrumentos que puedan medir, registrar y enviar los datos por su propia cuenta.

respuesta y de recuperación de los piezómetros de cuerda vibrante frente a cambios rápidos y bruscos en el ambiente, como los movimientos generados por un sismo. De esta manera se pueden además determinar las limitaciones que posee el instrumento, dependiendo del suelo en el que esté midiendo o de la capacidad máxima de medición que tenga.

1.2. Objetivos generales

Este trabajo de título pretende proponer mejoras en las aplicaciones de campo de los piezómetros de cuerda vibrante, es decir, mejoras en la instalación, en la puesta en servicio y en la operación de éstos, indicando con ello las posibles limitaciones de su uso y las condiciones necesarias para su correcto funcionamiento. Además, con el objetivo de continuar el trabajo descrito en este informe y poder seguir avanzando con el entendimiento del comportamiento de estos sensores y su adecuado uso, se dejará establecido un trabajo propuesto, considerando la realización de seis nuevas pruebas estáticas y dinámicas, tanto en laboratorio como en terreno.

1.3. Objetivos específicos

Para poder dar cumplimiento al objetivo descrito anteriormente, se contemplan los siguientes objetivos específicos:

- Realizar pruebas estáticas y dinámicas en el Laboratorio de Sólidos, Medios Particulados y Estructuras de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile, con el objetivo de verificar el funcionamiento y respuesta de los sensores de cuerda vibrante en condiciones controladas.
- Analizar y evaluar los resultados obtenidos de las pruebas mencionadas anteriormente.
- Proponer mejoras en las aplicaciones de campo de los piezómetros de cuerda vibrante, en base a los resultados y las conclusiones de cada una de las pruebas estáticas y dinámicas llevadas a cabo.

1.4. Alcances

Como se menciona anteriormente, este trabajo de título pretende proponer mejoras en las aplicaciones de campo de los piezómetros de cuerda vibrante, indicando las limitaciones de su uso y las condiciones necesarias para su correcto funcionamiento. Además, se dejará establecido un trabajo propuesto con el objetivo de seguir ahondando en la investigación del funcionamiento de los piezómetros de cuerda vibrante. Es por lo anterior que a continuación se indican las condiciones y limitaciones del trabajo realizado.

- Las distintas pruebas, tanto estáticas como dinámicas, se llevan a cabo sólo en el Laboratorio de Sólidos, Medios Particulados y Estructuras de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile.

-
- Se utilizan siete piezómetros de cuerda vibrante, de los cuales tres son de iguales características de fabricación. Por lo tanto, es posible realizar una comparación directa entre los diferentes piezómetros para evidenciar si existen semejanzas o diferencias en los resultados obtenidos, así como también en el caso de los que son iguales, y que en principio no debieran presentar alguna variación.
 - Las diferentes pruebas que se llevan a cabo se ven limitadas por la altura del contenedor de acrílico en el cual se realizan. Por lo tanto, la altura máxima de agua posible es de 60 cm. Una prueba en particular se lleva a cabo usando un permeámetro de carga constante⁴, permitiendo ampliar la altura de agua hasta 2,4 m.
 - Las pruebas dinámicas corresponden a pruebas de impacto, por lo que la respuesta de cada instrumento se ve influenciada por la intensidad con la cual se golpea la masa situada sobre cada uno de los dos suelos ensayados.

1.5. Metodología de trabajo

Este trabajo de título, en un principio, se basa principalmente en la búsqueda y revisión bibliográfica referente al tema en cuestión, es decir, al uso en particular de los piezómetros de cuerda vibrante, para luego poder llevar a cabo una serie de diferentes pruebas de laboratorio (7 en total), tanto estáticas como dinámicas, y con ello finalmente poder proponer mejoras en las aplicaciones de campo de estos instrumentos. Con lo anterior en cuenta, se detalla a continuación la metodología que se lleva a cabo.

- a. Recopilación y revisión bibliográfica referente al uso de piezometría en general y en particular de los piezómetros de cuerda vibrante: textos, artículos o informes relacionados a tranques de relaves, al análisis del comportamiento del suelo por infiltración, al uso del piezómetro de cuerda vibrante como herramienta, manuales y catálogos de estos, tesis relacionadas al tema, etc.
- b. Familiarización de los piezómetros de cuerda vibrante disponibles: revisión de manuales y catálogos de los instrumentos disponibles, revisión de las hojas de calibración, revisión de tesis en donde se utilicen piezómetros, etc.
- c. Establecer las visitas al laboratorio durante el semestre: verificación del estado del laboratorio (habilitado o no dada la situación actual de pandemia), revisión de permisos, formularios y protocolos necesarios para el ingreso al laboratorio; determinación de la cantidad de visitas posibles al laboratorio; verificación de los instrumentos y espacios de trabajo disponibles, y la identificación de los materiales a utilizar.

⁴ Permeámetro de carga constante: el permeámetro es un aparato que sirve para medir la permeabilidad de los materiales ante el paso de fluidos a través de ellos. Es un método directo de medir el coeficiente de permeabilidad. En particular, el permeámetro de carga constante permite mantener el nivel de agua constante en el tubo que conecta con la muestra de suelo.

-
- d. Identificación de las pruebas de laboratorio: definición, descripción y caracterización de las pruebas de laboratorio, identificación de cada instrumento y material asociado a cada prueba, metodología de cada una de las pruebas de laboratorio, plan de ejecución de estas, y definición de las visitas al laboratorio para la ejecución de las pruebas.
 - e. Realización de las pruebas de laboratorio: distintos ambientes y configuraciones controladas, como, por ejemplo, distintos medios materiales (granulares o líquidos), flujo dentro del sistema, posición y colocación de los instrumentos al interior del contenedor, uso de distintos filtros de piezómetros, pruebas dinámicas en el sistema mediante impacto, entre otras.
 - f. Interpretación y análisis de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas de laboratorio.
 - g. Finalmente, proponer mejoras en las aplicaciones de campo de los piezómetros de cuerda vibrante.

2. Marco teórico

Para un proyecto de ingeniería civil relacionado con el suelo, ya sean presas, tranques de relaves, entre otras, la presencia de agua toma un rol relevante, ya que altera el comportamiento real de estos, afectando su capacidad resistente y su estabilidad. La reducción de la resistencia al corte, producto, a su vez, de la reducción de la cohesión aparente por la presencia de agua, afecta la estabilidad de la estructura, generando en el peor de los casos movimientos en masa. Por estos motivos es importante monitorear el nivel y los lugares en donde se encuentra presente el agua.

Ahora bien, para este tipo de proyectos de gran envergadura, en donde se debe tener un monitoreo constante y frecuente, y en donde además los puntos de interés son difíciles de acceder, resulta tan relevante la utilización de instrumentación autónoma, es decir, instrumentos que puedan medir, registrar y enviar los datos por su propia cuenta, sobre todo en lugares inaccesibles. En años recientes, la tecnología de los instrumentos y dispositivos autónomos para medir la filtración, las tensiones, las presiones de agua intersticial en los suelos y los movimientos ha mejorado perceptiblemente con respecto a exactitud, rapidez, confiabilidad y a economía. El proceso de autonomía incluye generalmente un instrumento que se une a un data logger o a una computadora con capacidad de comunicación, lo que permite la recolección de los datos, tanto en forma local como remota. Los sistemas de monitoreo autónomos le proveen al ingeniero una poderosa herramienta, que utilizada apropiadamente, contribuye al diseño, construcción y operación de grandes proyectos geotécnicos.

Dentro de este marco, los instrumentos autónomos más utilizados hoy en día, dadas sus características, para medir presiones de agua intersticial en los suelos de forma exacta, rápida, confiable y remota son los piezómetros de cuerda vibrante. Por lo tanto, teniendo presente lo expuesto en los puntos anteriores, se revisarán los siguientes temas específicos para dar contexto a este trabajo:

1. Tipos de piezómetros.
2. Piezómetros de cuerda vibrante.
3. Ventajas y desventajas de los piezómetros de cuerda vibrante.
4. Fiabilidad y rendimiento de los piezómetros de cuerda vibrante.
5. Precisión y errores en las mediciones de los piezómetros de cuerda vibrante.
6. Métodos de instalación de los piezómetros de cuerda vibrante: embebido en relleno de arena y totalmente embebido en lechada de cemento.

2.1. Tipos de piezómetros

Si bien existen diferentes instrumentos para la medición de datos físicos, la presión de agua, presión de poros y la cantidad de agua que existe en un embalse o presa, se mide principalmente con distintos piezómetros y celdas de presión a lo largo de la obra (Central Water Commission, 2018). Existen dos tipos básicos de piezómetros para realizar mediciones de presión, estos son:

- Sensores hidráulicos, en los cuales la presión se obtiene directamente del efecto del agua en el instrumento.
- Sensores eléctricos, en los cuales la presión se mide mediante manómetros o sensores neumáticos.

Dentro de los primeros, es decir, los sensores hidráulicos, se encuentran los **piezómetros de tubo vertical** (standpipe piezometers, en inglés), también conocidos como **piezómetros tipo Casagrande**. Generalmente son construidos con una base porosa o ranurada en el fondo, un recubrimiento en las paredes de la perforación y un cierre en la superficie con bentonita o cemento para evitar que el agua superficial entre en el agujero (*Figura 1*). La realización de estas perforaciones y el tratado de sus paredes dependerá del tipo de suelo en donde se quiera realizar. Para suelo con alta permeabilidad como la arena o suelos de mayor tamaño, son de rápida construcción y confiables, mientras que, para suelos finos, se deben tener más consideraciones debido a la baja permeabilidad de estos. La altura que alcanza el nivel de agua dentro del tubo piezométrico se determina introduciendo por el interior del tubo una sonda eléctrica o pozómetro junto a una cinta métrica. La altura del nivel de agua, equivalente a la presión que tiene el agua del suelo in-situ (presión de poros), se determina fácilmente como la diferencia entre la profundidad de la base porosa y la profundidad del nivel del agua dentro del tubo (Dunnicliff, 1993).

La principal desventaja de este tipo de piezómetros es su lenta respuesta a cambios de presión del agua, debido a la necesidad de que un volumen relativamente alto de agua entre o salga del elemento poroso, a fin de establecer el equilibrio mediante el correspondiente cambio en la altura de la columna de agua dentro del tubo (Dunnicliff, 1993).

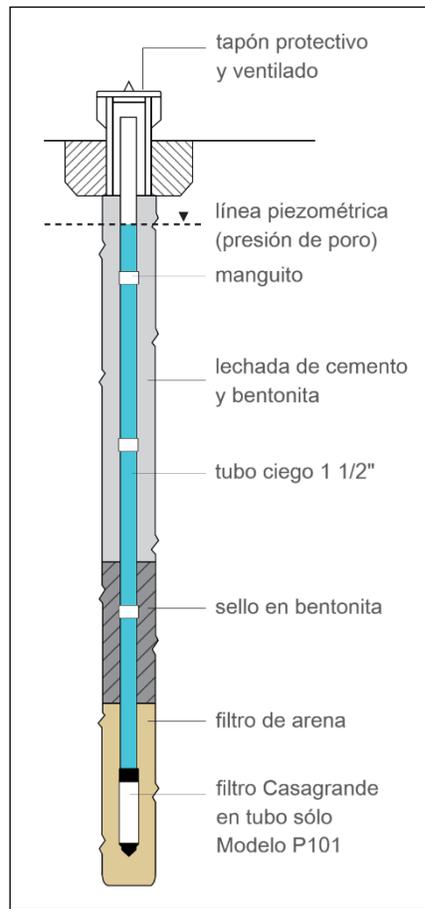


Figura 1: Esquema piezómetro de tubo vertical o tipo Casagrande (Sisgeo, 2014).

En cuanto a los sensores eléctricos, se pueden encontrar tanto **piezómetros neumáticos** como **piezómetros eléctricos**. Los primeros, como se pueden observar en la *Figura 2*, presentan una delgada lámina o diafragma flexible que recibe la presión del agua provocando su deflexión, y con ello la obturación de dos orificios en el lado seco del diafragma. Aplicando una presión neumática controlada, por uno de esos orificios, la presión requerida para separar el diafragma es justamente la presión en el agua, lo que se constata al detectar cierto flujo de aire de retorno por el otro orificio. El sensor neumático va adosado a un elemento poroso que se aloja a la profundidad deseada de manera similar a lo indicado para los piezómetros de tubo vertical. Por último, el sensor se conecta al sistema neumático de medición, que se mantiene en la superficie del terreno, mediante mangueras plásticas a través de las que se conduce el aire a presión (Dunnicliff, 1993).

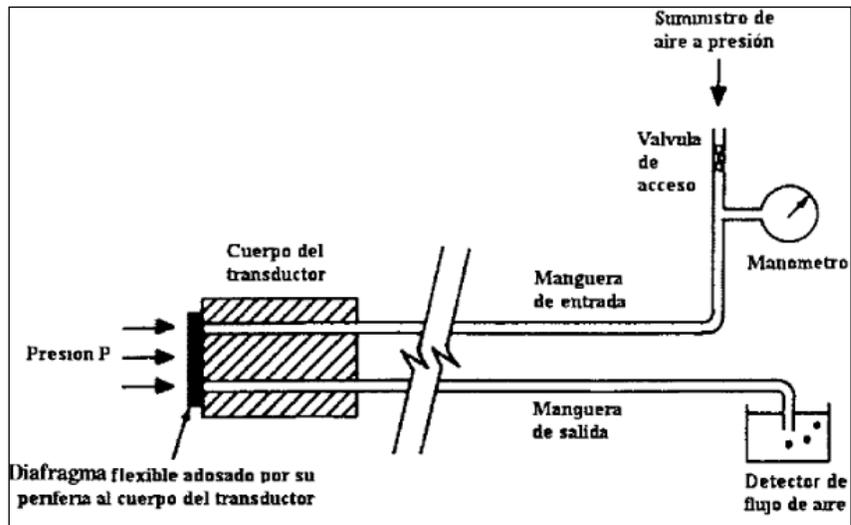


Figura 2: Principio de medición de un piezómetro neumático (Dunnicliff, 1993).

Los **piezómetros eléctricos** guardan cierta similitud con los piezómetros neumáticos, pero con un diafragma menos flexible, lo que determina que tengan una muy rápida respuesta a los cambios de presión en el agua, ya que los cambios volumétricos asociados son despreciables. En vez de los orificios del sistema neumático, las deformaciones del propio diafragma funcionan como elemento de medición de la presión en el agua. Para ello se colocan o integran strain gages al diafragma, ya sea **resistivos** o de **cuerda vibrante**. Así pues, las deformaciones del diafragma están proporcionalmente relacionadas con los cambios de la presión que ejerce el agua sobre el diafragma, lo que se conoce mediante la respectiva calibración (Dunnicliff, 1993).

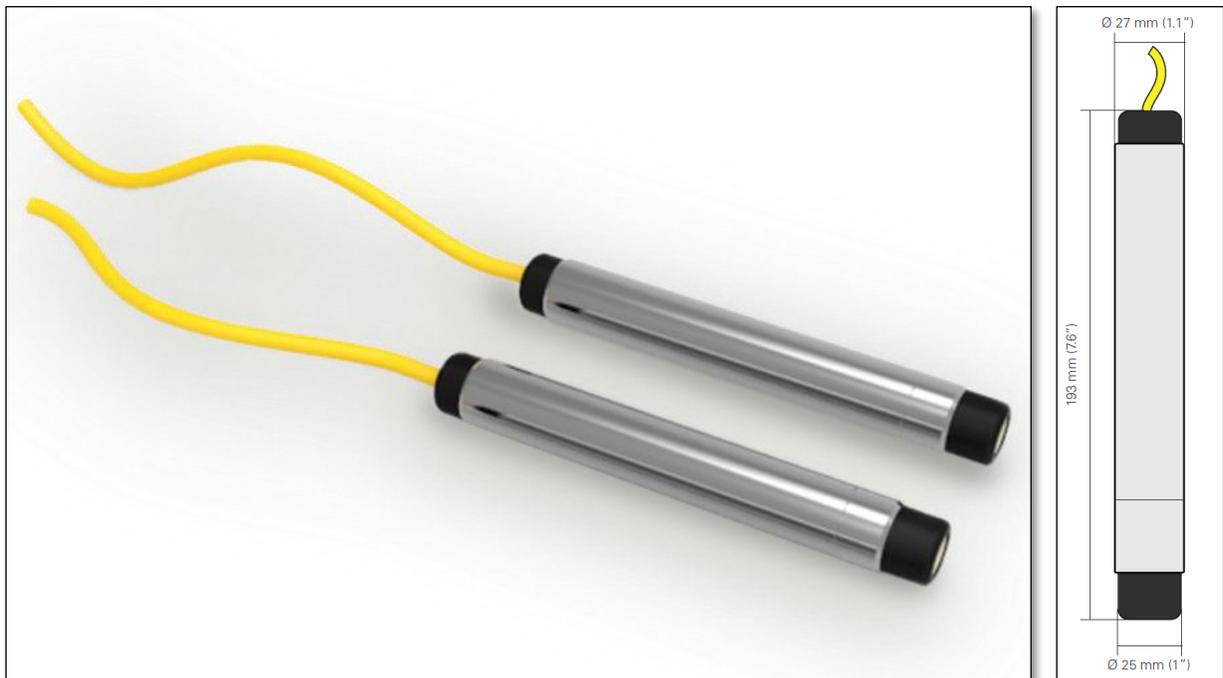


Figura 3: Piezómetros piezo-resistivos (Sisgeo, Piezómetros Piezo-Resistivos, 2015).

Los piezómetros **piezo-resistivos** (*Figura 3*) son transductores de presión adaptados para lecturas de alta frecuencia y aplicaciones a cortos períodos. Combinan robustez mecánica, capacidad para soportar ambientes agresivos y fiabilidad de funcionamiento. Son adecuados para mediciones dinámicas del nivel de agua o presión de poro, y cuando el sistema de adquisición de datos no es compatible con tecnología de cuerda vibrante.

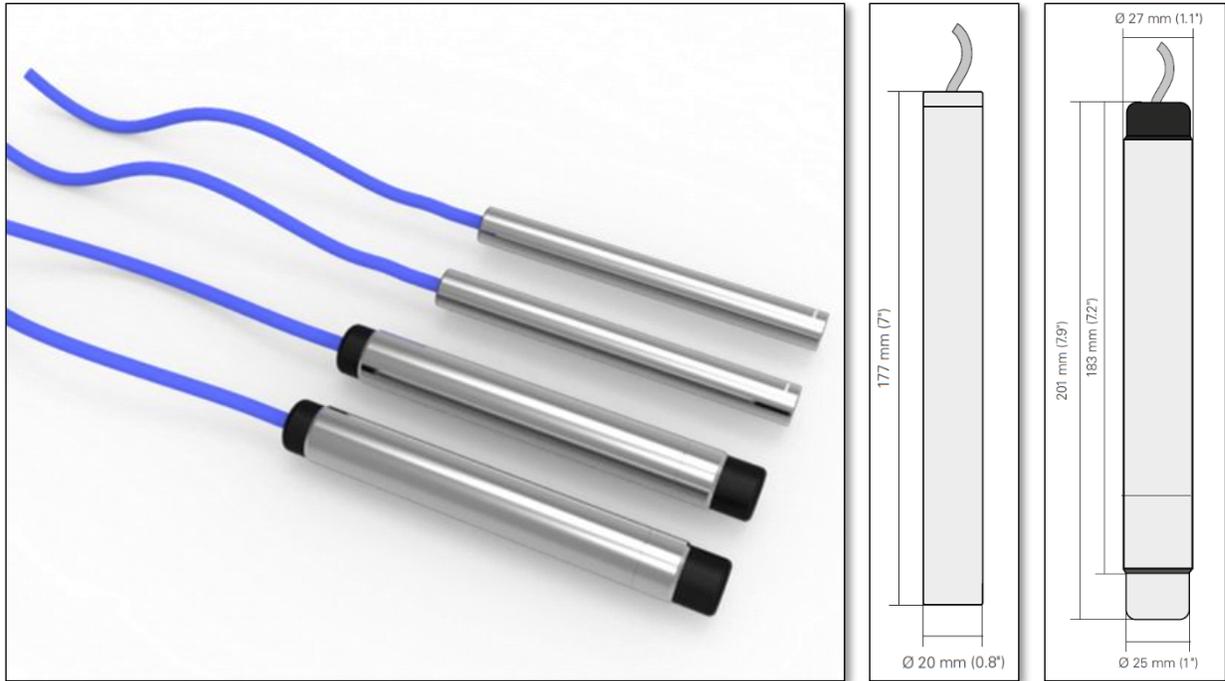


Figura 4: Piezómetros de cuerda vibrante (*Sisgeo, Piezómetros de Cuerda Vibrante, 2020*).

Los piezómetros de **cuerda vibrante** (*Figura 4*) se utilizan para monitorear la presión intersticial en suelos. Están conformados por un sensor de cuerda vibrante embebido en una carcasa de acero, con un filtro en un extremo. Ofrecen una excelente fiabilidad a largo plazo, como resultado del uso de los últimos desarrollos en tecnología de cuerda vibrante. Normalmente se instalan en sondeos, pero también se pueden enterrar en rellenos, o suspender en un pozo.

Dada la rápida respuesta mencionada anteriormente y todas las ventajas (*Sección 2.3*) que hoy en día ofrecen los piezómetros de cuerda vibrante en el campo de la instrumentación geotécnica, para la medición de las presiones de agua intersticial en los suelos (presiones de poro), hacen que sean los instrumentos más utilizados hoy en día. Por lo tanto, este trabajo se centrará a partir de ahora en este tipo de sensores, indicando su funcionamiento, fiabilidad y rendimiento, así como también los tipos de filtros usados y los errores en sus mediciones, entre otras propiedades.

2.2. Piezómetros de cuerda vibrante (CV)

Los piezómetros de cuerda vibrante (vibrating wire, VW en inglés) se utilizan para controlar la presión del agua intersticial en los suelos. Por lo general, se sellan en perforaciones, pero también se pueden incrustar en rellenos o suspender en un pozo. Las aplicaciones típicas incluyen la evaluación de la estabilidad de taludes, esquemas de deshidratación y drenaje, sobrepresión en suelos limosos y arcillosos, permeabilidad y gradientes hidráulicos en presas y también niveles de agua subterránea. También se pueden usar para monitorear las presiones de levantamiento en presas de gravedad (Sisgeo, Piezómetros de Cuerda Vibrante, 2020). Los piezómetros CV poseen en su extremo libre un filtro (removible en la mayoría de los casos), como los mostrados en la *Figura 6*, con poros que permite la entrada de agua, y que, a su vez evita que pequeñas partículas de tierra entren en la cámara frente al diafragma.

2.2.1. Funcionamiento piezómetro de cuerda vibrante

En cuanto a su funcionamiento, el sensor de presión de cuerda vibrante consta de un cable de acero tensado, anclado en un extremo a un diafragma flexible (el elemento sensor) y en el otro extremo al cuerpo interior (mampara rígida), todo sellado en una carcasa de acero inoxidable, como se puede observar en la *Figura 5*. El sensor está configurado para que la presión del agua que actúa sobre el diafragma cambie la tensión en el cable. A medida que aumenta la presión, la tensión del cable disminuye y viceversa. Dos bobinas opuestas están ubicadas dentro del cuerpo interno, cerca del eje del cable sensor.

Cuando se aplica a las bobinas una excitación de voltaje breve o una excitación de frecuencia de barrido, mediante el software asociado al sistema de adquisición de datos, se genera un campo magnético que hace que el cable oscile a su frecuencia resonante. Luego, producto del cambio en la tensión del cable (producida por la presión ejercida por el agua), se genera un cambio en la frecuencia resonante a la que oscila este, dando como resultado una salida de corriente alterna (sinusoidal). Finalmente, la frecuencia de salida de la corriente generada es detectada y procesada por una unidad de lectura de cuerda vibrante, o por un registrador de datos equipado con una interfaz de cuerda vibrante, donde se puede convertir en unidades de presión.

En resumen, a medida que aumenta la presión, la tensión del cable disminuye, generando con ello una disminución en la frecuencia de salida. Cuando disminuye la presión, ocurre el efecto contrario recién descrito.

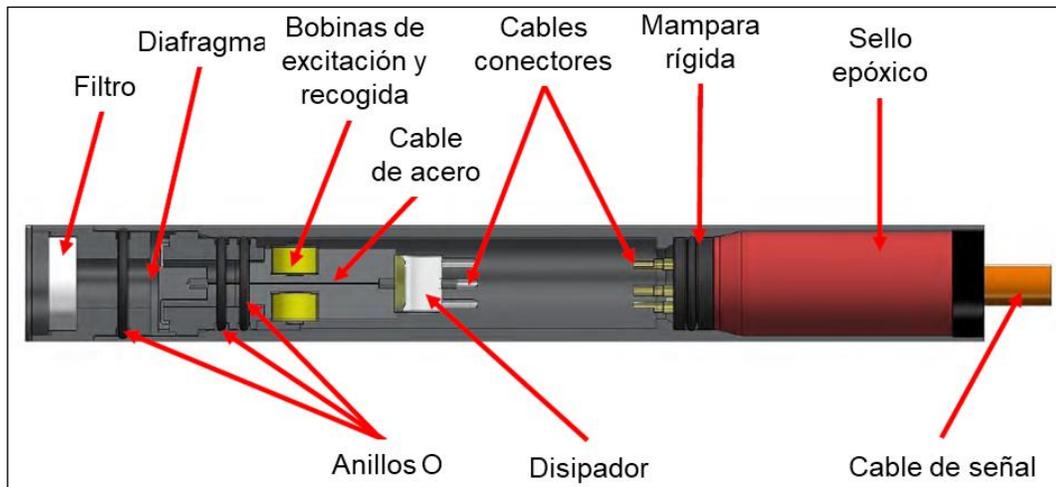


Figura 5: Esquema piezómetro de cuerda vibrante (Geosense, 2020).

Sumado a la lectura de presión de poros o carga de agua del sensor, en los piezómetros de cuerda vibrante se encuentra incluido un termistor, el cual permite la lectura de la temperatura a la que se encuentra el sensor para realizar la calibración y lectura de datos del instrumento.

2.2.2. Tipos de filtros

Los piezómetros de cuerda vibrante tienen en su extremo libre un filtro con poros que permite la entrada de agua y que a su vez evita que pequeñas partículas de suelo entren en la cámara frente al diafragma. Este tipo de filtro es estándar para la mayoría de los piezómetros y se conoce como filtro de baja resistencia a la entrada de presión de aire o Low resistance to Air pressure Entry (**LAE**), para distinguirlo de un filtro de alta resistencia a la entrada de presión de aire o High resistance to Air pressure Entry (**HAE**). En algunos entornos, la presión del gas en el suelo es más alta que la presión del agua, pudiendo afectar negativamente a la medición precisa de este último. En este caso, se requiere un filtro con poros muy pequeños (filtro HAE). Sólo cuando el filtro está saturado, la tensión superficial en los poros evita eficazmente la entrada de aire y, al mismo tiempo, permite la entrada de agua. A continuación, se pueden observar los dos tipos de filtros utilizados, LAE (gris oscuro) y HAE (blanco).



Figura 6: Filtros de piezómetros de cuerda vibrante, LAE (gris oscuro) y HAE (blanco).

Para una correcta toma de datos, los filtros LAE y HAE deben estar saturados, principalmente estos últimos. En el caso del filtro LAE, basta con asegurarse de que no haya burbujas de aire en la cámara frente al diafragma, ya que podrían ralentizar el tiempo de respuesta del piezómetro. Mientras que en el caso del filtro HAE, se requiere saturación para producir el efecto de tensión superficial, y se dispone de un dispositivo de saturación especial para este propósito. En general, los filtros LAE (estándar) son adecuados para la mayoría de las aplicaciones, mientras que el filtro HAE se considera para suelos insaturados donde la presión del gas podría afectar la lectura de la presión del agua intersticial (Sisgeo, Piezómetros de Cuerda Vibrante, 2020). La siguiente tabla resume las principales diferencias entre los dos modelos de filtro.

Tabla 1: Diferencias entre filtros de piezómetros de cuerda vibrante (Roctest, 2014)

Filtro de acero inoxidable Baja resistencia a la entrada de presión de aire (LAE)	Filtro cerámico Alta resistencia a la entrada de presión de aire (HAE)
	
Diámetro de poro: $\sim 50 \mu m$	Diámetro de poro: $\sim 1 \mu m$
Filtro de uso general	Filtro generalmente instalado para uso en material de grano fino insaturado
No permite mediciones de succión	Permite medir la succión a $-100 kPa$
Si el nivel del agua desciende por debajo del piezómetro y se acumula una succión, el filtro puede desaturarse. Pero tan pronto como suba el nivel del agua, se volverá a saturar fácilmente	Si la presión negativa es importante, el filtro se desaturará y las lecturas se volverán incorrectas
Presión de entrada de aire: $\sim 10 kPa$	Presión de entrada de aire: $\sim 450 kPa$
Pequeño retraso de tiempo	Mayor retraso de tiempo
Fácil de saturar e instalar	Necesita estar saturado al vacío
Permite la infiltración de grano fino	Ayuda a prevenir la infiltración de grano fino

2.3. Ventajas de los piezómetros de cuerda vibrante

Las razones para escoger los piezómetros de cuerda vibrante por sobre otros piezómetros son variadas, pero están enfocadas principalmente en la manera en que estos entregan datos de manera rápida, autónoma y confiable. Es posible observar pequeñas variaciones en los cambios de la presión de poros a la cual está sometido el instrumento y el tiempo de respuesta de este es casi inmediato, siendo una herramienta eficiente y confiable (Baird & Gaffney, 1994).

En comparación a los piezómetros de Casagrande, esto supone una ventaja importante, dado que la principal desventaja de los tipos Casagrande es su lenta respuesta a cambios de presión del agua, debido a la necesidad de que un volumen relativamente alto de agua entre o salga del elemento poroso, a fin de establecer el equilibrio mediante el correspondiente cambio en la altura de la columna de agua dentro del tubo.

Otra de las ventajas que tienen los piezómetros CV es que pueden medir succión, es decir, presiones negativas, tal y como se detalla en el trabajo realizado por Martínez y Hürlimann, titulado “Análisis del comportamiento del suelo por infiltración en una ladera y su relación ante el deslizamiento superficial de Cercs” (2016). En aquel trabajo se analizaron los posibles ascensos del nivel freático en la ladera, utilizando un piezómetro CV, y se observó que no hubo ninguna presión positiva en sus registros. Al contrario, debido a que el piezómetro CV es capaz de medir succión, se observaron oscilaciones de presiones negativas durante todo el año.

Además, los cambios de presión de poros en arcilla rígida y de muy baja permeabilidad se miden mejor con piezómetros CV debido a su inherente retardo de tiempo insignificante, en comparación con los piezómetros de tubo vertical tradicionales, que requieren una cantidad relativamente grande de entrada de agua. Otra característica relevante es que los piezómetros CV se pueden instalar utilizando el método completamente embebido en lechada de cemento, simplificando significativamente los procedimientos de instalación. Este método permite la colocación de piezómetros de varios niveles, y con ello la generación de perfiles de presión de agua intersticial según la profundidad obtenida en un solo pozo. Esta es una gran ventaja sobre otros tipos de piezómetros (Sorensen & Simonsen, 2018). En síntesis, la utilización de piezómetros CV en ambientes de baja permeabilidad (como lo son arcillas y limos) es posible, utilizando el filtro correspondiente al tipo de suelo, y, por lo tanto, el uso de estos sensores no está limitado por algún tipo de suelo en particular.

Las mediciones obtenidas por los piezómetros CV están sujetas a errores conocidos, integrados en la guía de calibración entregada por el fabricante de cada uno de los instrumentos. Esto permite que sea manejable la incertidumbre asociada a las mediciones cuando se siguen todos los protocolos de instalación, configuración y mantenimiento asociados al sensor (Baird & Gaffney, 1994).

Por último, si bien no es su uso principal, se ha demostrado que los piezómetros CV, sumados a unidades de GPS, permiten conocer y medir el desplazamiento y comportamiento de cuerpos granulares, verificando, además, mediante el análisis de resultados, que los piezómetros CV poseen un buen desempeño a largo plazo (Nakashima, Kawasaki, Kubota, Nakano, & Shimizu, 2012).

2.4. Desventajas de los piezómetros de cuerda vibrante

Una de las principales y quizás la desventaja más importante de este tipo de piezómetros, es que necesitan estar completamente saturados (cámara del sensor y filtros) para responder directamente a los cambios de presión barométrica con un tiempo de respuesta bajo (Sorensen & Simonsen, 2018). Por otro lado, si un piezómetro no mide los cambios de presión barométrica, lo más probable es que se deba a la entrada de aire en el filtro o la cavidad y se debe cuestionar la validez de las lecturas del piezómetro. Esto resulta muy relevante considerando el método de instalación asociado a estos piezómetros, que hacen que sea muy difícil poder recuperar el instrumento para corregir dichos problemas.

Dado que los piezómetros son sensores de medición relativa, las lecturas cero son críticas para determinar una altura de presión exacta. Otra de las desventajas es que estas pueden verse afectadas por las condiciones del fondo del pozo, así como por las discrepancias en la lectura del cable vibrante (Canary Systems, 2019).

Por último, una de las ventajas del uso de este tipo de piezómetros es que permiten el acceso remoto, pero su limitación o desventaja es que los tendidos de cables horizontales de gran longitud deben protegerse de elementos eléctricos (Geosense, Application Guide - Piezometers, 2014). En resumen, las desventajas de los piezómetros de cuerda vibrante son las siguientes:

- Pueden dar lecturas incorrectas en condiciones no saturadas.
- No se puede eliminar el aire si hay succiones presentes.
- No hay forma de verificar la calibración una vez instalados.
- Pueden verse afectados por cambios de temperatura y presión barométrica.
- Necesitan protección contra rayos o elementos eléctricos.

2.5. Fiabilidad y rendimiento de los piezómetros de cuerda vibrante

La evolución reciente del sistema de adquisición e interpretación de datos ha permitido que las lecturas se tomen automáticamente en los instrumentos. Esto se ha convertido en una parte integral de todos los proyectos de instrumentación y programas de monitoreo de mediana y gran escala. La adquisición automática de datos es un beneficio fundamental, porque las mediciones se toman automáticamente y los datos se almacenan en un formato compatible para el procesamiento, visualización y reporte de datos asistidos por computadora. Siguiendo lo anterior, se hace énfasis en la necesidad de contar con instrumentos confiables para monitorear en tiempo real el comportamiento de las estructuras. El uso de sensores de cuerda vibrante en el campo de la geomecánica se considera particularmente para estas aplicaciones donde se espera un monitoreo a largo plazo (Choquet, Juneau, Debreuille, & Bessette, 1999).

Los instrumentos y las personas son los dos únicos aspectos del desempeño del monitoreo; la confiabilidad de los instrumentos se convierte en la característica primordial en la selección de una tecnología. La confiabilidad adquiere su sentido más importante cuando el proyecto de instrumentación está ubicado en un área remota o cuando los instrumentos están incrustados en concreto, enlechados en su lugar, enterrados en el suelo o en un pozo de sondeo y, por lo tanto, inaccesibles.

Si la confiabilidad del instrumento se define como la probabilidad de que un conjunto de medición funcione correctamente, otros factores importantes para los sensores son la precisión, la resolución, la repetibilidad, la reproducibilidad, que depende de la deriva del cero y la histéresis. El sensor es el enlace esencial que genera la señal eléctrica y, por lo tanto, proporciona un registro de la cantidad que se mide. Por tanto, una buena fiabilidad a largo plazo es de suma importancia, especialmente si las decisiones relativas al rendimiento y la seguridad deben tomarse con algún grado de precisión y confianza.

En particular, el trabajo realizado por Choquet, Juneau, Debreuille y Bessette, "Reliability, long-term stability and gage performance of vibrating wire sensors with reference to case histories", que consistió en la realización de muchas pruebas en laboratorio, incluidas las pruebas a largo plazo, durante un período que varía entre 600 y 1400 días, para evaluar el rendimiento del cable de acero que va tensado al interior del piezómetro CV, concluyó que las pruebas a largo plazo llevadas a cabo con piezómetros CV, extensómetros y transductores de desplazamiento presentaron una buena estabilidad de las lecturas. La recalibración de los piezómetros después de cinco años en el campo presentó una pequeña variación del 0,1% de la sensibilidad del instrumento. La prueba llevada a cabo con el extensómetro demostró que era repetible y reproducible, y que la deformación medida coincidía con la lectura de la galga extensométrica eléctrica.

En cuanto a la temperatura, se observó que casi no influyó en el factor de calibración del piezómetro CV. Por otro lado, las ligeras dependencias de la temperatura por parte del extensómetro se debían a la ligera discrepancia en el coeficiente de expansión térmica entre el sensor de cuerda vibrante y el material anfitrión al que está unido. Incluso si hay una deriva del cero por parte del piezómetro debido a cargas de choque, el cambio en la sensibilidad del instrumento resulta insignificante. Por lo tanto, los sensores CV son adecuados para usarse con cables de gran longitud y en situaciones en las que no son accesibles para la recalibración.

Se han instalado muchos sensores CV en diferentes estructuras de ingeniería civil durante muchos años, y por el trabajo realizado se puede concluir que su respuesta es estable, precisa y ofrece características de confiabilidad altamente valoradas para usos geomecánicos. Sin embargo, siempre es necesario un cuidado adecuado durante la instalación para aprovechar su rendimiento a largo plazo (Choquet, Juneau, Debreuille, & Bessette, 1999).

2.6. Precisión en las mediciones de los piezómetros de cuerda vibrante

Los piezómetros de cuerda vibrante permiten la posibilidad de centralizar y automatizar sus lecturas, disponiendo de ellas sin necesidad de trasladarse físicamente al punto controlado y con mayor precisión. Se tratan de sensores que tienen buena precisión, poco afectada por cambios térmicos y con excelente estabilidad a largo plazo, tal como se indicará más adelante.

Raventós Fornós y Arroyo Alvarez de Toledo en su trabajo “Instalación de piezómetros con sellado continuo en el Puerto de Barcelona”, plantean que son dos los errores más importantes que afectan la medición de la presión de poro (Hvorslev, 1951). Uno de ellos, y que resulta relevante para el tema en cuestión, es el tiempo de respuesta de los piezómetros, es decir, el tiempo que transcurre entre el cambio de presión en el terreno y su reflejo en la lectura registrada por el piezómetro. Si el tiempo de respuesta es elevado, el instrumento pierde precisión. Siguiendo esto último, los piezómetros de tipo Casagrande requieren de un volumen de agua considerable en la tubería para detectar un cambio de presión. Por el contrario, los piezómetros de cuerda vibrante tienen un tiempo de respuesta varios órdenes de magnitud menor que los de Casagrande (Penman, 1960), pues el volumen de agua requerido para leer un cambio de presión es mucho menor. Por lo tanto, como el tiempo de respuesta de los piezómetros de cuerda vibrante es muchísimo menor, los instrumentos resultan ser muy precisos, al menos con respecto a los de tipo Casagrande (Raventós Fornós & Arroyo Alvarez de Toledo, 2016).

Choquet, Juneau, Debreuille, y Bessette en su trabajo “Reliability, long-term stability and gage performance of vibrating wire sensors with reference to case histories”, aluden a la precisión de los piezómetros de cuerda vibrante a lo largo del tiempo. En la prueba con el piezómetro CV se tomaron lecturas por un período de 600 días, y se observó que la respuesta de este se mantenía dentro de la precisión de $\pm 0,5\%$ de la escala completa (F.S.) del sensor. En la prueba con el extensómetro se tomaron lecturas durante 1400 días, y se observó una excelente estabilidad de la lectura a lo largo del tiempo, muy por debajo del $\pm 0,5\%$ del índice de precisión del instrumento. En la prueba con el medidor de juntas de cuerda vibrante se monitorearon durante 1215 días las lecturas tomadas, observando que estas se mantuvieron dentro del $\pm 0,5\%$ del índice de precisión del instrumento. Por último, los autores plantean que es difícil o incluso imposible comprobar la repetibilidad y reproducibilidad de un piezómetro de cuerda vibrante durante un largo período de tiempo, porque el sensor suele ser inaccesible. Pese a lo anterior, pudieron recuperar los sensores después de cinco años, y observar que la precisión era del $0,025\%$ de la escala completa (F.S.) del sensor, es decir, 20 veces más precisa que la linealidad nominal del $\pm 0,5\%$. De esta manera se ratifica lo indicado al comienzo de la sección, es decir, que los piezómetros de cuerda vibrante son instrumentos precisos y estables a largo plazo (Choquet, Juneau, Debreuille, & Bessette, 1999).

2.7. Errores en las mediciones de los piezómetros de cuerda vibrante

2.7.1. Errores asociados a los filtros usados

Un tema que a menudo se pasa por alto, y que puede causar grandes errores en las mediciones, es la elección del filtro del piezómetro de cuerda vibrante. Esto generalmente no ocasiona mayores inconvenientes, puesto que los filtros usados con mayor frecuencia corresponden a los de baja resistencia a la entrada de presión de aire (LAE). Pese a lo anterior, hay algunas personas que usan los filtros de alta resistencia a la entrada de presión de aire (HAE), especialmente cuando intentan medir presiones negativas de agua intersticial (succión). En este último caso es donde se debe tener mayor precaución, puesto que los filtros HAE tienen un alto riesgo de mal funcionamiento si se colocan en pozos de sondeo completamente embebido en lechada de cemento sin posibilidad de enjuagar los filtros. Para estos casos, los filtros LAE deben ser la opción preferida (Sorensen & Simonsen, 2018).

Siguiendo con lo anterior, en el trabajo de Sorensen y Simonsen se indica que nueve de los diecisiete piezómetros de cuerda vibrante estaban equipados con puntas de filtro de cerámica del tamaño de poro fino (filtro HAE), y pocas semanas después de la puesta en marcha, surgieron problemas. Los piezómetros equipados con filtros HAE produjeron lecturas muy erróneas y después de ocho meses de medición, solo uno de cada nueve piezómetros dio lecturas creíbles. Se creía que la principal razón por la que los piezómetros no funcionaban bien era la saturación insatisfactoria del filtro. Por lo tanto, una incorrecta saturación de los filtros, en particular de los filtros HAE, genera errores en las mediciones de los piezómetros de cuerda vibrante.

El mismo trabajo mencionado anteriormente indica que si el filtro y la cámara de agua están saturados de manera eficiente, el piezómetro responderá directamente a los cambios de presión barométrica con un tiempo de respuesta bajo. Por otro lado, si un piezómetro no mide los cambios de presión barométrica, lo más probable es que se deba a la entrada de aire en el filtro o la cavidad y se debe cuestionar la validez de las lecturas del piezómetro.

Finalmente, Sorensen y Simonsen indican que el estudio de varias instalaciones de campo (con el método completamente embebido en lechada de cemento) de piezómetros CV con filtros LAE y HAE en arcilla de muy baja permeabilidad, junto a las mediciones en curso en otro sitio con condiciones de suelo similares, demostraron que los piezómetros de cuerda vibrante, con puntas de filtro de cerámica HAE, pueden medir la presión de poros correctamente cuando se colocan en contacto íntimo con la arcilla (cuatro piezómetros estuvieron midiendo correctamente durante más de un año y medio). Por lo anterior, se apunta indudablemente a la lechada de cemento-bentonita como el principal problema cuando se utilizan filtros HAE (Sorensen & Simonsen, 2018).

2.7.2. Errores asociados al mantenimiento

Para reducir la ocurrencia de errores en las mediciones, se debe realizar el mantenimiento de los transductores de cuerda vibrante de forma periódica, verificando además las conexiones y terminales de los cables. Si surgen problemas al leer la temperatura, es probable que se deba a un corte de cable o un cortocircuito debido a la tecnología utilizada (termistor simple). Para ello se debe verificar el cable y empalme de acuerdo con los procedimientos recomendados por el fabricante. Si no se obtiene ninguna lectura de presión, es posible que haya penetrado agua dentro del cuerpo del sensor. Otros problemas se evidencian si las variaciones de presión son sospechosas, y para estos casos se debe verificar si esas variaciones están correlacionadas con la temperatura registrada y/o la presión barométrica. Para ello, se debe comprobar que las correcciones a la presión bruta se aplican correctamente (Roctest, 2014).

2.7.3. Errores asociados a otros factores

Otros autores indican que las fuentes de error en las lecturas del piezómetro de cuerda vibrante son el resultado tanto de los métodos de instalación iniciales como de los cambios en la atmósfera y el medio circundante. Algunos errores, como los que ocurren debido a profundidades de ajuste inexactas, presión barométrica y gravedad específica, son independientes del rango del sensor; mientras que los que se producen por los efectos de la temperatura y las lecturas cero, dependen del rango del sensor y de los factores de calibración (Canary Systems, 2019).

En el caso de la gravedad específica (SG), la conversión entre presión y altura equivalente de agua asume que la solución que se monitorea tiene una SG de 1,0. Las soluciones de lixiviación son un líquido más denso que el agua y pueden tener aproximadamente 1,15 (para la lixiviación de cobre). Si bien los sitios intentan mantener constante la densidad de la solución ácida, la influencia del agua de lluvia y las diferentes concentraciones de la solución impregnada hacen que la SG sea un valor variable. Si la SG de la solución que está leyendo un piezómetro cambia $\pm 5\%$, esto equivale a una variación de $\pm 4.8\%$ en la presión medida en un piezómetro.

Para piezómetros CV instalados mediante el método totalmente embebido en lechada de cemento (más usado actualmente), los cambios de presión barométrica que se experimentan en el sensor son insignificantes, por lo que no debieran suponer mayor problema en la medición. Algo similar ocurre al establecer la profundidad de ajuste, dado que el estiramiento incremental del cable no supone un problema. Marcar la longitud del cable en el cable, contar el número de varillas de perforación y conocer los ángulos precisos de perforación, minimizan el error asociado con estas instalaciones.

Por último, dado que los piezómetros son sensores de medición relativa, las lecturas cero son críticas para determinar una altura de presión exacta. Estas pueden verse afectadas por las condiciones del fondo del pozo, así como por las discrepancias en la lectura del cable vibrante. Para minimizar el impacto de estas condiciones, los piezómetros deben aclimatarse a la temperatura actual en el fondo del pozo. Por otra parte, los cambios en la temperatura del aire/solución también afectan la lectura del piezómetro, y para minimizarlos, los fabricantes suelen

utilizar materiales que se encuentran en equilibrio térmico, creando de esta forma cambios relativamente pequeños en las lecturas debido a las variaciones de temperatura (Canary Systems, 2019).

2.8. Métodos de instalación de los piezómetros de cuerda vibrante

2.8.1. Método embebido en relleno de arena

Corresponde al método tradicional y clásico de instalación de los piezómetros, ya sean de tubo abierto, de tipo Casagrande o de cuerda vibrante. Hoy en día se ocupan principalmente para los primeros, y consisten en pozos de sondeos en los cuales se insertan los piezómetros a la profundidad determinada en la que se desea conocer la presión, junto a un filtro de arena calibrada alrededor de la tubería ranurada (en el caso de los de tipo Casagrande) o alrededor del mismo sensor (en el caso de los de cuerda vibrante). En otras palabras, consiste en colocar el piezómetro embebido en un relleno de arena limpia, que actúa como un material filtrante. El filtro de arena tiene como función reducir el tiempo de respuesta de los piezómetros, ya que en particular los tipo Casagrande requieren que entre un volumen de agua considerable en la tubería para detectar un cambio de presión, a diferencia de los de cuerda vibrante. La zona filtrante se separa del resto del sondeo de instalación mediante un sello de bentonita, con el objetivo de aislar el sensor y medir sólo la presión de la capa en la que se encuentra. Finalmente, sobre el sello se vierte lechada de cemento-bentonita hasta alcanzar la superficie del suelo, tal y como se puede observar en la *Figura 7* y *Figura 8*.

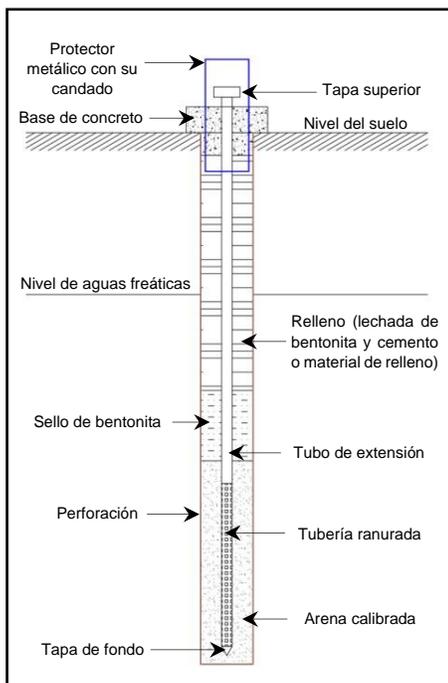


Figura 7: Esquema instalación método embebido en relleno de arena. Piezómetro de tubo abierto (Ingeniería GCE, 2018).

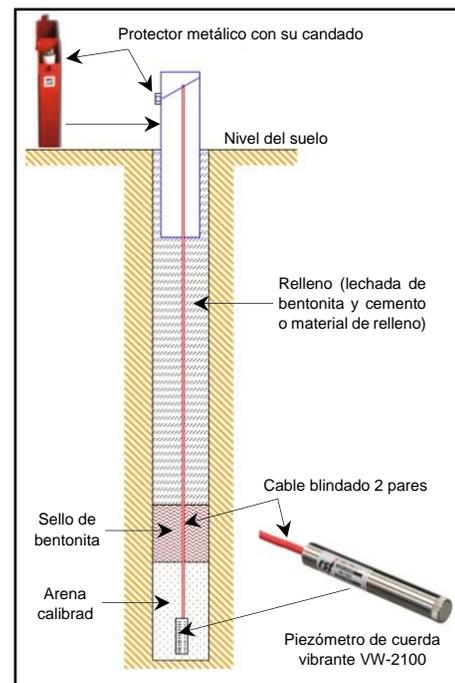


Figura 8: Esquema instalación método embebido en relleno de arena. Piezómetro de cuerda vibrante (Ingeniería GCE, 2018).

2.8.2. Método totalmente embebido en lechada de cemento

En los últimos años, los piezómetros de cuerda vibrante (CV) se han vuelto cada vez más populares y con ello la instalación en pozos de sondeo completamente embebido en lechada de cemento (*Figura 9*), puesto que este método simplifica significativamente los procedimientos de instalación y permite la colocación de varios piezómetros por pozo. Varios estudios informan sobre instalaciones exitosas de varios sitios alrededor del mundo, p. ej. (Contreras, Grosser y Ver Strate, 2008; DiBiagio, 2003; Dunicliff, 2008; Smith, van der Kamp y Hendry, 2013), según lo indicado en el trabajo de Sorensen y Simonsen, "Performance Of Vibrating Wire Piezometers In Very Low Permeable Clay". En general, se considera una buena práctica elegir una lechada con una permeabilidad lo más cercana posible a la del suelo. Por lo mismo, se debe tener el cuidado adecuado para preparar una mezcla de lechada que imite lo mejor posible la rigidez y permeabilidad del suelo circundante. Esto se logra seleccionando la proporción adecuada de agua y cemento. Cuando se alcanza la proporción adecuada de cemento y agua, se agrega lentamente bentonita en polvo hasta que sea lo más pesado posible para bombear (Roctest, 2014).

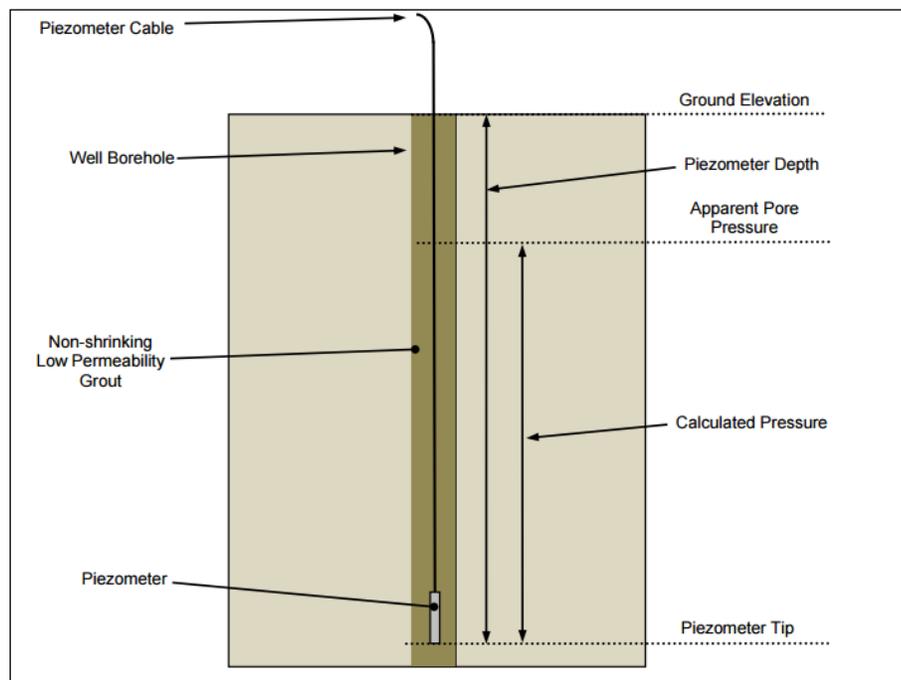


Figura 9: Esquema instalación método embebido en lechada de cemento o grouted (Canary Systems, 2019).

Tal y como se menciona anteriormente, una ventaja de este método es la instalación de varios piezómetros CV por pozo. La instalación de un piezómetro multinivel es rápida y confiable, ya que varios piezómetros están conectados a un solo cable de comunicación, que a su vez está conectado al sistema de adquisición de datos. Una instalación típica del piezómetro multinivel utiliza una instalación de lechada directa, de modo que solo se requiere del piezómetro multinivel y un tubo de inyección de lechada para completar la instalación. Una vez que la lechada se ha

endurecido, los piezómetros se aíslan entre sí, permitiendo realizar mediciones precisas de los cambios de presión del agua a distintas profundidades (Roctest, 2014).

Contreras, Grosser, y Ver Strate, en su trabajo “The Use of the Fully-grouted Method for Piezometer Installation” (2008), analizaron los resultados de un programa de pruebas de laboratorio en seis mezclas de lechada de cemento-bentonita, junto con una evaluación de un modelo informático para determinar el impacto de la diferencia de permeabilidades entre el relleno de lechada de cemento-bentonita y el suelo circundante, y concluyeron que:

- El método de lechada completa es un procedimiento bastante simple, económico y preciso que se puede utilizar para medir las presiones de agua intersticial en suelos y rocas fracturadas. Permite una fácil instalación de una configuración de piezómetro anidado, lo que resulta en ahorros en los costos de perforación. También se puede utilizar en combinación con otros instrumentos (por ejemplo, inclinómetros) para medir la deformación y las presiones de agua intersticial, siempre que las juntas del inclinómetro permanezcan selladas.
- La permeabilidad de la mezcla de lechada de cemento-bentonita puede ser hasta tres órdenes de magnitud mayor que la permeabilidad del suelo circundante sin un error significativo en la medición de la presión del agua intersticial.
- Los resultados de las pruebas de laboratorio muestran que la permeabilidad de las mezclas de cemento-bentonita para lechada es una función de la relación agua/cemento. A medida que disminuye la proporción de agua/cemento (proporción de vacíos), la permeabilidad disminuye.
- Por último, la bentonita tiene poca influencia en la permeabilidad de la mezcla, pero parece estabilizarla, manteniendo el cemento en suspensión y reduciendo la cantidad de "agua escurrida".

Siguiendo la misma tónica, se plantean ideas y conclusiones bastante similares en los trabajos de Mikkelsen y Green, “Piezometers in Fully Grouted Boreholes” (2003), y de Wan y Standing, “Field measurement by fully grouted vibrating wire piezometers” (2014). De esta forma, se da mayor peso y consolidación a las conclusiones planteadas anteriormente. En particular, en el primero de ellos, se vuelve a recalcar algo indicado en secciones anteriores, con respecto a que el método de instalación totalmente embebido en lechada de cemento sólo se aplica a los piezómetros CV instalados en suelos saturados, excluyendo los suelos insaturados, que exhiben presiones de gas positivas o grandes presiones negativas (succiones). Por su parte, el trabajo de Wan y Standing indica además un buen desempeño de los piezómetros CV multinivel (completamente embebido en lechada de cemento), proporcionando de esta manera un medio eficiente para determinar las presiones del agua intersticial a varias profundidades dentro de un pozo. A su vez, recalca que la selección de una lechada de permeabilidad adecuada es un aspecto clave para lograr una instalación exitosa. La lechada también debe ser lo suficientemente

líquida para que, cuando se bombee, se llenen todos los huecos, con el objetivo evitar instancias de interconectividad entre los piezómetros.

Por lo tanto, el beneficio del método completamente embebido en lechada de cemento (grouted) es que la instalación es más económica, rápida y permite la colocación de varios piezómetros CV por pozo. Mientras que los contras son que los sensores no se pueden recuperar, no se pueden verificar las mediciones, y la lechada debe coincidir con las condiciones del suelo o roca (Canary Systems, 2019).

2.9. Conceptos claves – Exactitud, Precisión y Error de medición

Tres conceptos que resultan claves para entender las futuras conclusiones son la exactitud y precisión, que comúnmente suelen confundirse o no terminar de comprenderse, además del error de medición asociado a cada piezómetro de cuerda vibrante. En el caso de la exactitud y la precisión, ambas son independientes la una de la otra. Así, los resultados en los valores de una medición pueden ser precisos y no exactos (y viceversa). A continuación, se presenta la definición⁵ de cada uno.

- **Exactitud**: indica el grado de cercanía o proximidad entre un valor medido, o una serie de valores observados, con el valor real de alguna cosa. En otras palabras, corresponde a la capacidad de un instrumento de acercarse al valor de la magnitud real. La exactitud depende de los errores sistemáticos que intervienen en la medición, denotando la proximidad de una medida al verdadero valor y, en consecuencia, la validez de la medida. La exactitud depende de la calibración de los instrumentos de medición. Mientras mejor estén calibrados, menor es el margen de error y más exacto es el instrumento.
- **Precisión**: corresponde a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión. En otras palabras, se refiere a la capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones o de dar el resultado deseado con exactitud. La precisión refleja la proximidad de distintas medidas entre sí, y es función exclusiva de los errores accidentales.
- **Error de medición**: en estricto rigor corresponde al error polinomial máximo, es decir, al máximo error asociado a la corrección polinomial señalada en la hoja de calibración de cada piezómetro de cuerda vibrante (*Anexo B*), expresado en porcentaje y dependiente de la capacidad máxima de medición del instrumento (*Tabla A.1*). Más adelante, en la *Tabla 2*, se detallan las propiedades recién mencionadas de cada piezómetro CV.

Las siguientes figuras ayudan a comprender de mejor manera los conceptos de exactitud y precisión recién definidos.

⁵ (Zita Fernandes, 2017) y (Precisión y exactitud, 2022).

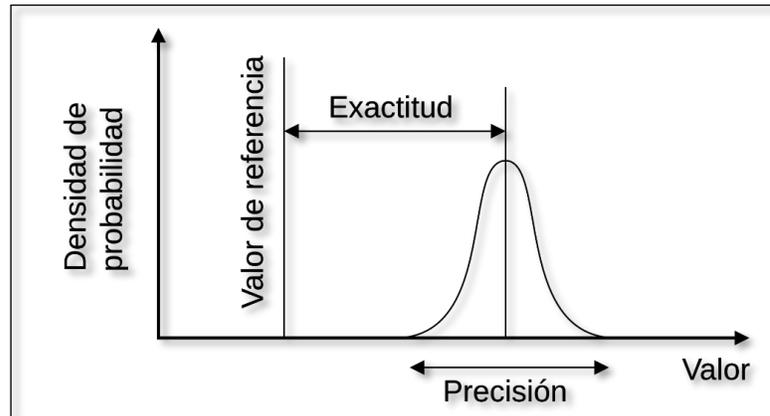


Figura 10: Gráfico Exactitud v/s Precisión, conceptos claves en este trabajo de título (*Precisión y exactitud, 2022*).

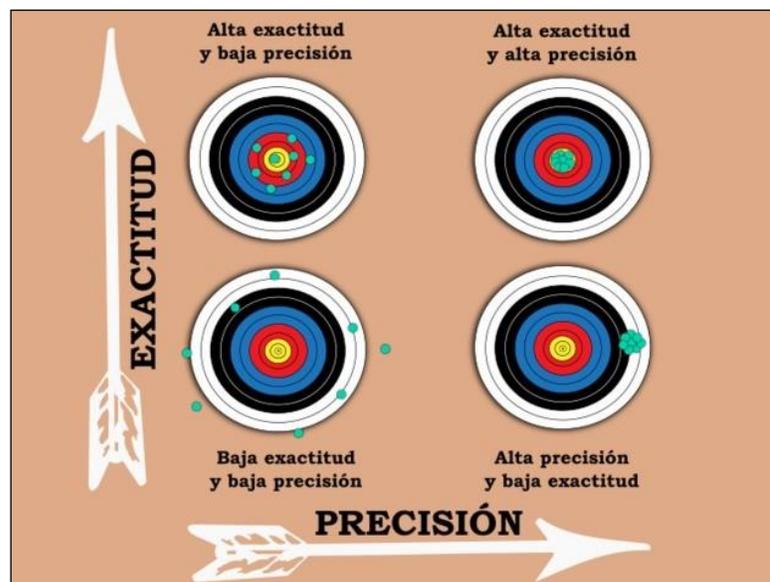


Figura 11: Esquema Exactitud v/s Precisión, conceptos claves en este trabajo de título (*Zita Fernandes, 2017*).

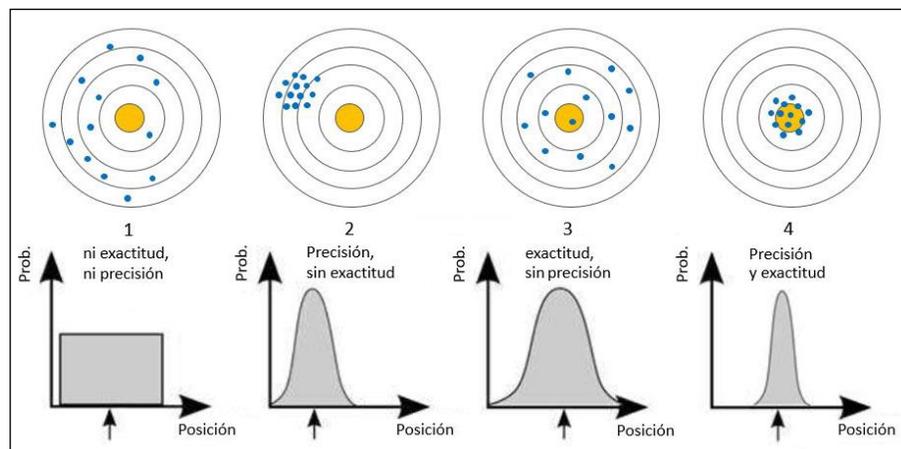


Figura 12: Gráfico y esquema Exactitud v/s Precisión, conceptos claves en este trabajo de título (*QBPROFE, 2020*).

3. Pruebas de laboratorio desarrolladas en este trabajo de título

En este capítulo se detalla cada uno de los instrumentos y materiales utilizados en cada una de las pruebas, indicando, por ejemplo, la capacidad máxima de medición de cada piezómetro de cuerda vibrante (CV), así como también el error asociado a su medición. También se indica el sistema de adquisición de datos usado (data logger), junto a la descripción del software correspondiente y las configuraciones que se llevan a cabo (fundamentales a partir de cierto punto del trabajo).

Como parte del trabajo consiste en analizar la respuesta de los sensores con dos suelos con diferentes características y propiedades, en este capítulo también se detallan los ensayos de determinación de distribución granulométrica y permeabilidad de carga constante que se llevan a cabo.

Finalmente, se detalla cada una de las pruebas de laboratorio (estáticas y dinámicas), indicando los instrumentos y materiales utilizados, así como también el procedimiento y la configuración realizada en cada una de ellas.

3.1. Piezómetros de cuerda vibrante (CV) utilizados

A continuación, se listan los piezómetros de cuerda vibrante utilizados en cada una de las pruebas, indicando una breve descripción, marca, código, capacidad máxima de medición (presión), así como también el error de medición asociado a cada uno. Cabe destacar que los tres primeros piezómetros listados son idénticos, lo que resulta relevante más adelante al comparar resultados.

Tabla 2: Descripción de los piezómetros CV utilizados (elaboración propia).

Código	Imagen	Descripción
P190050		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Piezómetro CV de tamaño medio, con cable azul de 5 [m] de largo. ▪ Marca: Sisgeo. ▪ Filtros: HAE y LAE. ▪ Capacidad máxima de medición: 170 [kPa]. ▪ Error polinomial máximo: 0,1221 [%] de la capacidad máxima de medición. Asociado a la corrección polinomial señalada en la hoja de calibración. ▪ Hoja de calibración: <i>Figura B.1. en Anexo B.1.</i>
P190051		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Piezómetro CV de tamaño medio, con cable azul de 5 [m] de largo. ▪ Marca: Sisgeo. ▪ Filtros: HAE y LAE. ▪ Capacidad máxima de medición: 170 [kPa]. ▪ Error polinomial máximo: 0,0897 [%] de la capacidad máxima de medición. Asociado a la corrección polinomial señalada en la hoja de calibración. ▪ Hoja de calibración: <i>Figura B.3. en Anexo B.2.</i>

<p>P190052</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Piezómetro CV de tamaño medio, con cable azul de 5 [m] de largo. ▪ Marca: Sisgeo. ▪ Filtros: HAE y LAE. ▪ Capacidad máxima de medición: 170 [kPa]. ▪ Error polinomial máximo: 0,1612 [%] de la capacidad máxima de medición. Asociado a la corrección polinomial señalada en la hoja de calibración. ▪ Hoja de calibración: <i>Figura B.5 en Anexo B.3.</i>
<p>P180263</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Piezómetro CV de tamaño medio, con cable azul de 15 [m] de largo. ▪ Marca: Sisgeo. ▪ Filtro: LAE. ▪ Capacidad máxima de medición: 1000 [kPa]. ▪ Error polinomial máximo: 0,03449 [%] de la capacidad máxima de medición. Asociado a la corrección polinomial señalada en la hoja de calibración. ▪ Hoja de calibración: <i>Figura B.7 en Anexo B.4.</i>

<p>P171023</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Piezómetro CV con cable azul de 15 [m] de largo. ▪ Marca: Sisgeo. ▪ Filtro: LAE. ▪ Capacidad máxima de medición: 1000 [kPa]. ▪ Error polinomial máximo: 0,11533 [%] de la capacidad máxima de medición. Asociado a la corrección polinomial señalada en la hoja de calibración. ▪ Hoja de calibración: <i>Figura B.8 en Anexo B.5.</i>
<p>P349983</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Piezómetro CV ventilado con cable azul de 15 [m] de largo. ▪ Marca: Geosense. ▪ Filtro: LAE. ▪ Capacidad máxima de medición: 5175 [kPa]. ▪ Error polinomial máximo: 0,0317 [%] de la capacidad máxima de medición. Asociado a la corrección polinomial señalada en la hoja de calibración. ▪ Hoja de calibración: <i>Figura B.9 en Anexo B.6.</i>

P571501		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Piezómetro CV con cable naranja de 100 [m] de largo. ▪ Marca: ACE. ▪ Filtro: HAE unido al sensor. ▪ Capacidad máxima de medición: 686,47 [kPa]. ▪ Error polinomial máximo: 0,06017 [%] de la capacidad máxima de medición. Asociado a la corrección polinomial señalada en la hoja de calibración. ▪ Hoja de calibración: <i>Figura B.10 en Anexo B.7.</i>
---------	---	---

El detalle de la capacidad máxima de medición y del error asociado de cada instrumento, expresado en [kPa] y [m.c.a.]⁶, se puede observar en el *Anexo A.1*.

3.2. Data logger y software utilizado

El sistema de adquisición de datos (data logger) usado en cada una de las pruebas de laboratorio, corresponde a un analizador dinámico de cuerda vibrante de 8 canales, modelo CDM-VW305 y de la marca Campbell Scientific.

⁶ [m.c.a.] = metro columna de agua.



Figura 13: Analizador dinámico de cuerda vibrante de 8 canales, modelo CDM-VW305, marca Campbell Scientific.

El CDM-VW305 posee una interface de 8 canales para sensores de cuerda vibrante que permite que el intervalo de tiempo entre medidas sea muy corto. El analizador reduce significativamente el ruido a menudo existente en el uso de sensores de cuerda vibrante. Esto permite poder utilizar cables largos de señal, y por tanto obtener flexibilidad a la hora de ubicar el sensor y data logger.

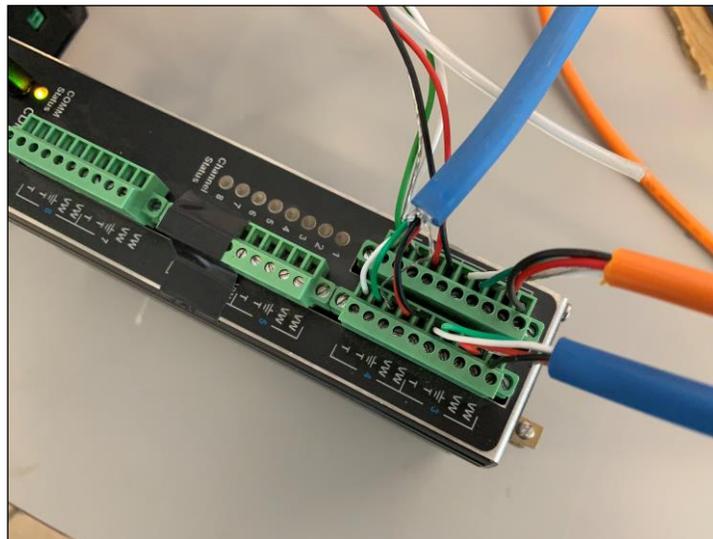


Figura 14: Data logger CDM-VW305 en funcionamiento, 4 piezómetros CV conectados en simultáneo. Los cables rojo y negro corresponden al sensor de cuerda vibrante; los cables verde y blanco, al termistor del instrumento. El quinto cable corresponde al de tierra.

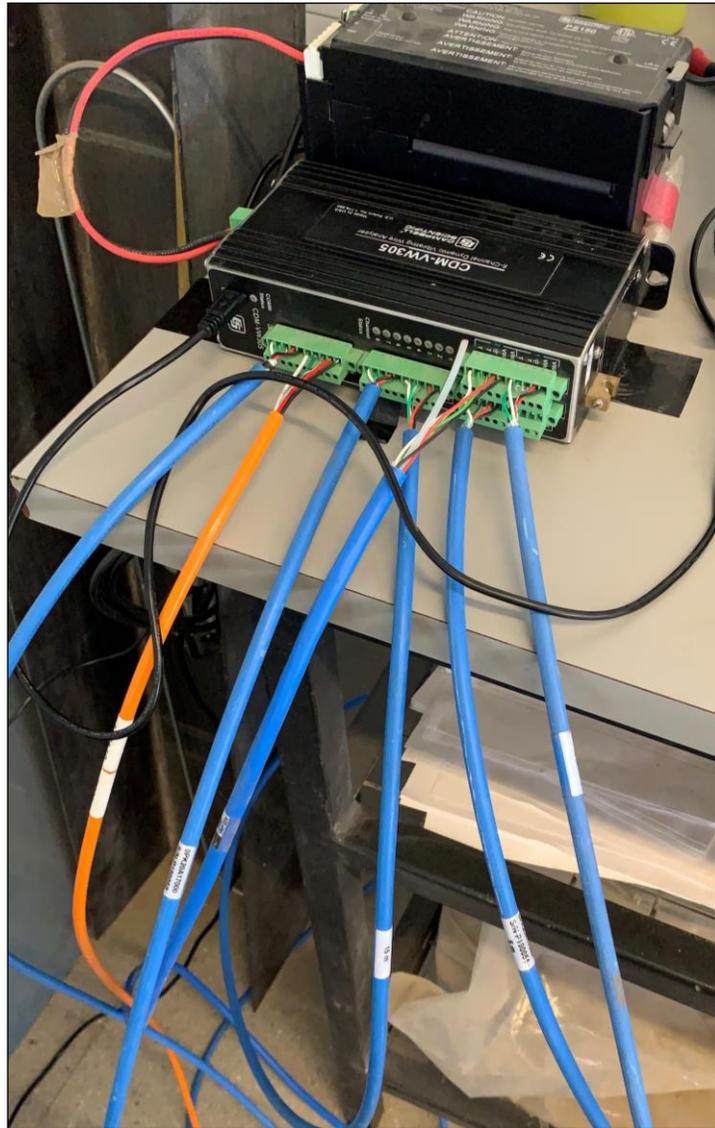


Figura 15: Data logger CDM-VW305 en funcionamiento, 7 piezómetros CV conectados en simultáneo.

El software asociado al data logger corresponde a **DVW Toolbox**, y se utiliza para configurar los ajustes y registrar las mediciones de los sensores conectados al CDM-VW305. Dentro de todos los ajustes posibles, los que resultan relevantes para este trabajo de título corresponden a la frecuencia de muestreo, la tasa de actualización del software, los límites de baja y alta frecuencia, la configuración del termistor, el formato de salida y por sobre todos, la amplitud resonante. El software permite además visualizar, al clicar la opción "Graph", un gráfico en tiempo real de la frecuencia dinámica de salida v/s el tiempo de cada uno de los sensores (*Figura 17*). Por último, con la configuración deseada establecida, se registra la medición de los piezómetros CV al clicar la opción "Save Data" (el formato de guardado corresponde a un archivo de texto).

DVW Toolbox

Sample Rate: 20 Hz

Graph | CRBasic Code | Save Data | View | Help

Configuración del Termistor

	Enable	Dynamic Frequency (Hz)	Static Frequency (Hz)	Static Thermistor (°C)	Std Dev of Dyn Freq (Hz)	Excitation Strength (V)	Actual Low Freq (Hz)	Actual High Freq (Hz)	Resonant Amplitude (mV)	Low Frequency Boundary (Hz)	High Frequency Boundary (Hz)	Settings
Channel 1	<input checked="" type="checkbox"/>	2962.350	2962.343	18.922	0.004	6.000	1955	4005	3.60	2000	4000	...
Channel 2	<input checked="" type="checkbox"/>	3082.437	3082.425	19.161	0.006	6.000	1955	4005	5.70	2000	4000	...
Channel 3	<input type="checkbox"/>	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	...
Channel 4	<input checked="" type="checkbox"/>	2950.208	2950.183	19.046	0.022	6.000	1955	4005	0.65	2000	4000	...
Channel 5	<input checked="" type="checkbox"/>	2937.332	2937.338	19.773	0.008	6.000	1955	4005	2.50	2000	4000	...
Channel 6	<input checked="" type="checkbox"/>	2932.102	2932.105	19.537	0.021	6.000	1955	4005	0.90	2000	4000	...
Channel 7	<input checked="" type="checkbox"/>	2321.483	2321.491	19.691	0.054	6.000	1955	4005	0.40	2000	4000	...
Channel 8	<input checked="" type="checkbox"/>	2858.234	2858.235	19.391	0.023	6.000	1955	4005	0.55	2000	4000	...

Frecuencia de Muestreo

Formato de Salida

Amplitud Resonante

Límite de Baja y Alta Frecuencia

Device Name: CDM-VW305 | Device Type: CDM-VW305

CPI Address: 1 | CPI Speed: Auto-Detect (recommended) | Serial Number: 1030-2

Com Port: CDM-VW300 (COM3) | DVW Toolbox Update Rate: 2 Hz

Tasa de Actualización de DVW Toolbox

Figura 16: DVW Toolbox - Configuración establecida para las pruebas de laboratorio estáticas y dinámicas.

El software ofrece como salida un registro de frecuencias en unidades de [Hz] y de tiempo en milisegundos [ms], así como también el valor de la temperatura registrada por cada sensor en [°C]. Con estos datos, y haciendo uso de las hojas de calibración asociadas a cada piezómetro CV (*Anexo B*), es posible determinar la presión ejercida por el agua en cada ensayo. Dicha presión se mide en [kPa], y para objeto de este trabajo, se lleva a presión en metro columna de agua [m.c.a.].

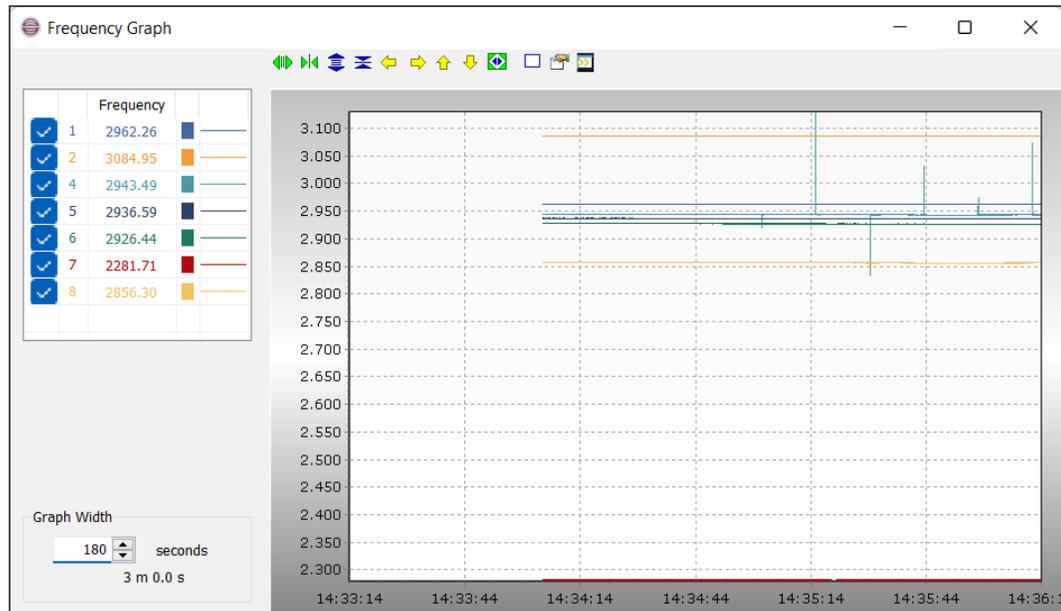


Figura 17: Gráfico en tiempo real de la frecuencia dinámica de salida v/s el tiempo de cada piezómetro CV.

En la *Figura 16* se puede observar la configuración establecida para todas las pruebas de laboratorio, tanto estáticas como dinámicas, destacándose los siguientes ajustes:

- Frecuencia de muestreo (Sample Rate): 20 [Hz].
- Tasa de actualización de DVW Toolbox (DVW Toolbox Update Rate): 2 [Hz].
- Formato de salida (Dynamic Frequency): valores en [Hz].
- Configuración del termistor (Static Thermistor): valores en [°C].
- Límite de baja frecuencia (Low Frequency Boundary): 2000 [Hz].
- Límite de alta frecuencia (High Frequency Boundary): 4000 [Hz].

El ajuste más relevante para obtener mediciones correctas, es decir, mediciones exactas, corresponde a la amplitud resonante (Resonant Amplitude), es decir, el valor que se le entrega al piezómetro de cuerda vibrante para que el cable oscile a su frecuencia resonante. Cabe destacar que este ajuste no es un valor fijo, sino que varía con respecto a cada piezómetro de cuerda vibrante y también se ve influenciado por el ambiente en el que está midiendo el sensor. A medida que varía la presión ejercida por el agua, se debe ir ajustando la amplitud resonante hasta hallar el valor óptimo. El software levanta alertas de advertencias como las indicadas en la *Figura 18*,

en donde el símbolo (🔊) indica que se debe reajustar la amplitud resonante puesto que la “respuesta es de baja amplitud”. El valor predeterminado es 2 [mV], y es un buen valor para la mayoría de los medidores en condiciones típicas. Pese a lo anterior, se evidenció a lo largo del trabajo que, en la mayoría de las pruebas, dadas las configuraciones realizadas, se tuvo que reajustar dicho valor hasta hallar el óptimo.

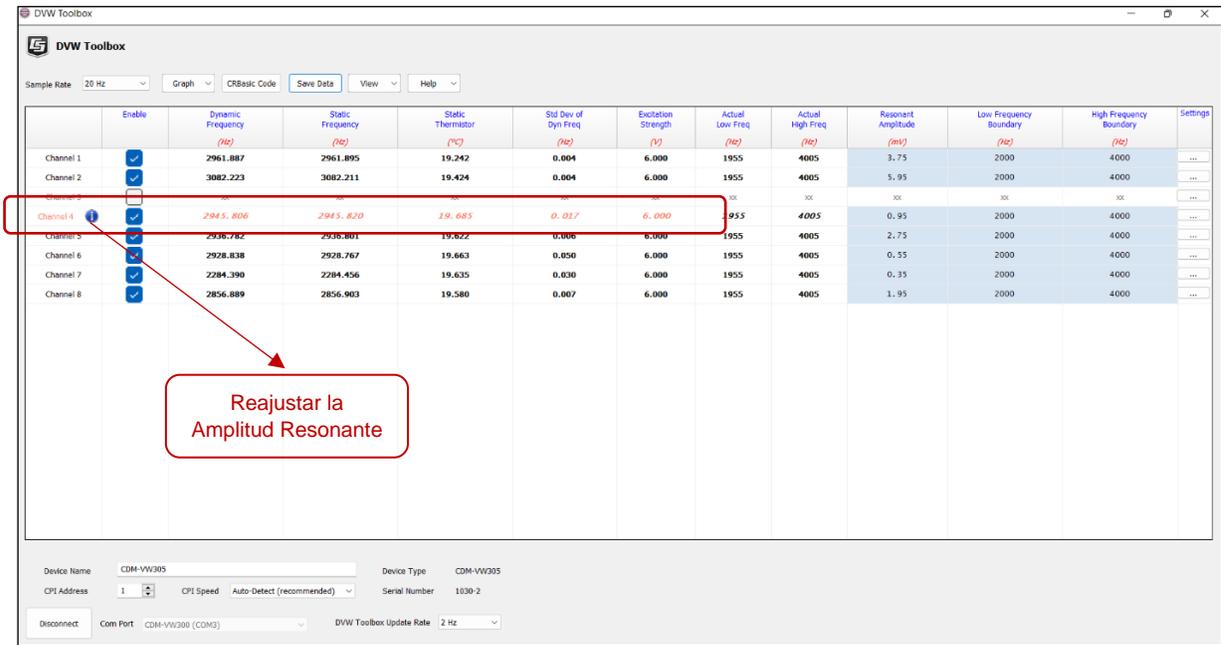


Figura 18: DWV Toolbox - Alerta de advertencia. Se debe reajustar la Amplitud Resonante.

3.3. Ensayos de suelo

3.3.1. Ensayo de determinación de distribución granulométrica

El análisis granulométrico corresponde a un ensayo que se realiza para determinar la distribución de los tamaños de las partículas que componen una muestra de suelo. Así, a partir de los diámetros característicos, tales como el D_{10} , D_{30} y D_{60} , permite identificar la uniformidad y nivel de graduación de la muestra. A continuación, se presenta el procedimiento que se lleva a cabo. Cabe destacar que, para la realización de este ensayo, se requiere de un set de tamices de malla de alambre forjado con aberturas rectangulares de distinto tamaño, como el observado en la *Figura 19*.



Figura 19: Set de tamices ASTM tipo.

Procedimiento:

- a. Se pesa la muestra de suelo, con bolones y sin ellos.
- b. Se pasa la muestra seca de suelo por la malla 3/8" (9.5 mm) y se separa el material que pasa esta malla con el fin de determinar posteriormente el porcentaje de finos retenido en forma confiable.
- c. Se hace pasar el material que queda retenido en la malla 3/8" (9.5 mm) por todas aquellas mallas de tamaño de apertura mayor, y se pesan las porciones de material que queda retenido en cada una de ellas.
- d. Se mezcla y homogeniza el material que pasa la malla 3/8" (9.5 mm) y se selecciona una muestra representativa.
- e. Finalmente, se hace pasar la muestra representativa por las mallas que restan y se pesa la porción de suelo que queda retenida en cada una.

La curva de distribución granulométrica se construye graficando el porcentaje de material que pasa por la malla i , P_i , como función de la apertura D_i de la malla. Los resultados obtenidos deben ser graficados en escala semi-logarítmica como lo indica la *Figura A.1*. Los cálculos para determinar P_i se detallan en la sección *Anexo A.2.1*.

A partir de la curva de distribución granulométrica, se pueden obtener los diámetros característicos D_{10} , D_{30} y D_{60} y calcular los coeficientes de uniformidad C_u y curvatura C_c , definidos en la sección *Anexo A.2.1*. Finalmente, para clasificar el suelo se utilizan las tablas de la norma ASTM D2487, observadas en la *Figura A.2*.

Este ensayo se lleva a cabo para los dos suelos utilizados en las pruebas de laboratorio desarrolladas en este trabajo de título. Uno de los suelos corresponde a una arena normalizada presente en el Laboratorio de Sólidos, Medios Particulados y Estructuras de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM), mientras que el otro suelo corresponde a arenas de relaves del tranque de relaves El Torito.

3.3.2. Ensayo de permeabilidad de carga constante

La permeabilidad de un suelo se mide a través del coeficiente de permeabilidad k , que es un parámetro que define la mayor facilidad o dificultad que el suelo ofrece al flujo del agua. Existen dos métodos generales de laboratorio para determinar directamente el coeficiente de permeabilidad de un suelo, estos son el método de carga constante y el método de carga variable. A continuación, se presenta el procedimiento que se lleva a cabo, siguiendo la norma ASTM D2434.

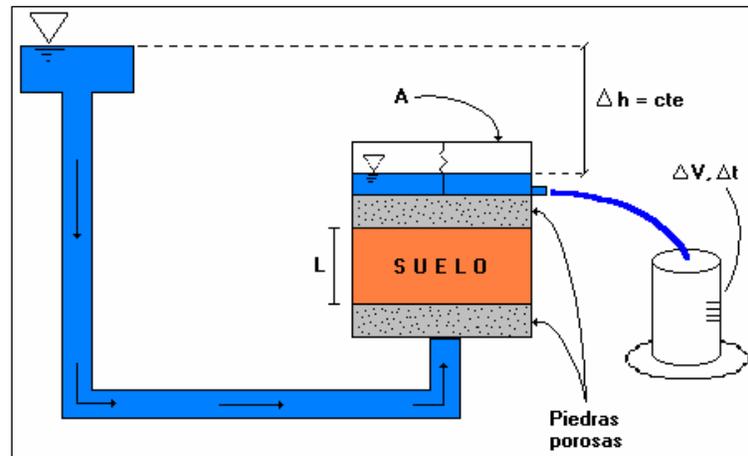


Figura 20: Esquema representativo del ensayo de permeabilidad de carga constante.

Procedimiento:

- Se determina la densidad natural del suelo a ensayar. Para ello, se debe conocer las dimensiones y peso del recipiente que se utiliza para pesar la muestra de suelo.
- Se determina el volumen del molde que contiene el suelo durante el ensayo.
- A partir de la densidad natural, y conociendo el volumen del molde, se calcula el peso total de suelo a utilizar.
- Se compacta el suelo al interior del molde en tres capas iguales, utilizando una vara de madera graduada.
- Se arma el aparato, orientando las tuberías de entrada y salida de manera conveniente para la recolección de agua y su posterior saturación.

- f. Se conecta la entrada del agua al recipiente de suministro. Luego, se deja saturar lentamente la muestra (por observación visual), para luego estabilizar la condición de flujo permitiendo que fluya agua por un tiempo. Finalmente, se cierra la válvula de entrada y salida.
- g. Se utiliza un recipiente de 500 [ml] para recibir el agua a la salida del permeámetro.
- h. Se fija una carga de agua en el permeámetro de carga constante.
- i. Se establece un rango de tiempo y se registra el volumen de agua que sale del recipiente durante dicho periodo. Este proceso se repite cinco veces más.
- j. Posteriormente, se repite dos veces más todo el proceso descrito anteriormente, pero cambiando la carga de agua cada vez.

Por último, se calcula el coeficiente de permeabilidad k , utilizando la Ley de Darcy y promediando los resultados obtenidos. Se expresan los resultados en [cm/s], siguiendo las ecuaciones definidas en la sección *Anexo A.3.1*.



Figura 21: Ensayo de permeabilidad de carga constante - Preparación. A la derecha se puede apreciar el permeámetro de carga constante.



Figura 22: Ensayo de permeabilidad de carga constante - Ejecución.

Este ensayo se lleva a cabo para los dos suelos utilizados en las pruebas de laboratorio desarrolladas en este trabajo de título. Uno de los suelos corresponde a una arena normalizada presente en el Laboratorio de Sólidos, Medios Particulados y Estructuras de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM), mientras que el otro suelo corresponde a arena de relaves del tranque de relaves El Torito.

3.4. Descripción de pruebas de laboratorio, estáticas y dinámicas, con piezómetros de cuerda vibrante (CV)

Se realizan siete pruebas, de las cuales seis son estáticas y una es dinámica. A modo general, las primeras cinco pruebas se llevan a cabo en un contenedor sólo con agua, para luego sumar el suelo (una prueba) y finalmente la prueba de impacto que simula un sismo.

Como se indica en el marco teórico, muchas veces se pasan por alto ciertas consideraciones que ponen en riesgo la fidelidad de las mediciones, como, por ejemplo, la elección correcta del filtro o la correcta saturación de este. Es por esto que una de las pruebas tiene como objetivo identificar alguna variación entre medir con un filtro correctamente saturado y otro sin saturar, o si hay algún cambio al sustituir un filtro de baja resistencia a la entrada de presión de aire (LAE) por uno de alta resistencia a la entrada de presión de aire (HAE).

En cuanto a las pruebas con suelo, se utilizan dos tipos de arenas, una con alta permeabilidad y otra con una permeabilidad más baja. En estos casos resulta interesante observar las diferencias que surgen al medir en suelos con diferentes permeabilidades, y cómo se comporta cada filtro del piezómetro según el tipo de suelo, es decir, poder evidenciar las posibles variaciones en las mediciones de acuerdo con el filtro utilizado. Muchas veces se asume que el filtro que viene por defecto no tiene relación con el suelo en donde se quiere medir.

Finalmente, en cuanto a la prueba de impacto, que en síntesis consiste en golpear reiteradamente una placa metálica situada sobre cada uno de los dos suelos ensayados, tiene la finalidad de observar el comportamiento de los piezómetros de cuerda vibrante ante la presencia de vibraciones en el sistema, es decir, que tan rápido responden frente a cambios externos, observando además las limitaciones que posee el instrumento dependiendo del suelo en el que esté midiendo.

Para la realización de estas pruebas de laboratorio se cuenta con los siguientes instrumentos y materiales, considerando además los descritos anteriormente en las *Secciones 3.1, 3.2 y 3.3*:

- Permeámetro de carga constante.
- 1 contenedor de acrílico para agua y suelo, de aproximadamente 104 litros.
- Huincha de medir metálica.
- Mazo de goma y placa metálica para simular las pruebas de impacto dinámico.
- Huinchas y cintas aislantes.
- Tubo de PVC.
- Embudo de plástico.

Cabe destacar que la duración de cada una de las pruebas cambió a lo largo del trabajo realizado. En un comienzo, al no tener pleno conocimiento del funcionamiento de los piezómetros

CV, así como también de los filtros usados y de los resultados que se obtendrían, se llevaron a cabo ensayos de 30 minutos de duración. Luego, al observar que no variaba la medición de cada uno al cabo de cierto tiempo, se optó por disminuir la duración de cada prueba a 10 minutos. Finalmente, y dada la configuración de algunas pruebas, se realizaron mediciones en un periodo de 2 a 3 minutos.

Además, en la mayoría de las pruebas se usa una huincha de medir metálica, fijada en una de las caras internas del contenedor de acrílico, para registrar la carga (altura) de agua presente en el sistema, y luego poder compararla con la registrada por cada uno de los piezómetros CV. En otras palabras, para determinar la exactitud de cada medición, se utiliza como referencia la carga de agua registrada con la huincha de medir.

Por último, hay que tener presente la “lectura de presión cero” de cada instrumento, con el objetivo de obtener un valor correcto de la presión en metro columna de agua [m.c.a.] en cada ensayo, así como también la altura de los filtros y de la distancia existente entre el diafragma de cada sensor con su extremo libre, es decir, el espacio en donde se inserta el filtro. Dicha lectura se define a continuación, como la primera prueba de laboratorio.

En la siguiente tabla se presenta un resumen con todas las pruebas de laboratorio que se desarrollan en este trabajo de título.

Tabla 3: Pruebas de laboratorio desarrolladas en este trabajo de título (elaboración propia).

#	Prueba de laboratorio	Presencia de agua	Presencia de suelo
1	Consideración de presión atmosférica – Lectura presión cero.	✗	✗
2	Verificación de calibración y prueba con carga hidráulica.	✓	✗
3	Verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros.	✓	✗
4	Verificación de mediciones con inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo).	✓	✗
5	Verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo (dentro del contenedor).	✓	✗
6	Verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad.	✓	✓
7	Verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto).	✓	✓

3.4.1. Consideración de presión atmosférica – Lectura presión cero

➤ **Objetivo:**

El objetivo de esta prueba es poder determinar la lectura de presión cero de cada piezómetro CV. Además, poder evidenciar si existe alguna diferencia entre las mediciones realizadas con los piezómetros sin filtro, con filtro LAE y con filtro HAE, cuando no se tiene saturada la cámara del sensor ni los filtros usados. Y finalmente poder comparar lo recién indicado con los casos en los que la cámara y los filtros sí están saturados, recordando que una incorrecta saturación genera errores en las mediciones (baja exactitud).

Los piezómetros CV están diseñados de tal manera que incluso cuando no hay presión sobre el diafragma, la cuerda vibra a una frecuencia inicial. Esto implica que incluso con presión cero, hay alguna lectura de frecuencia inicial. Por lo tanto, es importante determinar la lectura cero con la mayor exactitud y precisión posible, ya que este valor se utilizará en todas las correcciones posteriores con el objetivo de determinar correctamente la presión medida con cada piezómetro.

➤ **Instrumentos y materiales usados:**

- Piezómetros CV.
- Filtros LAE y HAE.
- Data logger.
- Recipiente con agua para saturar correctamente la cámara del sensor y los filtros.

➤ **Metodología:**

Para obtener una correcta lectura de presión cero, primero se llena un balde grande con agua potable limpia, procurando que no haya factores externos que alteren su temperatura. Luego, se retiran los filtros y se colocan los piezómetros en el fondo del balde, tal como lo indica el fabricante, durante al menos 1 hora. Se realiza el mismo procedimiento con los filtros, procurando retirar todas las burbujas de su interior, para luego colocarlos en el fondo del balde en posición vertical, con los poros más próximos a la superficie. Este último gran detalle permite que las posibles burbujas suban, atraviesen los poros, y den como resultado una correcta saturación.

Ahora bien, sin perjuicio de lo anterior, los primeros tres ensayos se llevan a cabo en condición no saturada, es decir, sin haber estado previamente en contacto con agua. El primer ensayo consiste en situar los piezómetros CV, sin el filtro, en posición vertical, con el extremo libre apuntando hacia abajo, tal y como se observa en la *Figura 23*. Luego, se lleva a cabo el ensayo con el filtro LAE, manteniendo la configuración descrita anteriormente, y sólo para tres de los siete piezómetros CV, se realiza el mismo ensayo, pero esta vez ocupando el filtro HAE. Finalmente, se realizan los tres ensayos descritos anteriormente, pero considerando la condición saturada, es decir, con la cámara del sensor y los filtros (LAE y HAE) saturados, como se describe al comienzo de este apartado.



Figura 23: Ensayo de consideración de presión atmosférica. Sin filtro. Condición no saturada.

3.4.2. Verificación de calibración y prueba con carga hidráulica

➤ **Objetivo:**

El objetivo de esta prueba es poder corroborar que la calibración indicada por el fabricante, para cada piezómetro CV, es correcta; y en su defecto, verificar la existencia de errores en las mediciones, para poder controlarlos con el objetivo de lograr una mayor exactitud y confiabilidad. Además, el uso del permeámetro de carga constante permite poder observar y comparar durante un mismo registro de datos, las diferentes cargas (alturas) de agua que se fijan, y con ello, poder determinar la exactitud y precisión de cada uno de los sensores.

➤ **Instrumentos y materiales usados:**

- Piezómetros CV.
- Filtros LAE y HAE.
- Data logger.
- Recipiente con agua para saturar correctamente la cámara del sensor y los filtros.
- Permeámetro de carga constante.
- Conector (manguera) entre el permeámetro y cada piezómetro.
- Hojas de calibración de los sensores de los piezómetros CV.

➤ **Metodología:**

Estos ensayos se llevan a cabo en condición saturada, es decir, con las cámaras y filtros saturados. Para esta prueba se conecta el cabezal de cada sensor, es decir, de cada uno de los

piezómetros CV, a la columna de agua de carga constante del permeámetro, utilizando para ello un trozo de manguera que facilite la conexión, tal y como se observa en la *Figura 24*. El piezómetro CV se sitúa sobre el mesón de trabajo, puesto que este último se encuentra a la misma altura de inicio del permeámetro. Esto quiere decir que la carga de agua que se fije en el permeámetro corresponderá exactamente a la diferencia de altura entre esta y el mesón de trabajo.

Se ensaya cada uno de los siete piezómetros CV disponibles, usando el permeámetro de carga constante, pero estableciendo tres cargas de agua diferentes: 2,40; 1,40 y 0,40 [m.c.a]. Además, al igual que la prueba anterior, los primeros ensayos se llevan a cabo sin el filtro, luego se realizan con el filtro LAE, manteniendo la misma configuración, y sólo para tres de los siete piezómetros CV, se realiza el mismo ensayo, pero esta vez ocupando el filtro HAE.

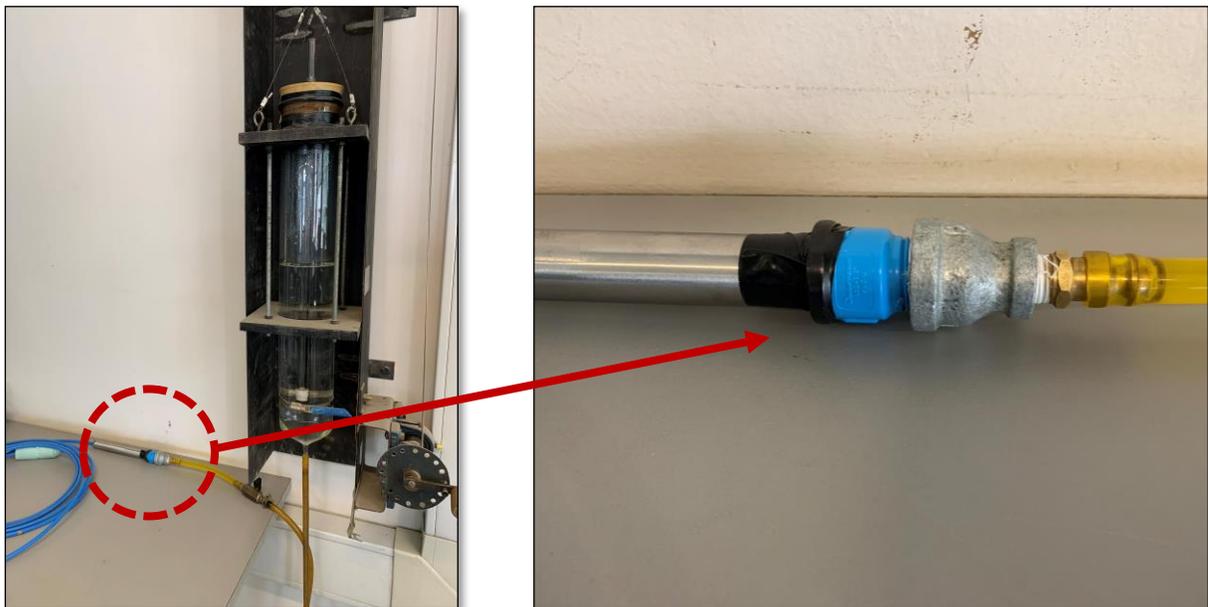


Figura 24: Ensayo de verificación de calibración y prueba con carga hidráulica. Sin filtro. Condición saturada. En la imagen de la izquierda es posible observar el permeámetro de carga constante, mientras que en la imagen de la derecha se pueda observar en detalle la conexión entre el piezómetro CV y la manguera que conecta al permeámetro.

3.4.3. Verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros

➤ Objetivo:

El objetivo de esta prueba es poder evidenciar si existe alguna diferencia entre las mediciones realizadas con los piezómetros CV sin filtro, con filtro LAE y con filtro HAE, cuando se tienen diferentes condiciones de saturación, es decir, comparar los casos en los que no se tiene saturada la cámara del sensor ni los filtros usados, con los casos en los que sí están saturados, recordando que una incorrecta saturación genera errores en las mediciones (baja exactitud).

➤ **Instrumentos y materiales usados:**

- Piezómetros CV.
- Filtros LAE y HAE.
- Data logger.
- Contenedor de acrílico con agua.
- Huincha de medir metálica.
- Recipiente con agua para saturar correctamente la cámara del sensor y los filtros.

➤ **Metodología:**

La prueba consiste en situar los piezómetros CV en posición horizontal en el fondo del contenedor de acrílico, en presencia sólo de agua, tal y como se observa en la *Figura 25* y *Figura 26*. Los primeros ensayos se llevan a cabo sin el filtro, pero con la cámara del sensor saturada. Luego, se llevan a cabo los ensayos con el filtro LAE, primero sin saturar y luego con el filtro saturado, manteniendo la configuración descrita anteriormente. Además, y sólo para tres de los siete piezómetros CV, se realiza el mismo ensayo, pero esta vez ocupando el filtro HAE, primero sin saturar y luego con el filtro saturado. En cada uno de los ensayos se procura mantener la misma carga (altura) de agua al interior del contenedor.



Figura 25: Ensayo de verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros. Filtros HAE. Condición saturada.



Figura 26: Ensayo de verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros. Filtros LAE. Condición no saturada.

3.4.4. Verificación de mediciones con inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo)

➤ **Objetivo:**

El objetivo de esta prueba es poder evidenciar si existe alguna diferencia entre las mediciones realizadas con los piezómetros CV sin filtro, con filtro LAE y con filtro HAE, cuando se tiene una condición saturada y diferentes posiciones de colocación.

➤ **Instrumentos y materiales usados:**

- Piezómetros CV.
- Filtros LAE y HAE.
- Data logger.
- Contenedor de acrílico con agua.
- Huincha de medir metálica.
- Recipiente con agua para saturar correctamente la cámara del sensor y los filtros.
- Huinchas y cintas aislantes.

➤ **Metodología:**

Para esta prueba se consideran tres posiciones diferentes: horizontal, vertical con el extremo libre (en donde se coloca el filtro) apuntando hacia abajo, y con el extremo libre apuntando hacia arriba. Los piezómetros CV se sitúan al interior del contenedor de acrílico, en presencia sólo de agua, en las posiciones descritas anteriormente, tal y como se observa en la *Figura 27*. Los primeros ensayos se llevan a cabo sin el filtro, pero con la cámara del sensor saturada. Luego, se llevan a cabo los ensayos con el filtro LAE saturado, manteniendo la configuración descrita anteriormente. Además, y sólo para tres de los siete piezómetros CV, se realiza el mismo ensayo, pero esta vez ocupando el filtro HAE saturado. En cada uno de los ensayos se procura mantener la misma carga (altura) de agua al interior del contenedor, y que el cabezal de cada sensor se encuentre a la misma altura, con respecto al fondo, durante la realización de los ensayos.



Figura 27: Ensayo de verificación de mediciones con inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Sin filtro. Condición saturada.

3.4.5. Verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo (dentro del contenedor)

➤ **Objetivo:**

El objetivo de esta prueba es poder evidenciar algún cambio en las mediciones realizadas con los piezómetros CV (sin filtro, con filtro LAE y con filtro HAE en condición saturada) al incorporar un flujo de agua al interior del sistema (contenedor de acrílico).

➤ **Instrumentos y materiales usados:**

- Piezómetros CV.
- Filtros LAE y HAE.
- Data logger.
- Contenedor de acrílico modificado, que permite el flujo de agua.
- Huincha de medir metálica.
- Recipiente con agua para saturar correctamente la cámara del sensor y los filtros.
- Huinchas y cintas aislantes.
- Tubo de PVC con una altura mayor a la del contenedor.
- Embudo de plástico.

➤ **Metodología:**

Para esta prueba primero se modifica el contenedor de acrílico usado. Se incorpora un tubo de PVC en la pared interna opuesta a la que tiene la abertura superior, lo más cercano al fondo, con el objetivo de permitir el ingreso del agua por la zona inferior del contenedor, tal y como se observa en la *Figura 28* y *Figura 29*. A su vez, se agrega un embudo en la zona superior del tubo de PVC para poder verter el agua al interior de este. Los piezómetros CV se sitúan en posición vertical en las esquinas internas del contenedor, con el extremo libre (en donde se coloca el filtro) apuntando hacia arriba, lo más próximo al fondo, tal y como se observa en la *Figura 28*. Finalmente, mediante el uso de baldes y bidones, se vierte el agua en el embudo. Inmediatamente después, sale a través de la abertura superior de la pared opuesta, generando de esta forma un flujo ascendente al interior del sistema (contenedor), como se observa en la *Figura 30* y *Figura 31*.



Figura 28: Configuración realizada para generar flujo en el sistema.



Figura 29: Ingreso del agua por la zona inferior del contenedor.

Los primeros ensayos se llevan a cabo sin el filtro, pero con la cámara del sensor saturada. Luego, se llevan a cabo los ensayos con el filtro LAE saturado, manteniendo la configuración descrita anteriormente. Además, y sólo para tres de los siete piezómetros CV, se realiza el mismo ensayo, pero esta vez ocupando el filtro HAE saturado. En cada uno de los ensayos se procura mantener la misma carga (altura) de agua inicial al interior del contenedor, y que el cabezal de cada sensor se encuentre a la misma altura, con respecto al fondo, durante la realización de los ensayos. Con el objetivo de determinar que los posibles cambios en las mediciones realizadas con los piezómetros CV son producto del flujo de agua al interior del sistema, y no de una subida del nivel freático al incorporar el agua, se registra en video cada ensayo.



Figura 30: Ensayo de verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Filtros HAE. Condición saturada.



Figura 31: Ensayo de verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Filtros LAE. Condición saturada.

3.4.6. Verificación de mediciones con suelos de diferente permeabilidad

➤ Objetivo:

El objetivo de esta prueba es poder evidenciar las respuestas de los piezómetros CV (con filtro LAE y HAE en condición saturada) cuando se emula el ambiente al cual deben someterse en la práctica, considerando un suelo de alta permeabilidad (sin contenido de finos), así como también uno de baja permeabilidad (con alto contenido de finos).

➤ Instrumentos y materiales usados:

- Piezómetros CV.
- Filtros LAE y HAE.
- Suelo granular de mayor permeabilidad.
- Suelo granular de menor permeabilidad.
- Data logger.
- Contenedor de acrílico modificado.
- Huincha de medir metálica.
- Recipiente con agua para saturar correctamente la cámara del sensor y los filtros.
- Huinchas y cintas aislantes.
- Embudo de plástico.

➤ **Metodología:**

Para esta prueba se vuelve a modificar el contenedor de acrílico usado, reemplazando el sistema de salida de agua superior, por uno nuevo en la zona inferior que consta de una malla que permite retener el suelo, un ducto de salida y una llave de paso que permite la evacuación del agua de forma controlada, tal y como se observa en la *Figura 32*. A su vez, se sella la abertura superior, con el objetivo de aprovechar la capacidad máxima del contenedor, como se observa en la *Figura 33*. Los piezómetros CV se sitúan en posición vertical en las esquinas y caras internas del contenedor, con el filtro saturado apuntando hacia arriba, lo más próximo al fondo. Luego, se vierte el suelo al interior del contenedor hasta alcanzar la altura límite de este. Mediante el uso de baldes y bidones, se vierte el agua en el embudo, con el objetivo de saturar completamente el suelo (de abajo hacia arriba), tal y como se observa en la *Figura 34* y *Figura 35*.

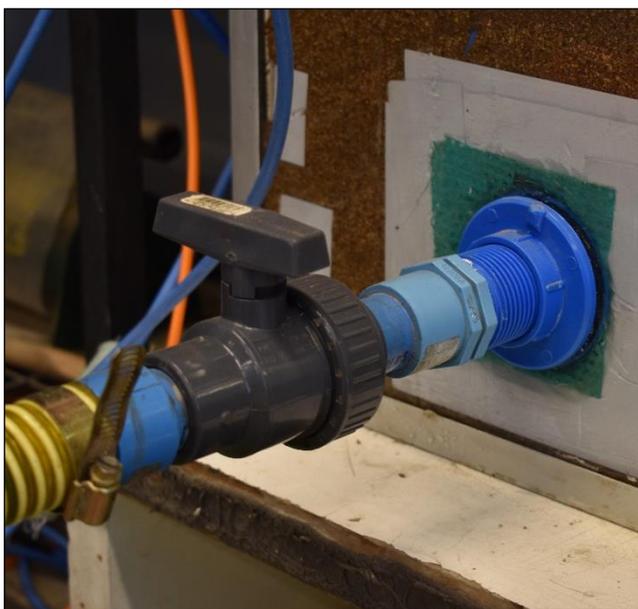


Figura 32: Nuevo sistema de evacuación de agua.



Figura 33: Abertura superior sellada.

El primer ensayo se lleva a cabo usando el suelo de mayor permeabilidad. Por lo tanto, se utilizan los filtros LAE saturados, a excepción del piezómetro CV que tiene el filtro HAE unido al sensor (ver *Tabla 2*). Además, ya que se cuenta con tres piezómetros idénticos, y con la finalidad de ampliar la comparativa de resultados posteriores, se cambia uno de los filtros LAE por uno HAE saturado. El registro de datos comienza una vez que el suelo se encuentra completamente saturado.

El segundo ensayo se lleva a cabo usando el suelo de menor permeabilidad. Como se cuenta con sólo tres filtros HAE (sin contar el adosado a uno de los piezómetros), los únicos en utilizarlos son dos de los tres piezómetros CV idénticos (ver *Tabla 2*), ya que uno de éstos conserva su filtro LAE, con la finalidad de ampliar la comparativa de resultados posteriores. Al igual que el ensayo anterior, el registro de datos comienza una vez que el suelo se encuentra completamente

saturado. Cabe destacar que esta saturación tomó mucho más tiempo que la primera, pasando de casi 15 minutos a 4 horas aproximadamente.

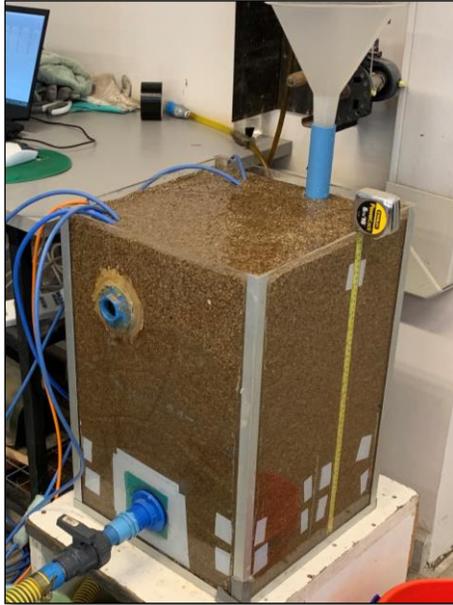


Figura 34: Ensayo de verificación de mediciones con suelos de diferente permeabilidad. Arena (SP) de mayor permeabilidad. Condición saturada.

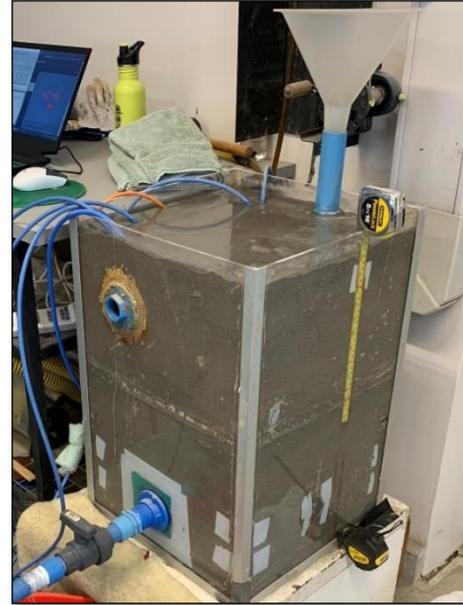


Figura 35: Ensayo de verificación de mediciones con suelos de diferente permeabilidad. Arena de relaves (SP-SM) de menor permeabilidad. Condición saturada.

3.4.7. Verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto)

➤ Objetivo:

El objetivo de esta prueba es poder evidenciar las respuestas de los piezómetros CV (con filtro LAE y HAE en condición saturada) ante situaciones dinámicas que simulan un sismo, cuando al mismo tiempo se emula el ambiente al cual deben someterse en la práctica, considerando un suelo de alta permeabilidad (sin contenido de finos), así como también uno de baja permeabilidad (con alto contenido de finos). Al observar las respuestas es posible determinar las limitaciones que posee el instrumento al someterse a diferentes configuraciones.

➤ Instrumentos y materiales usados:

- Piezómetros CV.
- Filtros LAE y HAE.
- Suelo granular de mayor permeabilidad.
- Suelo granular de menor permeabilidad.
- Mazo de goma y placa metálica.

-
- Data logger.
 - Contenedor de acrílico modificado.
 - Huincha de medir metálica.
 - Recipiente con agua para saturar correctamente la cámara del sensor y los filtros.
 - Huinchas y cintas aislantes.
 - Embudo de plástico.

➤ **Metodología:**

La configuración del sistema y de los piezómetros CV es la misma que la realizada en la prueba anterior con suelo. Una vez concluida la prueba anterior, se lleva a cabo de inmediato esta prueba. Primero se sitúa la placa metálica sobre el suelo saturado, evidenciando un pequeño aumento del nivel freático del sistema dado el peso de la placa. Luego, se usa el mazo de goma para golpear reiteradamente la parte superior de la placa metálica, con diferentes intensidades (baja, media y alta) y en diferentes intervalos de tiempo, con un intervalo máximo en algunos casos de 10 segundos entre cada golpe, con el objetivo de simular una prueba sísmica. Por lo anterior, la respuesta de cada instrumento se ve influenciada por la intensidad y la frecuencia con la que se golpea la masa situada sobre cada uno de los dos suelos ensayados.

El primer ensayo se lleva a cabo usando el suelo de mayor permeabilidad, mientras que el segundo ensayo se lleva a cabo usando el suelo de menor permeabilidad. En ambos casos el suelo está completamente saturado. Cabe destacar que cada golpe que se le da a la placa metálica hunde cada vez más a esta, por lo que, al término del ensayo, termina hundida por completo en el suelo, tal y como se observa en la *Figura 36* y *Figura 37*. Por lo anterior, el nivel freático al término de cada prueba resulta ser algo mayor que el registrado al inicio de esta.

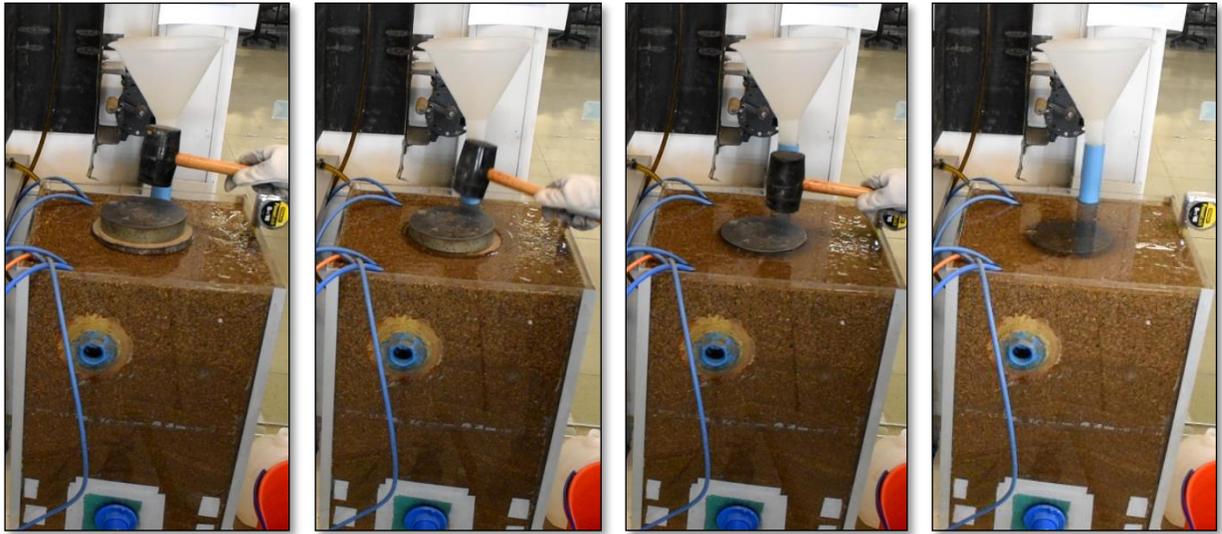


Figura 36: Ensayo de verificación de mediciones en presencia de movimiento (se muestra secuencia de pruebas de impacto). Arena (SP) de mayor permeabilidad. Condición saturada.

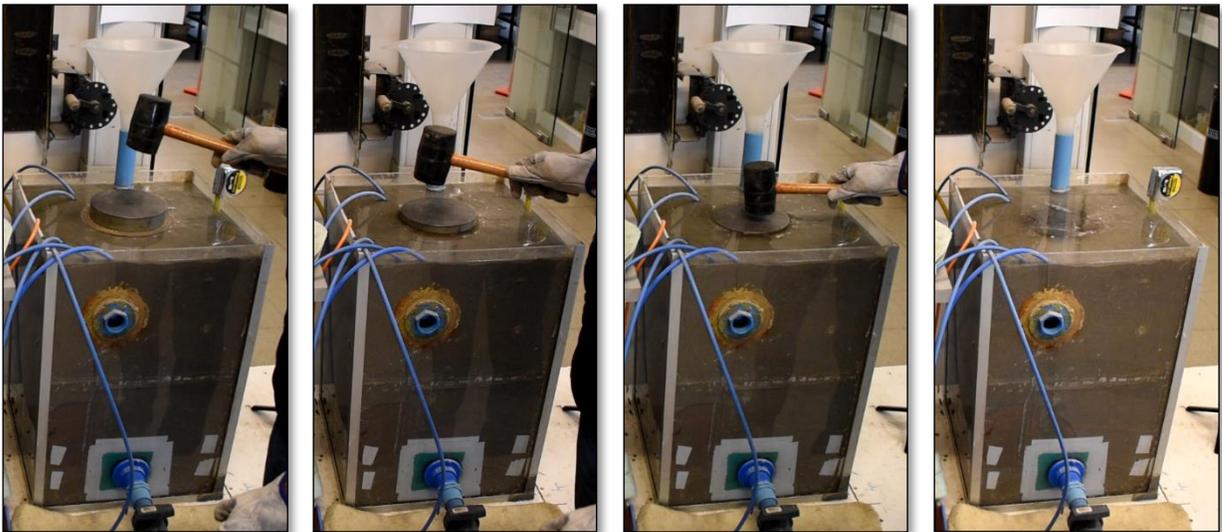


Figura 37: Ensayo de verificación de mediciones en presencia de movimiento (se muestra secuencia de pruebas de impacto). Arena de relaves (SP-SM) de menor permeabilidad. Condición saturada.

4. Presentación de resultados

4.1. Ensayos de suelo

4.1.1. Ensayo de granulometría

A continuación, se detallan los valores obtenidos en el laboratorio al realizar el ensayo de granulometría para cada una de las dos arenas.

❖ Arena de mayor permeabilidad:

Tabla 4: Peso de la muestra de arena de mayor permeabilidad

Material	Diámetro [mm]	Peso [g]
Sobre 3"	75,0	0
Sobre 3/8"	9,5	0
Bajo 3/8"	9,5	499,74
Total		499,74

Tabla 5: Datos ensayo de granulometría. Arena de mayor permeabilidad

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Peso [g]	% Retenido	% Pasa
#4	4,75	0,00	0,00	100,00
#8	2,36	1,32	0,26	99,74
#10	2,00	47,09	9,42	90,31
#30	0,600	423,16	84,68	5,64
#40	0,425	16,46	3,29	2,34
#50	0,300	4,73	0,95	1,40
#100	0,150	4,70	0,94	0,46
#200	0,075	1,70	0,34	0,12
Fondo		0,58	0,12	0,00

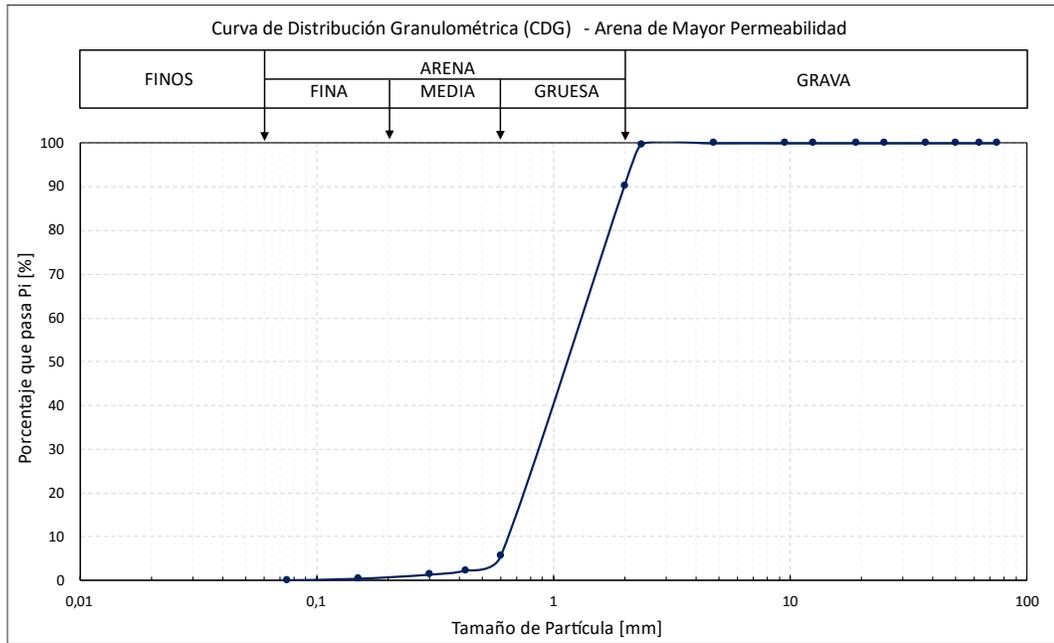


Figura 38: Curva de distribución granulométrica (CDG). Arena de mayor permeabilidad.

En base a la curva de distribución granulométrica anterior (*Figura 38*), y haciendo uso de las ecuaciones correspondientes (*Anexo A.2.1*), se obtienen los siguientes diámetros característicos y coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c).

Tabla 6: Diámetros característicos de la arena de mayor permeabilidad

D_{10} [mm]	D_{30} [mm]	D_{60} [mm]
0,638	0,852	1,313

Tabla 7: Coeficientes de uniformidad y curvatura de la arena de mayor permeabilidad

C_u [-]	C_c [-]
2,058	0,867

Del análisis de la muestra estudiada, cuyos coeficientes de uniformidad y curvatura son $C_u = 2,058$ y $C_c = 0,867$ respectivamente, se determina que corresponde a una **arena mal graduada (SP)**.

❖ Arena de relaves de menor permeabilidad:

Tabla 8: Peso de la muestra de arena de relaves de menor permeabilidad

Material	Diámetro [mm]	Peso [g]
Sobre 3"	75,0	0
Sobre 3/8"	9,5	0
Bajo 3/8"	9,5	99,14
Total		99,14

Tabla 9: Datos ensayo de granulometría. Arena de relaves de menor permeabilidad

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Peso [g]	% Retenido	% Pasa
#4	4,75	0,00	0,00	100,00
#8	2,36	0,00	0,00	100,00
#10	2,00	0,00	0,00	100,00
#30	0,600	4,34	4,38	95,62
#40	0,425	8,48	8,55	87,07
#50	0,300	13,98	14,10	72,97
#60	0,250	9,20	9,28	63,69
#100	0,150	28,44	28,69	35,00
#200	0,075	26,08	26,31	8,69
Fondo		8,62	8,69	0,00

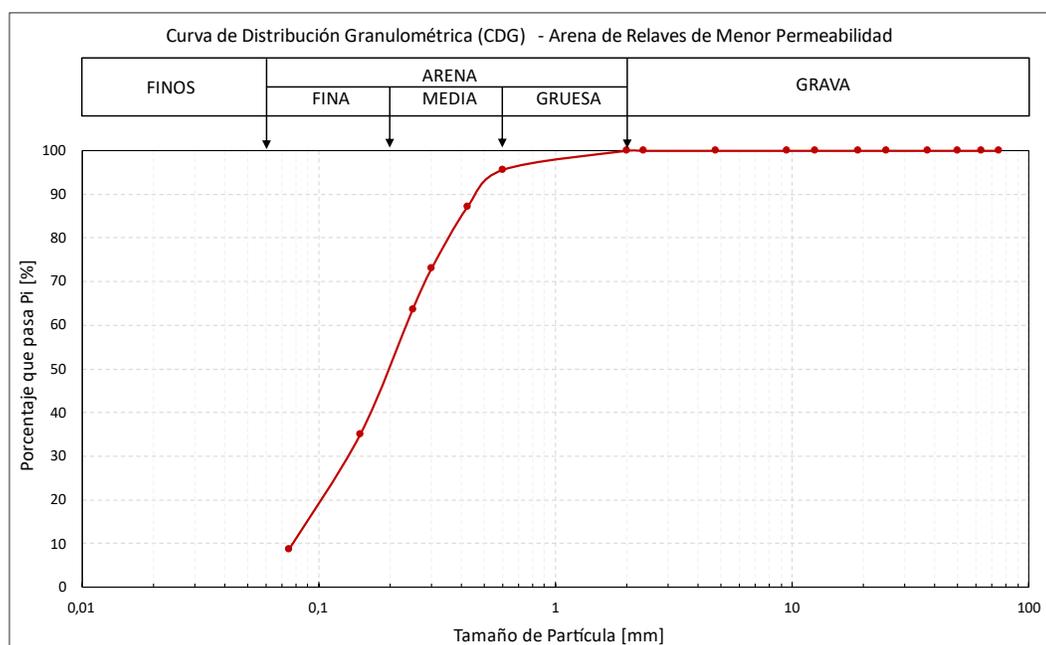


Figura 39: Curva de distribución granulométrica (CDG). Arena de relaves de menor permeabilidad.

En base a la curva de distribución granulométrica anterior (*Figura 39*), y haciendo uso de las ecuaciones correspondientes (*Anexo A.2.1*), se obtienen los siguientes diámetros característicos y coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c).

Tabla 10: Diámetros característicos de la arena de relaves de menor permeabilidad

D_{10} [mm]	D_{30} [mm]	D_{60} [mm]
0,078	0,135	0,236

Tabla 11: Coeficientes de uniformidad y curvatura de la arena de relaves de menor permeabilidad

C_u [-]	C_c [-]
3,026	0,990

Del análisis de la muestra estudiada, cuyos coeficientes de uniformidad y curvatura son $C_u = 3,026$ y $C_c = 0,990$ respectivamente, se determina que corresponde a una **arena mal graduada con limo (SP-SM)**.

4.1.2. Ensayo de permeabilidad de carga constante

A continuación, se detallan los valores obtenidos en el laboratorio al realizar el ensayo de permeabilidad de carga constante para cada una de las dos arenas.

❖ Arena de mayor permeabilidad:

Tabla 12: Datos ensayo de permeabilidad de carga constante. Arena de mayor permeabilidad

Datos de confección	Valor	Unidad
Diámetro muestra	11,782	[cm]
Altura muestra, L	9,932	[cm]
Área muestra, A	109,019	[cm ²]
Volumen muestra	1082,743	[cm ³]
Peso material	1445,090	[g]
Peso por capa	481,697	[g]
Densidad húmeda	1,517	[g/cm ³]

Tabla 13: Resultados ensayo de permeabilidad de carga constante. Arena de mayor permeabilidad

N°	t [s]	V [cm ³]	t [s]	V [cm ³]	t [s]	V [cm ³]
1	60,15	240,30	60,38	345,44	20,27	140,32
2	60,18	241,58	30,03	170,02	30,09	206,24
3	60,45	236,05	30,26	171,08	30,38	207,96
4	60,37	237,45	30,47	171,67	30,33	209,88
5	60,36	237,08	30,14	168,95	30,25	207,97
6	60,20	232,26	30,40	170,38	30,37	209,99
Δh_i ⁷	50	[cm]	70	[cm]	90	[cm]

En base a los resultados obtenidos y detallados en la *Tabla 12* y *Tabla 13*, y haciendo uso de las ecuaciones correspondientes (*Anexo A.3.1*), se obtienen los siguientes coeficientes de permeabilidad.

Tabla 14: Coeficientes de permeabilidad. Arena de mayor permeabilidad

N°	k ₁ [cm/s]	k ₂ [cm/s]	k ₃ [cm/s]
1	9,08 x10 ⁻³	8,68 x10 ⁻³	7,88 x10 ⁻³
2	9,13 x10 ⁻³	8,59 x10 ⁻³	7,80 x10 ⁻³
3	8,88 x10 ⁻³	8,57 x10 ⁻³	7,79 x10 ⁻³
4	8,94 x10 ⁻³	8,54 x10 ⁻³	7,87 x10 ⁻³
5	8,93 x10 ⁻³	8,50 x10 ⁻³	7,82 x10 ⁻³
6	8,77 x10 ⁻³	8,50 x10 ⁻³	7,87 x10 ⁻³
Δh_i [cm]	50	70	90

Promediando los resultados detallados en la tabla anterior, se obtiene que el coeficiente de permeabilidad de la arena es igual a 8,45 x10⁻³ [cm/s].

⁷ Δh_i : corresponde a la carga hidráulica fijada en el permeámetro de carga constante.

❖ Arena de relaves de menor permeabilidad:

Tabla 15: Datos ensayo de permeabilidad de carga constante. Arena de relaves de menor permeabilidad

Datos de confección	Valor	Unidad
Diámetro muestra	10,887	[cm]
Altura muestra, L	10,703	[cm]
Área muestra, A	93,085	[cm ²]
Volumen muestra	996,320	[cm ³]
Peso material	1319,711	[g]
Peso por capa	439,904	[g]
Densidad húmeda	1,385	[g/cm ³]

Tabla 16: Resultados ensayo de permeabilidad de carga constante. Arena de relaves de menor permeabilidad

N°	t [s]	V [cm ³]	t [s]	V [cm ³]	t [s]	V [cm ³]
1	90,88	18,74	90,23	24,02	90,31	26,97
2	90,16	17,97	90,60	23,09	90,24	26,91
3	90,05	17,86	91,35	22,76	89,98	24,97
4	89,84	17,91	90,11	24,50	90,32	24,28
5	90,23	16,42	90,07	23,68	90,19	24,02
6	90,06	15,78	90,20	20,14	90,05	23,35
Δh_i	70	[cm]	90	[cm]	110	[cm]

En base a los resultados obtenidos y detallados en la *Tabla 15* y *Tabla 16*, y haciendo uso de las ecuaciones correspondientes (*Anexo A.3.1*), se obtienen los siguientes coeficientes de permeabilidad.

Tabla 17: Coeficientes de permeabilidad. Arena de relaves de menor permeabilidad

N°	k ₁ [cm/s]	k ₂ [cm/s]	k ₃ [cm/s]
1	4,00 x10 ⁻⁴	3,86 x10 ⁻⁴	3,46 x10 ⁻⁴
2	3,86 x10 ⁻⁴	3,70 x10 ⁻⁴	3,45 x10 ⁻⁴
3	3,85 x10 ⁻⁴	3,61 x10 ⁻⁴	3,21 x10 ⁻⁴
4	3,87 x10 ⁻⁴	3,94 x10 ⁻⁴	3,11 x10 ⁻⁴
5	3,53 x10 ⁻⁴	3,81 x10 ⁻⁴	3,08 x10 ⁻⁴
6	3,40 x10 ⁻⁴	3,24 x10 ⁻⁴	3,00 x10 ⁻⁴
Δh_i [cm]	70	90	110

Promediando los resultados detallados en la tabla anterior, se obtiene que el coeficiente de permeabilidad de la arena de relaves es igual a 3,55 x10⁻⁴ [cm/s].

4.2. Pruebas de laboratorio de los piezómetros de cuerda vibrante (CV)

Como se indica en la *Sección 3.2*, el software **DVW Toolbox** ofrece como salida un registro de frecuencias en [Hz] y de tiempo en [ms], así como también el valor de la temperatura registrada por cada sensor en [°C]. Con estos datos, y haciendo uso de las hojas de calibración (*Anexo B*), se determina la presión ejercida por el agua en [kPa], pero para objeto de este trabajo, se lleva a presión en metro columna de agua [m.c.a.]. Finalmente, estos datos se presentan como gráficos de presión [m.c.a.] v/s tiempo [hh:mm:ss], como los ejemplos mostrados en la *Figura 40* y *Figura 41*. Por cada uno de los ensayos, se obtiene un registro asociado a la medición de cada piezómetro, por lo tanto, se obtienen 162 gráficos.

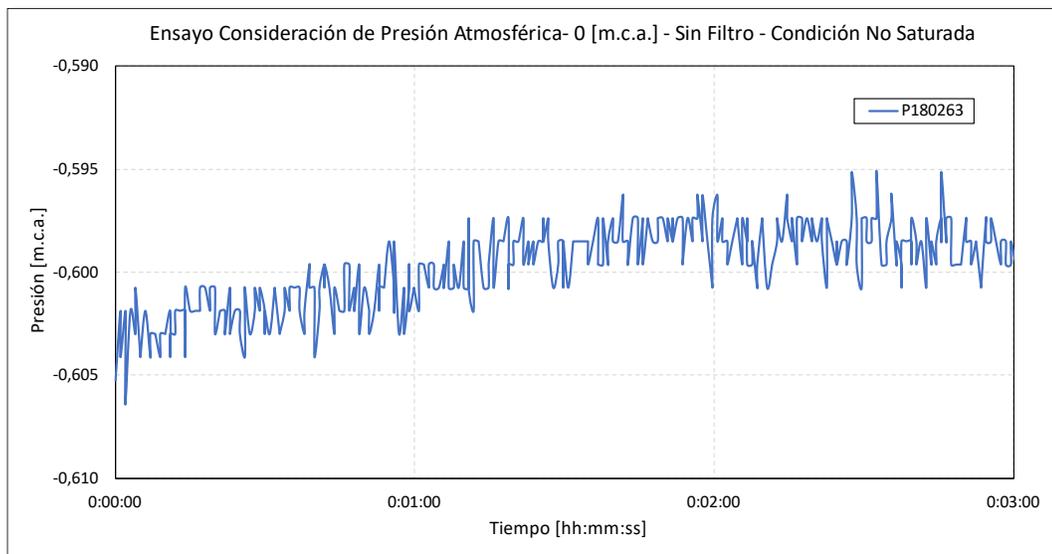


Figura 40: Ejemplo gráfico ensayo consideración de presión atmosférica. Sin filtro. Condición no saturada.

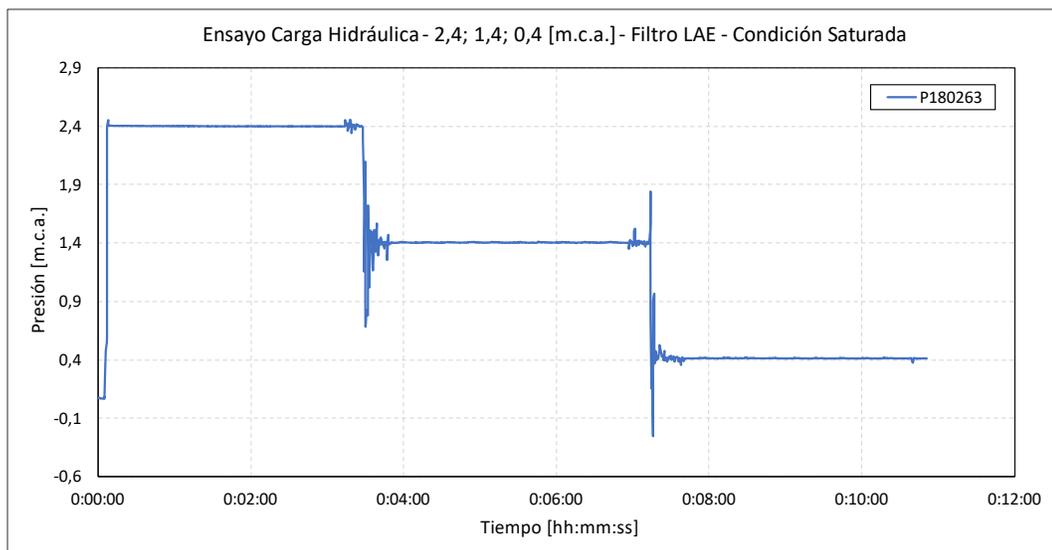


Figura 41: Ejemplo gráfico ensayo de disminución de carga hidráulica. Filtro LAE. Condición saturada.

Pese a lo anterior, en esta sección se presentan gráficos resúmenes, que contienen los valores medios, una vez estabilizada la lectura del instrumento, de cada uno de los 162 gráficos. De esta manera se presentan los datos en forma clara y ordenada, permitiendo su fácil entendimiento y comprensión. Cabe destacar que, en cada medición, además de considerar la lectura de presión cero de cada piezómetro, se considera también la altura del filtro y de la cámara del sensor (espacio en donde se inserta el filtro), cada una de 1,5 [cm].

4.2.1. Consideración de presión atmosférica – Lectura presión cero

El siguiente gráfico muestra una comparativa directa entre las lecturas de presión cero en tres situaciones diferentes, cuando no se tiene el filtro puesto, y cuando si se tiene, ya sea filtro LAE o HAE, todos en condición saturada. El detalle de cada piezómetro CV se puede observar en la *Tabla 2*. Cabe destacar que las lecturas de uno de los piezómetros no se grafican, puesto que son valores que se escapan demasiado del resto. De todas maneras, se indican a continuación en la *Tabla 18*.

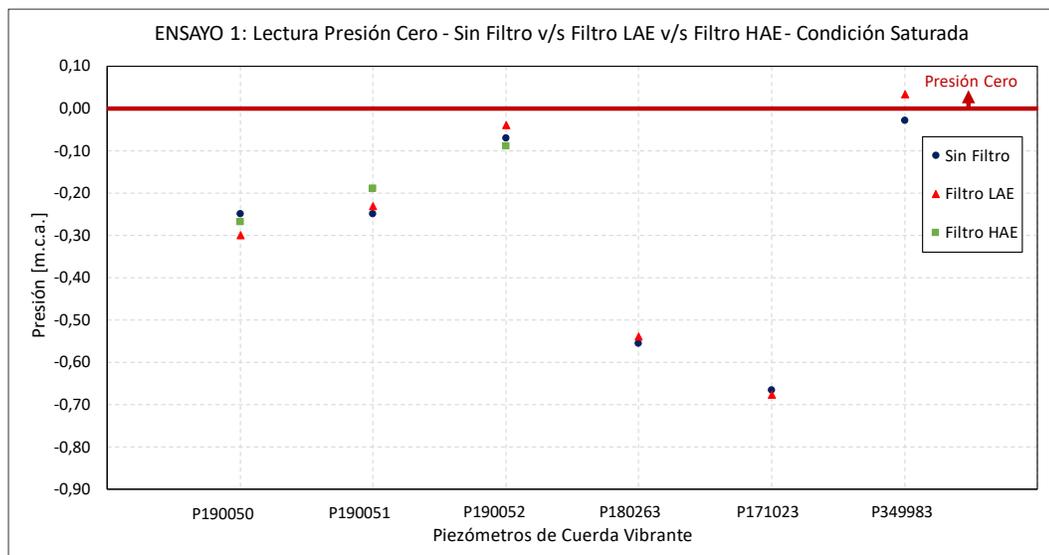


Figura 42: Ensayo 1 lectura presión cero. Sin filtro/ filtro LAE/ filtro HAE. Condición saturada.

Tabla 18: Presión registrada por el piezómetro CV P571501 en condición saturada y no saturada

Piezómetro P571501	Presión [m.c.a.]
Condición saturada	26,62
Condición no saturada	26,46

Cabe recordar que el piezómetro P571501 posee un filtro HAE unido al sensor (no puede removerse), por lo que se registran sólo dos mediciones, condición saturada y no saturada.

También se compara de forma directa la condición saturada con la no saturada, en cada uno de los tres casos: sin filtro, con filtro LAE y con filtro HAE.

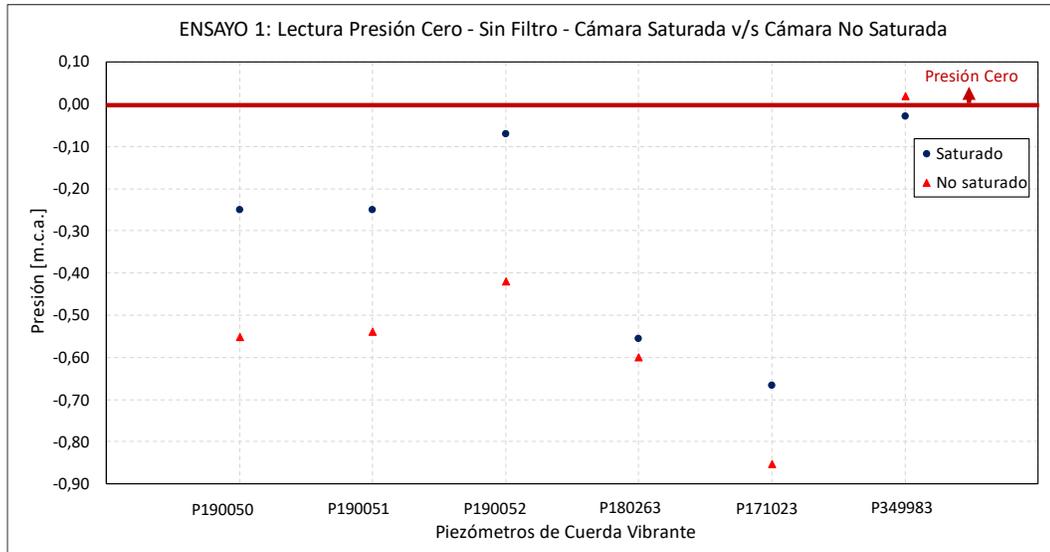


Figura 43: Ensayo 1 lectura presión cero. Sin filtro. Condición saturada v/s no saturada.

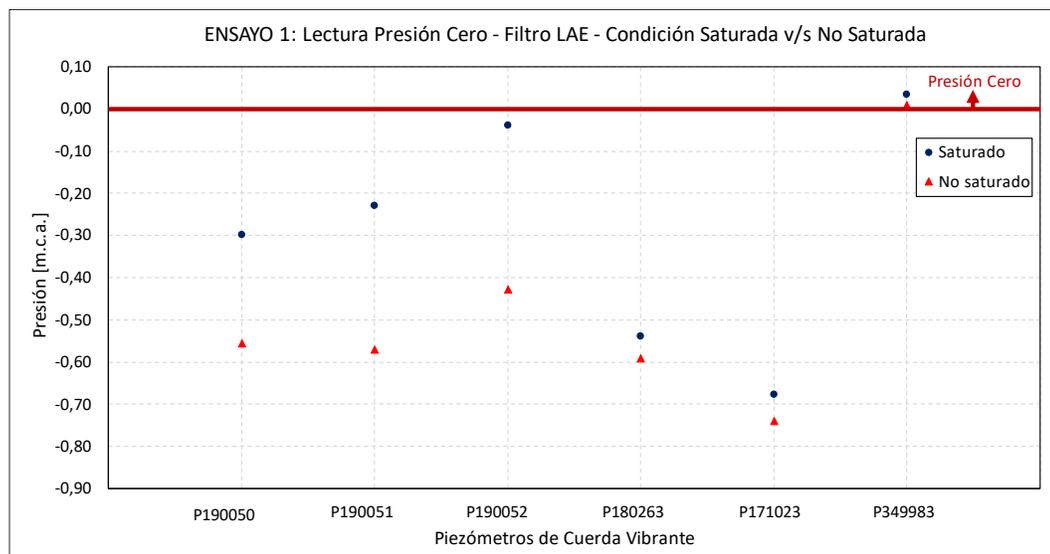


Figura 44: Ensayo 1 lectura presión cero. Filtro LAE. Condición saturada v/s no saturada.

En las dos últimas figuras es posible observar que el piezómetro P349983 no presenta grandes diferencias entre la condición saturada y la no saturada. A su vez, dicho piezómetro es el que tiene mayor capacidad de medición (5175 [kPa]). Por el contrario, los piezómetros que presentan grandes diferencias (P190050, P190051 y P190052) son los que tienen menor capacidad de medición (170 [kPa]).

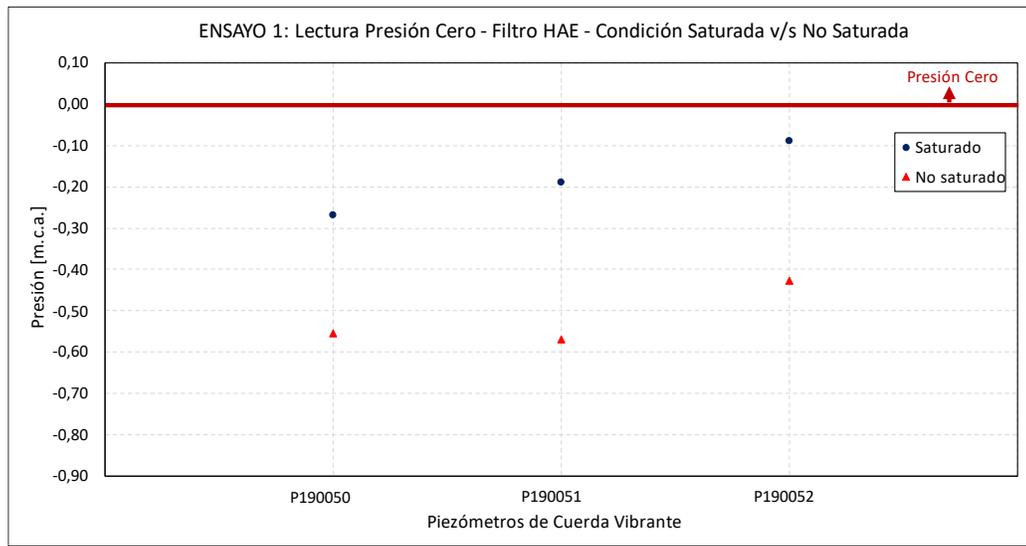


Figura 45: Ensayo 1 lectura presión cero. Filtro HAE. Condición saturada v/s no saturada.

4.2.2. Verificación de calibración y prueba con carga hidráulica

Los siguientes gráficos muestran una comparativa directa entre las tres cargas de agua fijadas en el permeámetro: 2,4; 1,4 y 0,4 [m.c.a.]. El primero (*Figura 46*) muestra el registro cuando no se tiene filtro, mientras que el segundo (*Figura 47*), cuando se tiene el filtro LAE. En ambos casos se tiene una condición saturada. El detalle de cada piezómetro CV se puede observar en la *Tabla 2*. Cabe destacar que las mediciones llevadas a cabo con el filtro HAE saturado fueron descartadas, y no incluidas en este informe, puesto que resultaron ser no concluyentes, dado que indicaban valores sobre los 5 [m.c.a.], cuando la carga máxima era de 2,4 [m.c.a.]. Los colores de los datos corresponden a cada una de las tres cargas hidráulicas fijadas en el permeámetro de carga constante.

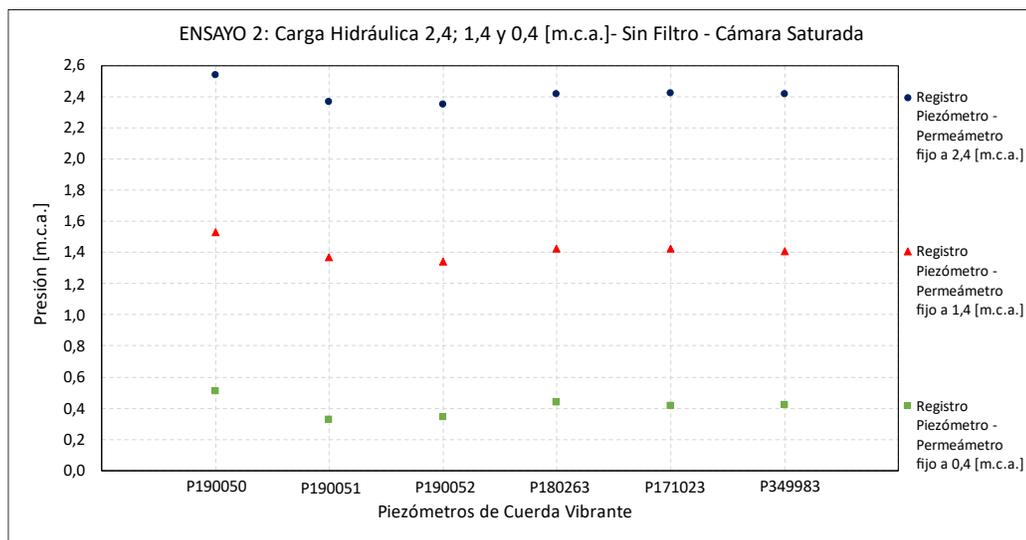


Figura 46: Ensayo 2 carga hidráulica. Sin filtro. Condición saturada.

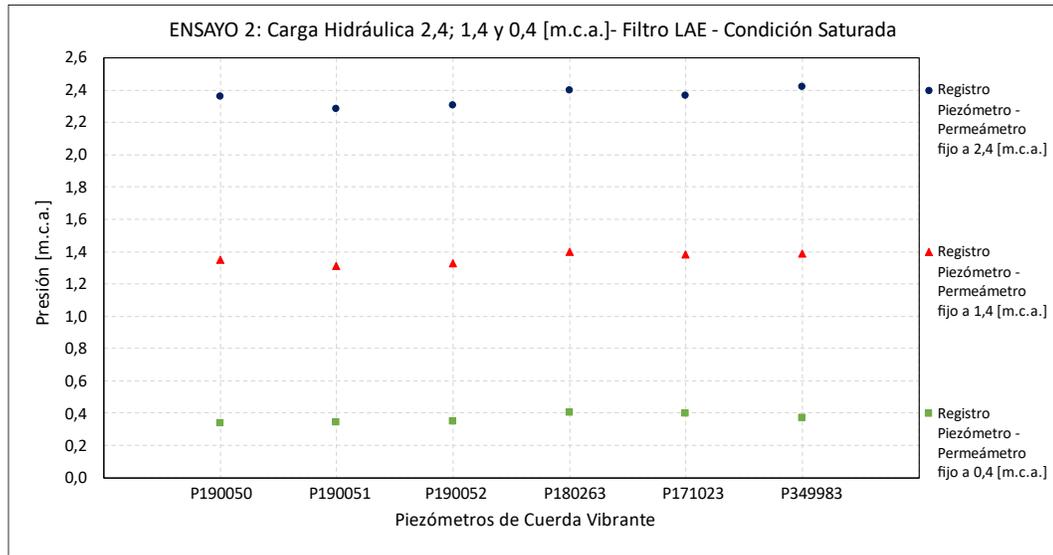


Figura 47: Ensayo 2 carga hidráulica. Filtro LAE. Condición saturada.

4.2.3. Verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros

Los siguientes gráficos muestran una comparativa directa entre los cinco casos estudiados con respecto a la saturación de los filtros: sin filtro (cámara saturada), con el filtro LAE (saturado y no saturado) y con el filtro HAE (saturado y no saturado). Cada gráfico representa el error de exactitud de cada piezómetro con respecto a la medición realizada con la huincha de medir. Los colores de los datos indican la condición de saturación: no saturada (rojo) y saturada (azul).

❖ Piezómetros de cuerda vibrante sin filtro:

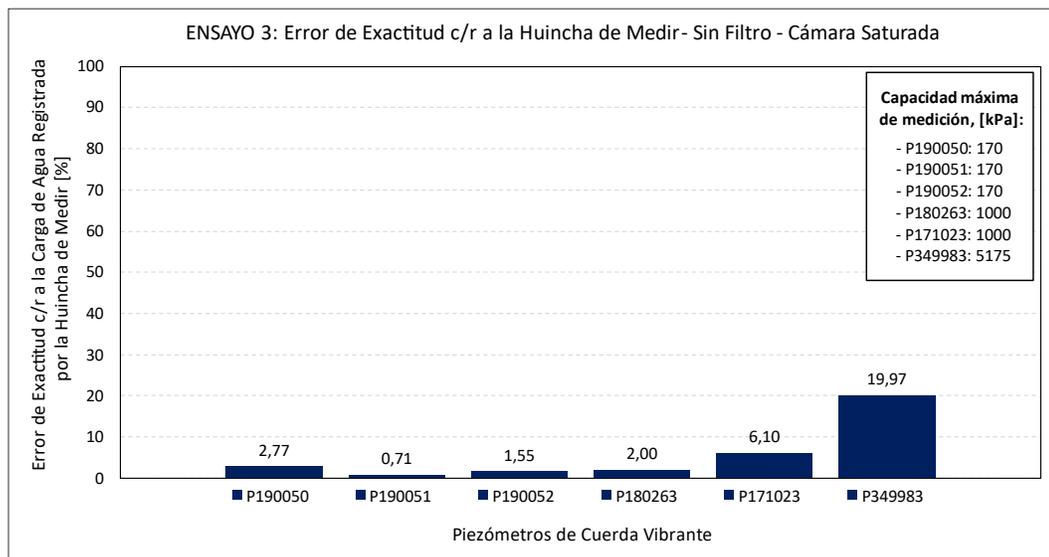


Figura 48: Ensayo 3 distintas condiciones de saturación. Sin filtro. Condición saturada.

❖ Piezómetros de cuerda vibrante con filtro LAE:

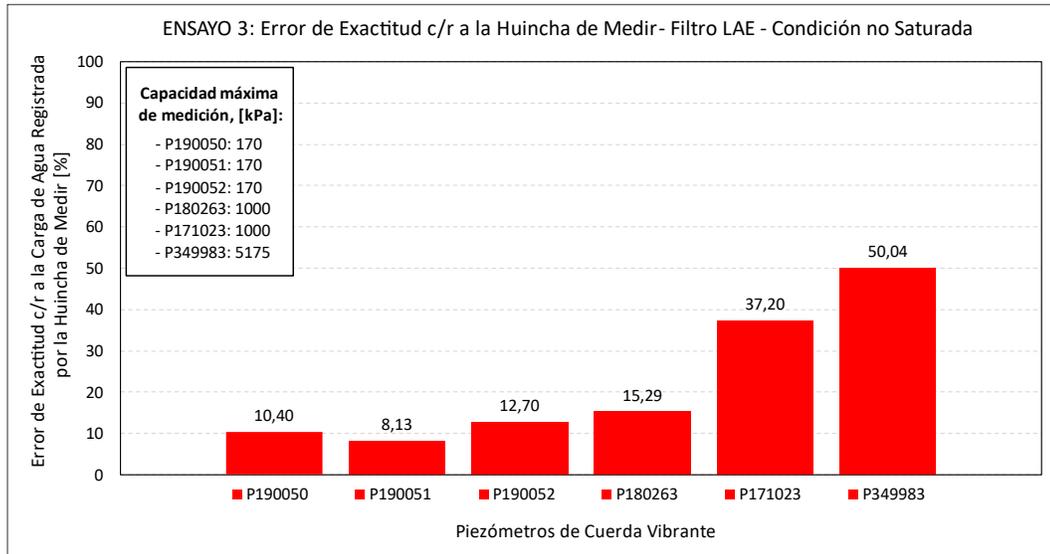


Figura 49: Ensayo 3 distintas condiciones de saturación. Filtro LAE. Condición no saturada.

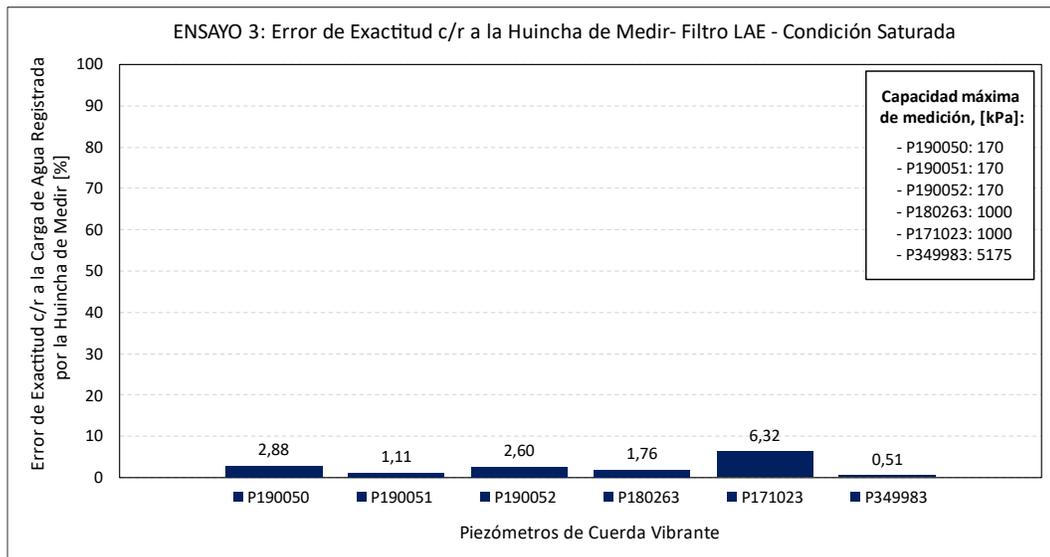


Figura 50: Ensayo 3 distintas condiciones de saturación. Filtro LAE. Condición saturada.

❖ Piezómetros de cuerda vibrante con filtro HAE:

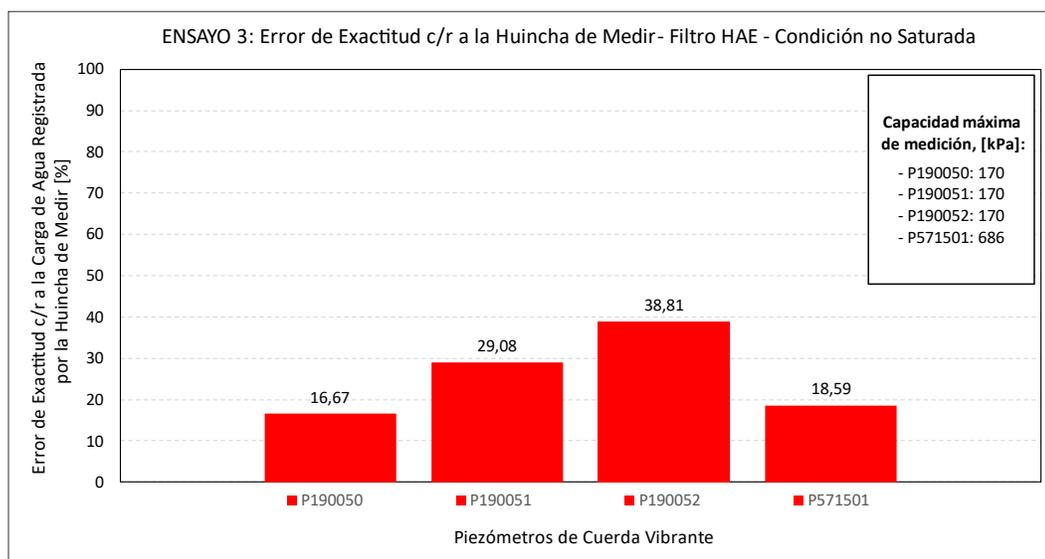


Figura 51: Ensayo 3 distintas condiciones de saturación. Filtro HAE. Condición no saturada.

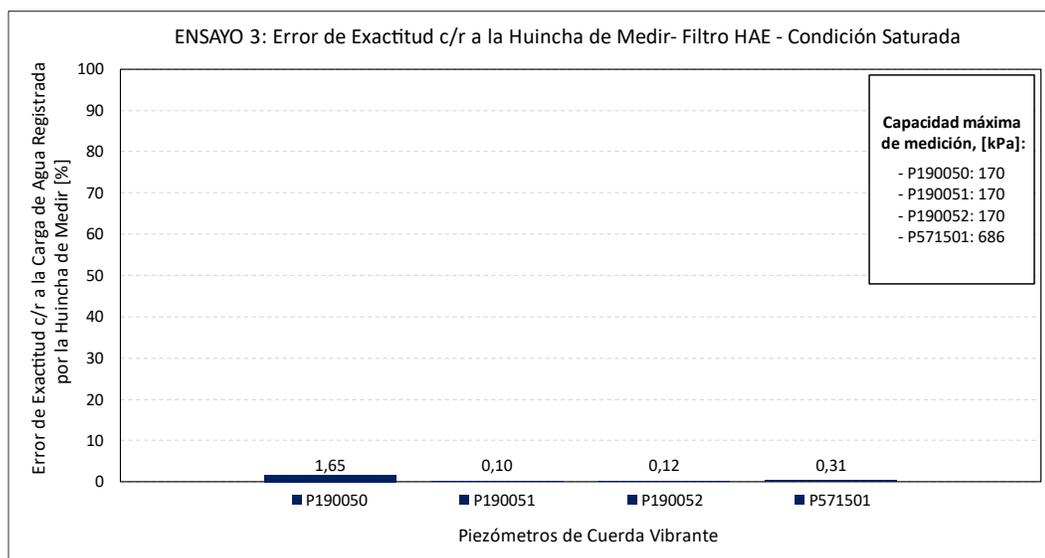


Figura 52: Ensayo 3 distintas condiciones de saturación. Filtro HAE. Condición saturada.

4.2.4. Verificación de mediciones con inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo)

Los siguientes gráficos muestran una comparativa directa entre los nueve casos estudiados con respecto a la inclinación del piezómetro en condición saturada (sin suelo): sin filtro, con el filtro LAE y con el filtro HAE, cada uno en tres posiciones: horizontal, vertical con el extremo libre (en donde se coloca el filtro) apuntando hacia abajo, y con el extremo libre apuntando hacia arriba. Cada gráfico representa el error de exactitud de cada piezómetro con respecto a la medición

realizada con la huincha de medir. Los colores de los datos indican la posición de colocación: horizontal (gris), vertical hacia abajo (naranja) y vertical hacia arriba (verde).

❖ Piezómetros de cuerda vibrante sin filtro:

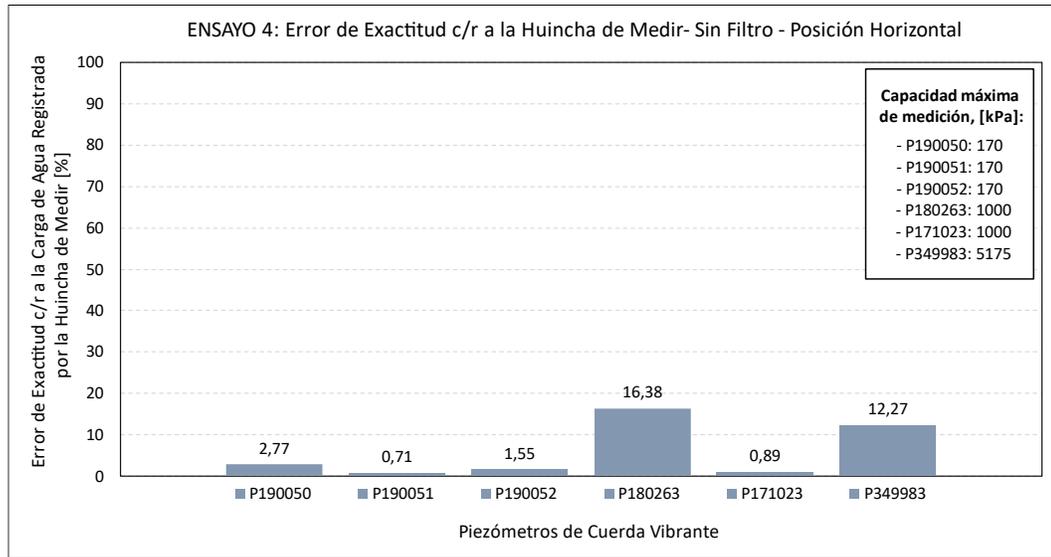


Figura 53: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Sin filtro. Posición horizontal.

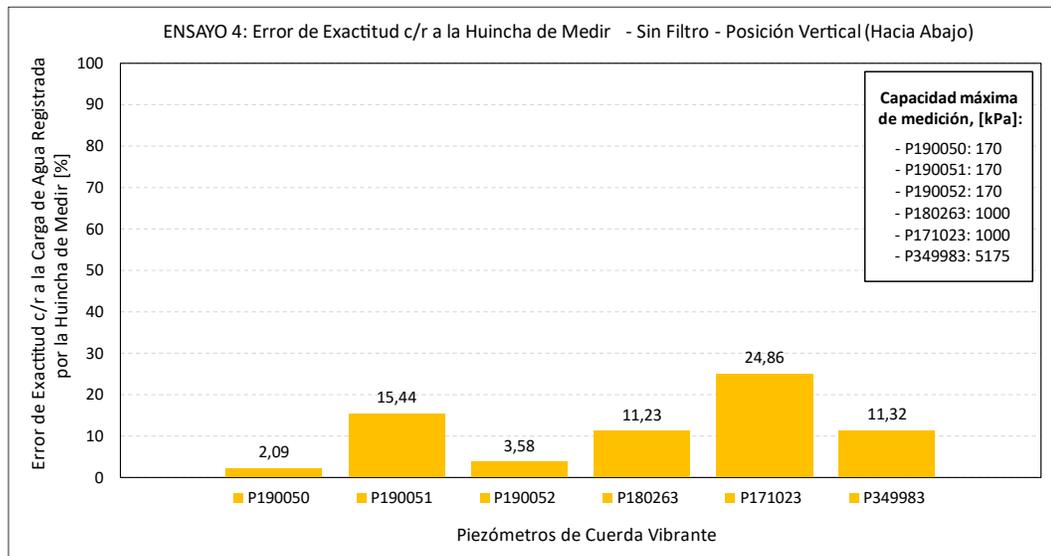


Figura 54: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Sin filtro. Posición vertical apuntando hacia abajo.

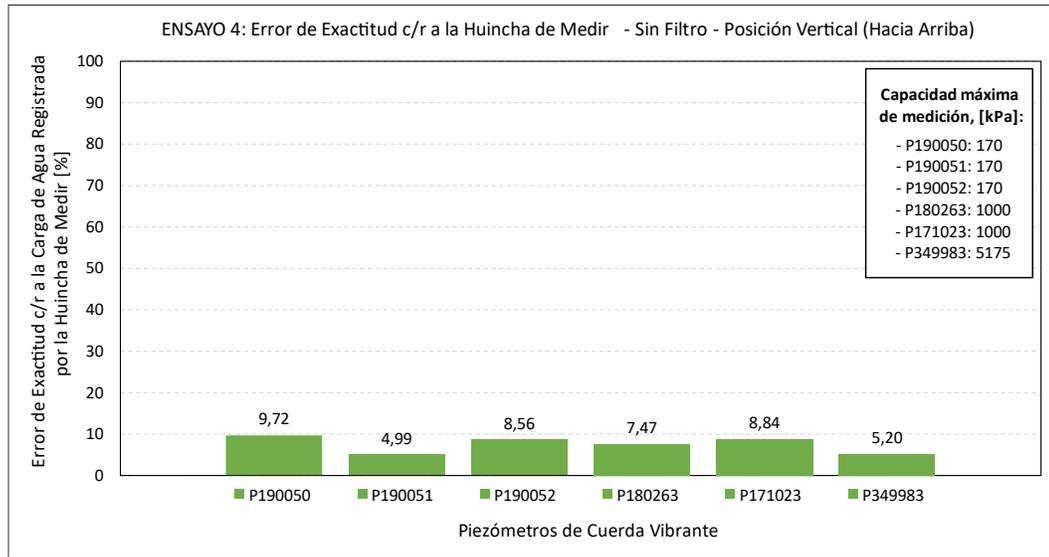


Figura 55: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Sin filtro. Posición vertical apuntando hacia arriba.

De los tres gráficos recién presentados, es posible observar que los mayores errores de exactitud, con respecto a la carga de agua registrada con la huincha de medir, se dan principalmente en los piezómetros que tienen una capacidad máxima de medición mayor. Siguiendo con lo anterior, resulta interesante observar que dichos piezómetros responden de mejor forma cuando se posicionan verticalmente, con el extremo libre apuntando hacia arriba (*Figura 55*).

También es posible observar que los errores de exactitud más bajos se dan cuando se coloca el piezómetro en posición horizontal (*Figura 53*). Ahora bien, pese a que en principio parecería que la posición vertical, con el extremo libre apuntando hacia arriba (*Figura 55*), tiene los mayores errores de exactitud, esto no resulta ser cierto, dado que posee dos de los errores más bajos con respecto a las otras dos posiciones (piezómetros CV P180263 y P349983).

❖ Piezómetros de cuerda vibrante con filtro LAE:

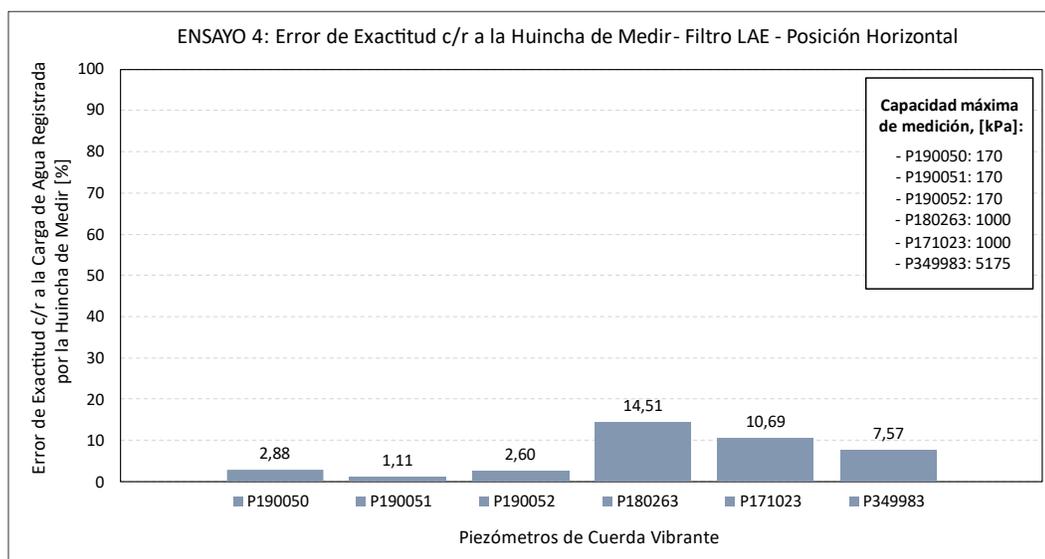


Figura 56: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro LAE. Posición horizontal.

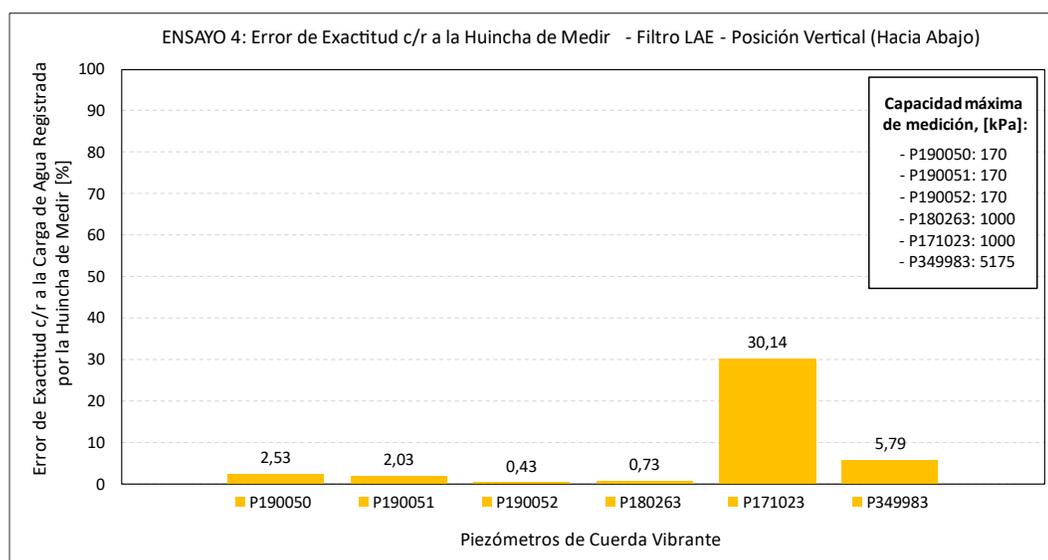


Figura 57: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro LAE. Posición vertical apuntando hacia abajo.

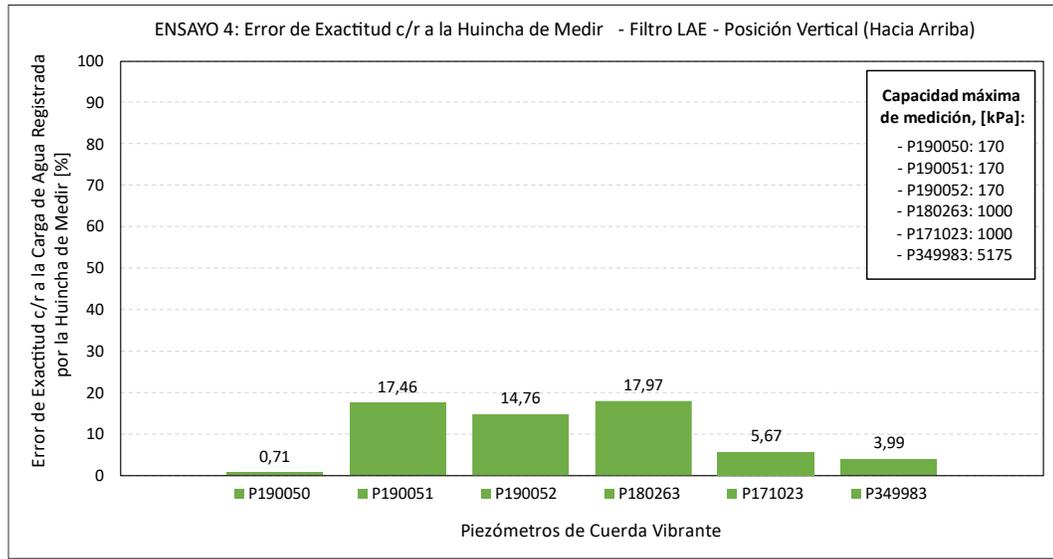


Figura 58: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro LAE. Posición vertical apuntando hacia arriba.

De los tres gráficos recién presentados, correspondientes a los piezómetros CV con filtros LAE, nuevamente es posible observar que los mayores errores de exactitud, con respecto a la carga de agua registrada con la huincha de medir, se dan principalmente en los piezómetros que tienen una capacidad máxima de medición mayor, y que nuevamente dichos piezómetros responden de mejor forma cuando se posicionan verticalmente, con el extremo libre apuntando hacia arriba (*Figura 58*).

También es posible observar que los errores de exactitud más bajos se dan cuando se coloca el piezómetro en posición vertical, con el extremo libre apuntando hacia arriba (*Figura 58*), pese a que a simple vista esto pareciera no ser así.

❖ Piezómetros de cuerda vibrante con filtro HAE:

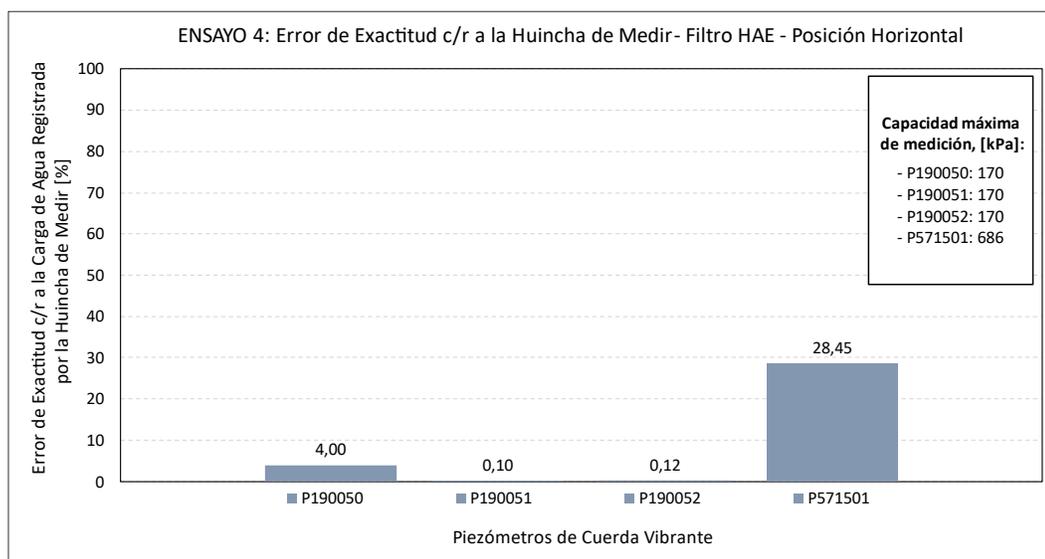


Figura 59: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro HAE. Posición horizontal.

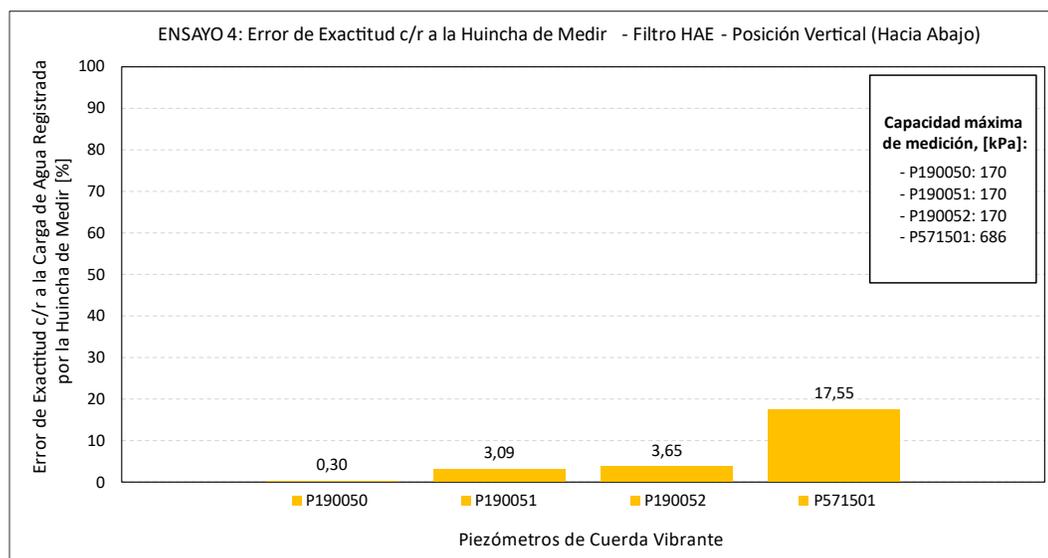


Figura 60: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro HAE. Posición vertical apuntando hacia abajo.

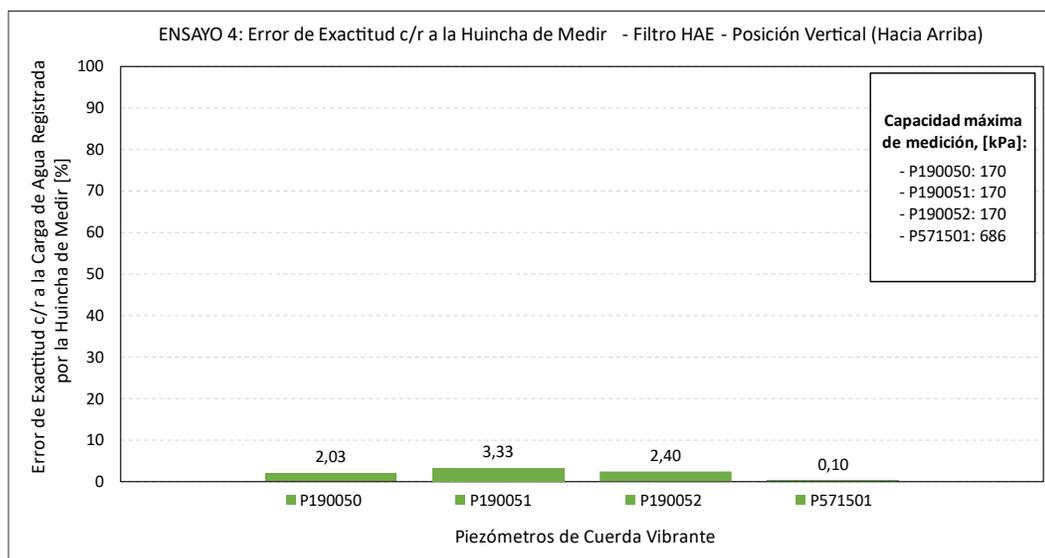


Figura 61: Ensayo 4 inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo). Filtro HAE. Posición vertical apuntando hacia arriba.

De los tres gráficos recién presentados, correspondientes a los piezómetros CV con filtros HAE, nuevamente es posible observar (siendo este caso el más evidente) que los mayores errores de exactitud, con respecto a la carga de agua registrada con la huincha de medir, se dan principalmente en los piezómetros que tienen una capacidad máxima de medición mayor, y que nuevamente dichos piezómetros responden de mejor forma cuando se posicionan verticalmente, con el extremo libre apuntando hacia arriba (*Figura 61*). También es posible observar que los errores de exactitud más bajos se dan cuando se coloca el piezómetro en posición horizontal (*Figura 59*).

4.2.5. Verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo (dentro del contenedor)

Los siguientes gráficos muestran una comparativa directa entre los tres casos estudiados con respecto al flujo de agua en el sistema sin suelo y al tipo de filtro usado en condición saturada: sin filtro, con el filtro LAE y con el filtro HAE. Cada registro de datos se adecua al gráfico, con el objetivo de observar el aumento de presión producto del ingreso de agua al sistema y tener una comparación inmediata entre las mediciones de los piezómetros. Además, dado que cada piezómetro tiene el mismo punto de partida en cada gráfico, es posible tener una comparación inmediata entre ensayos.

Cabe mencionar que los ensayos se llevan a cabo en tres grupos; primero se ensayan en simultáneo los tres piezómetros idénticos según el fabricante, marca Sisgeo y con cables de 5 [m] de largo (tres primeros de la *Tabla 2*). Posteriormente los tres que siguen, es decir, los piezómetros que tienen una capacidad máxima de medición mayor, con cables de 15 [m] de largo, marca Sisgeo y Geosense (piezómetro ventilado). Y por último, el piezómetro con el filtro HAE unido al sensor, marca ACE. La presentación de datos sigue el mismo orden recién descrito. Los

colores de los datos indican el filtro usado: sin filtro (gris), filtro LAE (naranja) y filtro HAE (verde). Además, en todos los ensayos, y producto del ingreso de agua al sistema, la carga de agua aumentó momentáneamente 0,04 [m.c.a.] con respecto a la inicial, de 0,46 [m.c.a.].

❖ Primer grupo ensayado: tres piezómetros CV idénticos según el fabricante (Sisgeo)

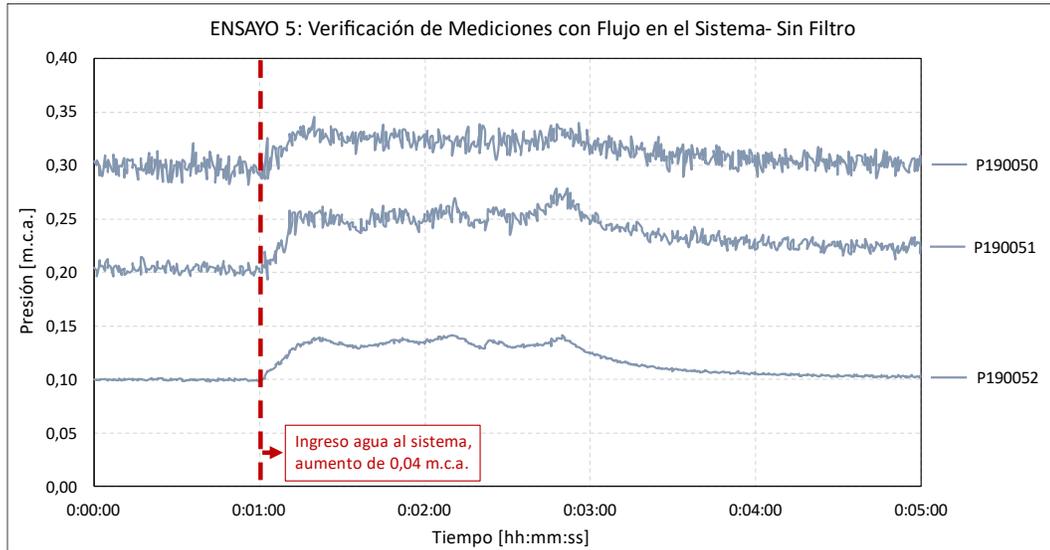


Figura 62: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Primer grupo. Sin filtro.

Como se puede observar en la *Figura 62*, el agua ingresa al sistema un minuto después de iniciado el registro de datos, y toma casi 17 segundos en alcanzar el incremento máximo de 0,04 [m.c.a.]. Este incremento se mantuvo (con algunas alzas y bajas producto del flujo turbulento) por alrededor de 01 min 40 s, para luego decaer hasta alcanzar la presión inicial. En particular, el piezómetro P190051 necesitó de un tiempo mayor para volver a estabilizar su lectura.

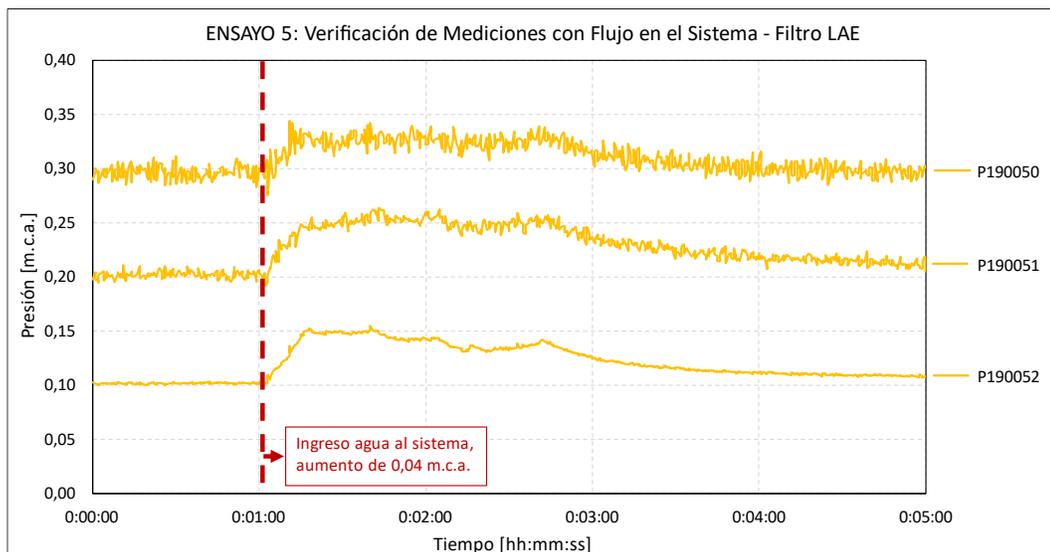


Figura 63: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Primer grupo. Filtro LAE.

Como se puede observar en la *Figura 63*, el agua ingresa al sistema un minuto después de iniciado el registro de datos, y toma casi 16 segundos en alcanzar el incremento máximo de 0,04 [m.c.a.]. Este incremento se mantuvo (con algunas alzas y bajas producto del flujo turbulento) por alrededor de 01 min 30 s, para luego decaer hasta alcanzar la presión inicial. En particular, los piezómetros P190051 y P190052 necesitaron de un tiempo mayor para volver a estabilizar su lectura.

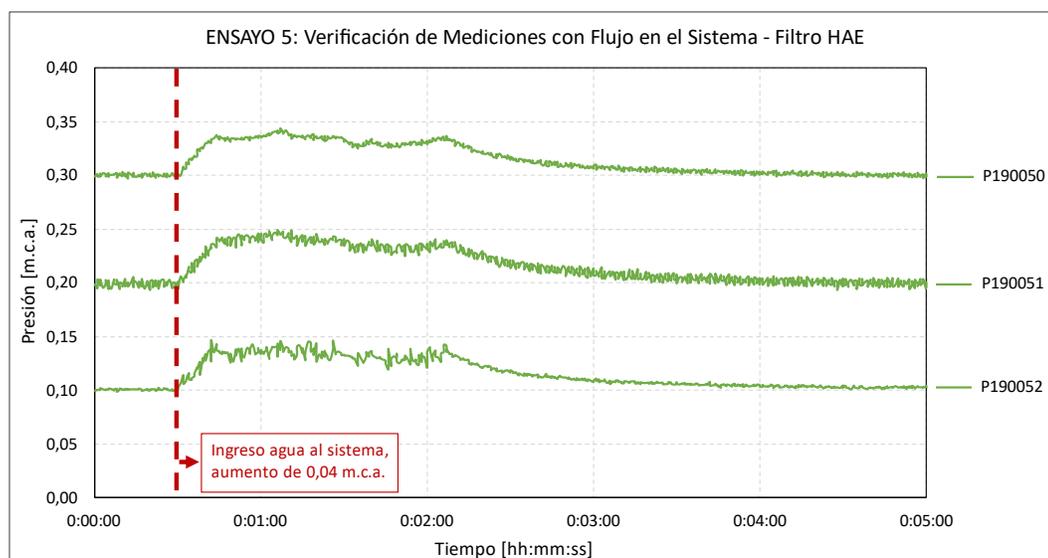


Figura 64: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Primer grupo. Filtro HAE.

Como se puede observar en la *Figura 64*, el agua ingresa al sistema 30 segundos después de iniciado el registro de datos, y toma casi 15 segundos en alcanzar el incremento máximo de 0,04 [m.c.a.]. Este incremento se mantuvo (con algunas alzas y bajas producto del flujo turbulento) por alrededor de 01 min 20 s, para luego decaer hasta alcanzar la presión inicial.

❖ Segundo grupo ensayado: tres piezómetros CV de mayor capacidad de medición (Sisgeo y Geosense)

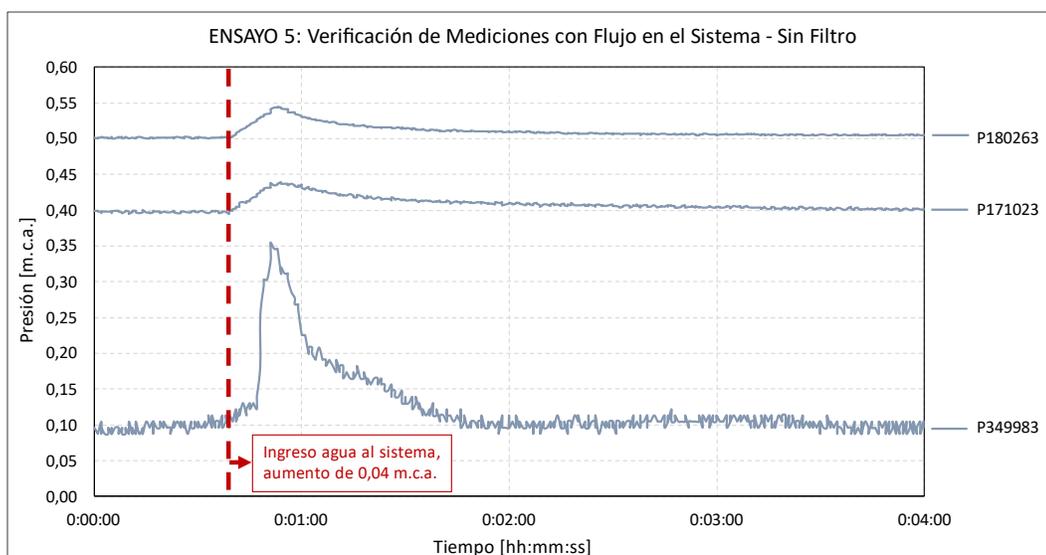


Figura 65: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Segundo grupo. Sin filtro.

Como se puede observar en la *Figura 65*, el agua ingresa al sistema 40 segundos después de iniciado el registro de datos, y toma casi 15 segundos en alcanzar el incremento máximo de 0,04 [m.c.a.]. Casi inmediatamente después de alcanzar el máximo, la presión disminuye hasta su valor inicial. En particular, el piezómetro P349983, que resulta ser del tipo ventilado y el de mayor capacidad de medición (5175 [kPa]), registró un alza mucho mayor que los otros piezómetros.

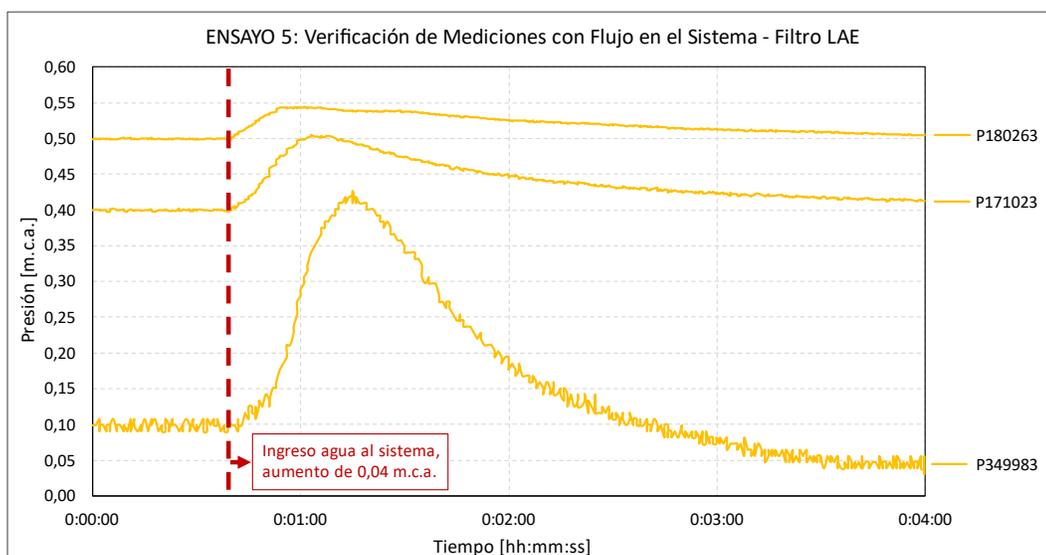


Figura 66: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Segundo grupo. Filtro LAE.

Como se puede observar en la *Figura 66*, el agua ingresa al sistema 40 segundos después de iniciado el registro de datos, y toma casi 17 segundos en alcanzar el incremento máximo de 0,04 [m.c.a.]. Casi inmediatamente después de alcanzar el máximo, la presión disminuye hasta su valor inicial. Esto aplica principalmente para el piezómetro P180263, dado que los otros dos piezómetros tienen un comportamiento diferente, sobre todo el piezómetro P349983, que resulta ser del tipo ventilado y el de mayor capacidad de medición. Este registró un alza mucho mayor que los otros piezómetros, para luego decaer hasta alcanzar una presión menor a la inicial.

❖ Tercer grupo ensayado: piezómetro CV con el filtro HAE unido al sensor (ACE)

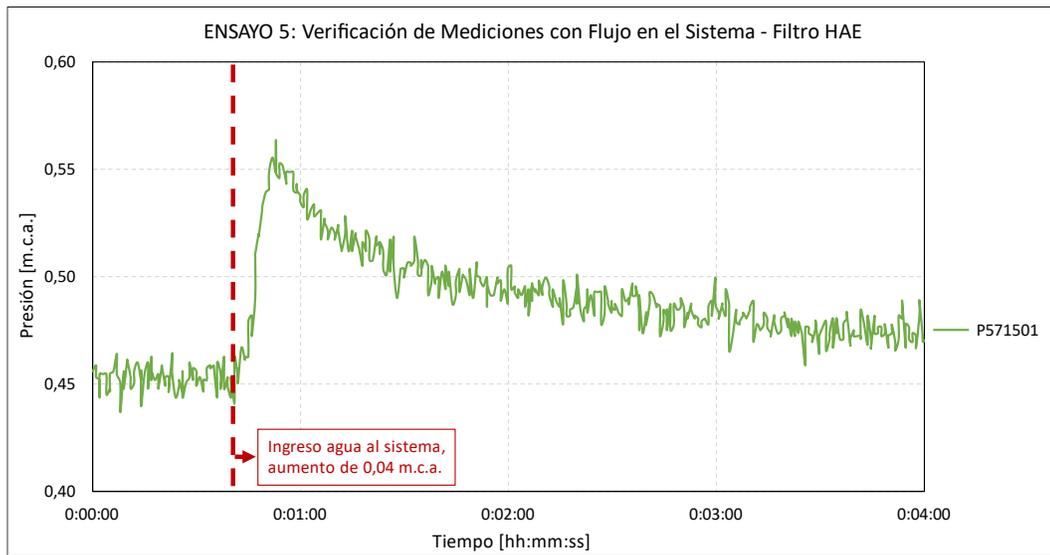


Figura 67: Ensayo 5 verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo. Tercer grupo. Filtro HAE.

Como se puede observar en la *Figura 67*, el agua ingresa al sistema 40 segundos después de iniciado el registro de datos, y toma casi 15 segundos en alcanzar el incremento máximo de 0,1 [m.c.a.]. Este valor resulta ser poco más del doble de los 0,04 [m.c.a.] registrados con la huincha de medir en video. Casi inmediatamente después de alcanzar el máximo, la presión disminuye hasta un valor mayor al inicial, por lo que necesita más tiempo para estabilizar su lectura y alcanzar nuevamente su valor inicial. Cabe destacar que este piezómetro cuenta con un filtro HAE unido al sensor (no removible) y tiene una capacidad máxima de medición de 686 [kPa].

4.2.6. Verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad

Los siguientes gráficos muestran una comparativa directa entre los dos casos estudiados con respecto a la permeabilidad del suelo en condición saturada: suelo de mayor permeabilidad y suelo de menor permeabilidad, cada uno con los siete piezómetros midiendo en simultáneo. Cada gráfico representa el error de exactitud de cada piezómetro con respecto a la medición realizada con la huincha de medir. Los colores de los datos indican el tipo de suelo: mayor permeabilidad (café) y menor permeabilidad (gris).

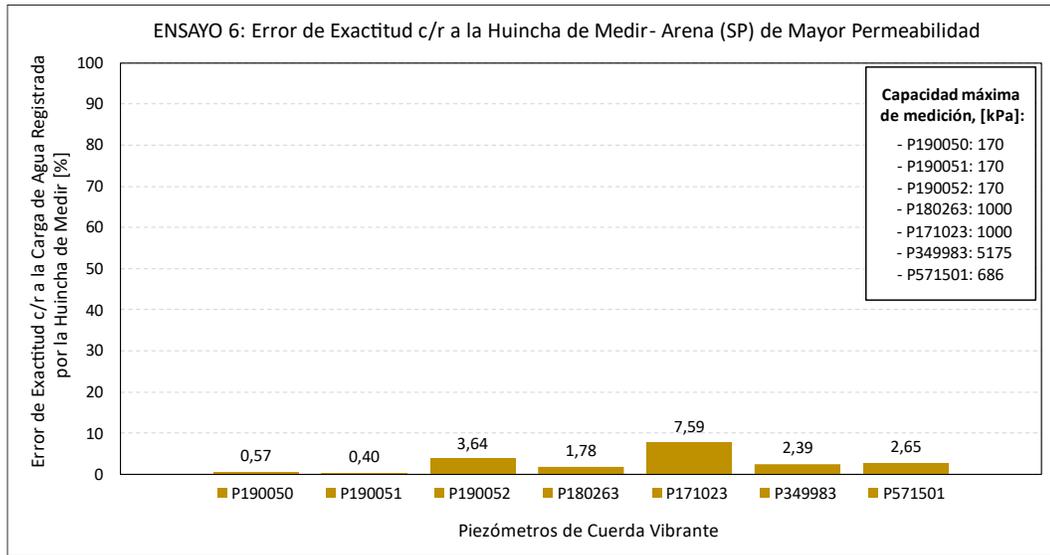


Figura 68: Ensayo 6 verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad. Arena (SP) de mayor permeabilidad.

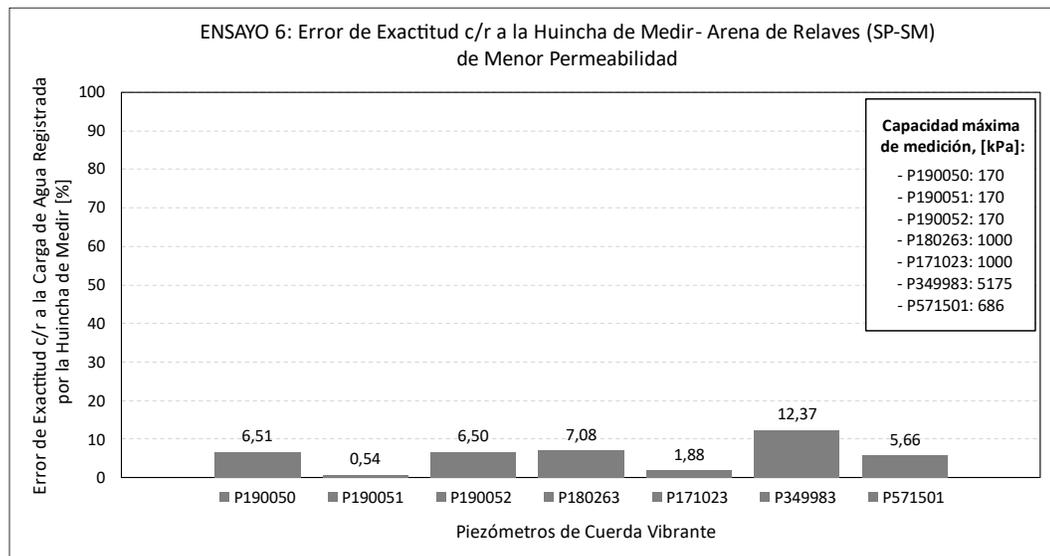


Figura 69: Ensayo 6 verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad. Arena de relaves (SP-SM) de menor permeabilidad.

Es posible observar en los dos gráficos recién presentados que el error de exactitud, con respecto a la carga de agua registrada con la huincha de medir, en general es mayor en los piezómetros CV que tienen mayor capacidad de medición, siendo más evidente en la arena (SP) de mayor permeabilidad (Figura 68). También es posible observar que los errores de exactitud aumentan en la arena de relaves (SP-SM) de menor permeabilidad (Figura 69), con respecto a los registrados en una arena de mayor permeabilidad (Figura 68). Ahora bien, si comparamos los errores de exactitud de los casos sin suelo (Figura 50 y Figura 52) con los de los casos con suelos saturados (Figura 68 y Figura 69), es posible observar en general un aumento en estos últimos.

4.2.7. Verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto)

Los siguientes gráficos muestran una comparativa directa entre los dos casos estudiados con respecto a las pruebas de impacto y a la permeabilidad del suelo en condición saturada: suelo de mayor permeabilidad y suelo de menor permeabilidad, cada uno con los siete piezómetros midiendo en simultáneo. Cada registro de datos se adecua al gráfico, con el objetivo de observar el aumento de presión producto de los reiterados golpes en la superficie del sistema y tener una comparación inmediata entre las mediciones de los piezómetros. Además, dado que cada piezómetro tiene el mismo punto de partida en cada gráfico, es posible tener una comparación inmediata entre ensayos.

Cabe mencionar que, pese a que los piezómetros se ensayaron en simultáneo, los gráficos presentados se separan en dos grupos, para observar de mejor manera las diferencias con respecto al tipo de suelo: el primer grupo está conformado por los tres piezómetros idénticos según el fabricante, marca Sisgeo y con cables de 5 [m] de largo (tres primeros de la *Tabla 2*), mientras que el segundo grupo corresponde a los cuatro piezómetros restantes que tienen una capacidad máxima de medición mayor, marca Sisgeo, Geosense (piezómetro ventilado) y ACE (filtro HAE unido al sensor).

Los colores de los datos indican el tipo de suelo: mayor permeabilidad (café) y menor permeabilidad (gris). Además, en el primer ensayo, correspondiente a la prueba de impacto sobre el suelo más permeable, se evidenció un incremento final en la carga de agua de 0,03 [m.c.a.] con respecto a la inicial, de 0,545 [m.c.a.]. Mientras que, en el segundo ensayo, se evidenció un aumento de tan sólo 0,002 [m.c.a.] con respecto a la inicial, de 0,578 [m.c.a.].

Por último, cabe destacar que en cada figura se indica el inicio de una serie de impactos (línea punteada verde), el término de esta (línea punteada roja) y los impactos puntuales (líneas punteadas grises) que se llevan a cabo durante el ensayo.

❖ Primer grupo ensayado: tres piezómetros CV idénticos según el fabricante (Sisgeo)

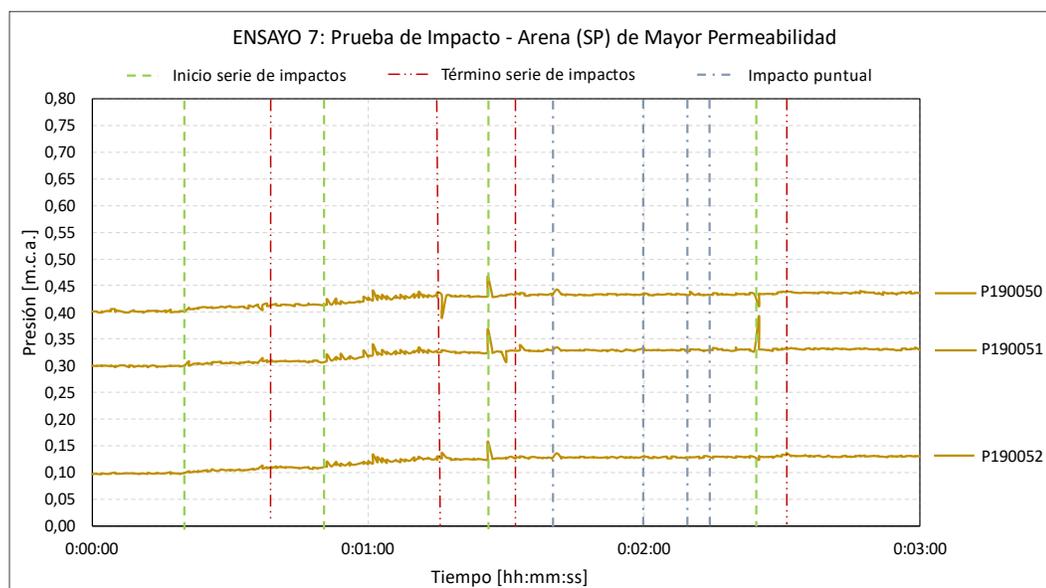


Figura 70: Ensayo 7 verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto). Primer grupo. Arena (SP) de mayor permeabilidad.

Como se puede observar en la *Figura 70*, los peaks del registro coinciden con los momentos en donde se impacta la placa metálica sobre el suelo, por lo que la respuesta por parte de los piezómetros es prácticamente inmediata, al igual que los tiempos de recuperación, es decir, el tiempo en estabilizar nuevamente su lectura. Por último, tal y como se indica anteriormente, es posible evidenciar el incremento final en la carga de agua de 0,03 [m.c.a.] en los tres piezómetros.

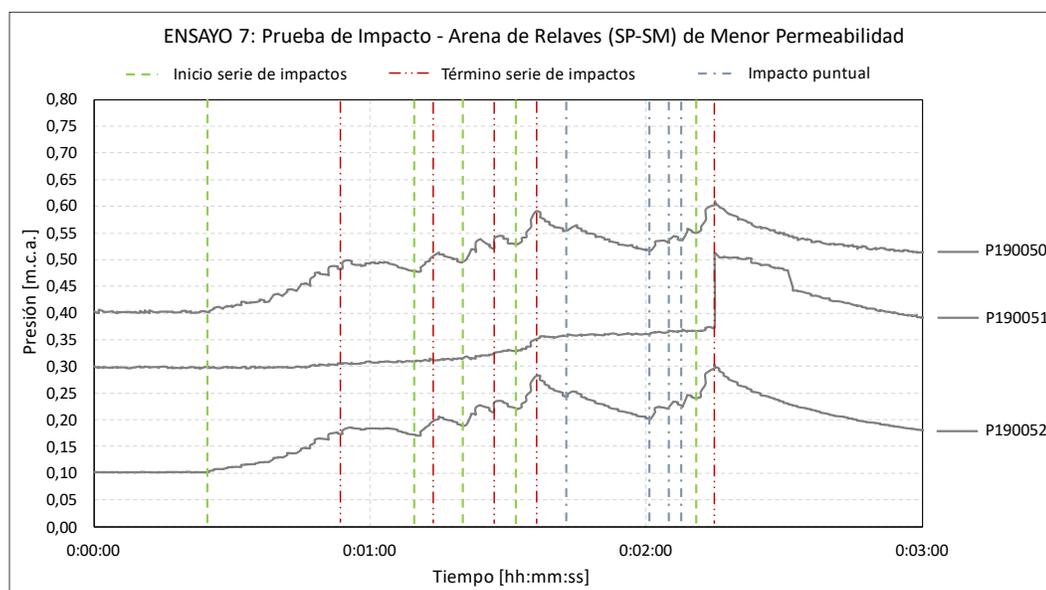


Figura 71: Ensayo 7 verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto). Primer grupo. Arena de relaves (SP-SM) de menor permeabilidad.

Como se puede observar en la *Figura 71*, los incrementos de presión coinciden con los momentos en donde se inicia la serie de impactos, por lo que la respuesta por parte de los piezómetros es prácticamente inmediata. A su vez, resulta evidente que al momento de finalizar la serie de impactos, inmediatamente disminuye la presión (a excepción del piezómetro P190051 que presenta un comportamiento diferente), reafirmando de esta manera lo indicado anteriormente con respecto a la respuesta de los piezómetros.

A diferencia del caso anterior con la arena de mayor permeabilidad (*Figura 70*), los tiempos de recuperación son más lentos. Además, pese a que los impactos se realizaron prácticamente con la misma intensidad, los incrementos de presión resultan ser mayores cuando se tiene un suelo menos permeable (*Figura 71*). Esto es debido a la carga acumulada generada por los impactos en este tipo de suelos.

- ❖ Segundo grupo ensayado: cuatro piezómetros CV de mayor capacidad de medición (Sisgeo, Geosense y ACE)

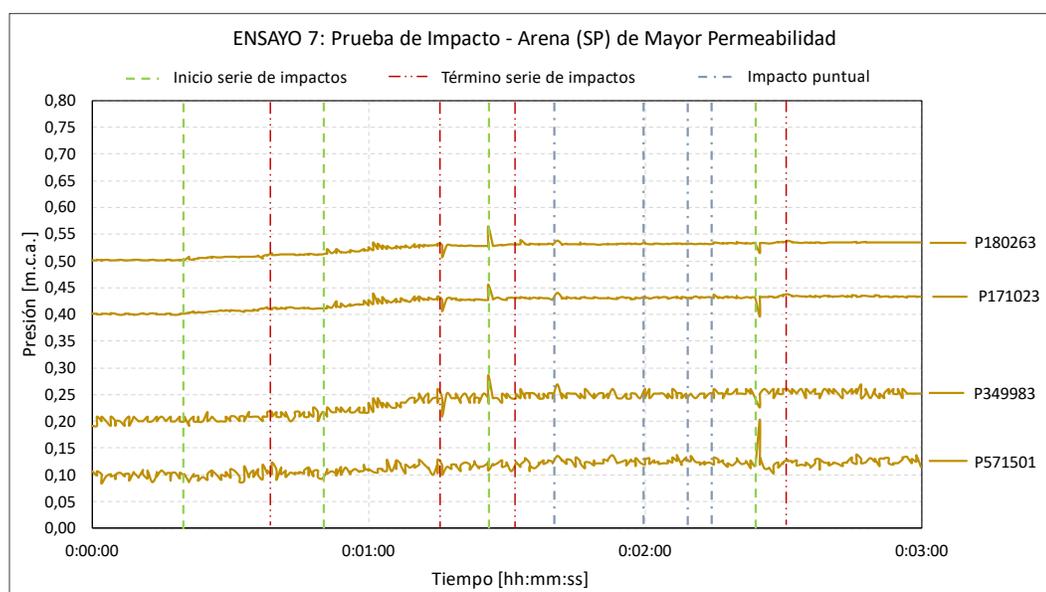


Figura 72: Ensayo 7 verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto). Segundo grupo. Arena (SP) de mayor permeabilidad.

Como se puede observar en la *Figura 72*, los peaks del registro coinciden con los momentos en donde se impacta la placa metálica sobre el suelo, por lo que la respuesta por parte de los piezómetros es prácticamente inmediata, al igual que los tiempos de recuperación. Al igual que los otros tres piezómetros (*Figura 70*), es posible evidenciar el incremento final en la carga de agua de 0,03 [m.c.a.] en estos cuatro piezómetros. Por último, es posible evidenciar mayor ruido en el registro del piezómetro que tiene mayor capacidad de medición (P349983) y en el del que tiene el filtro HAE unido al sensor (P571501).

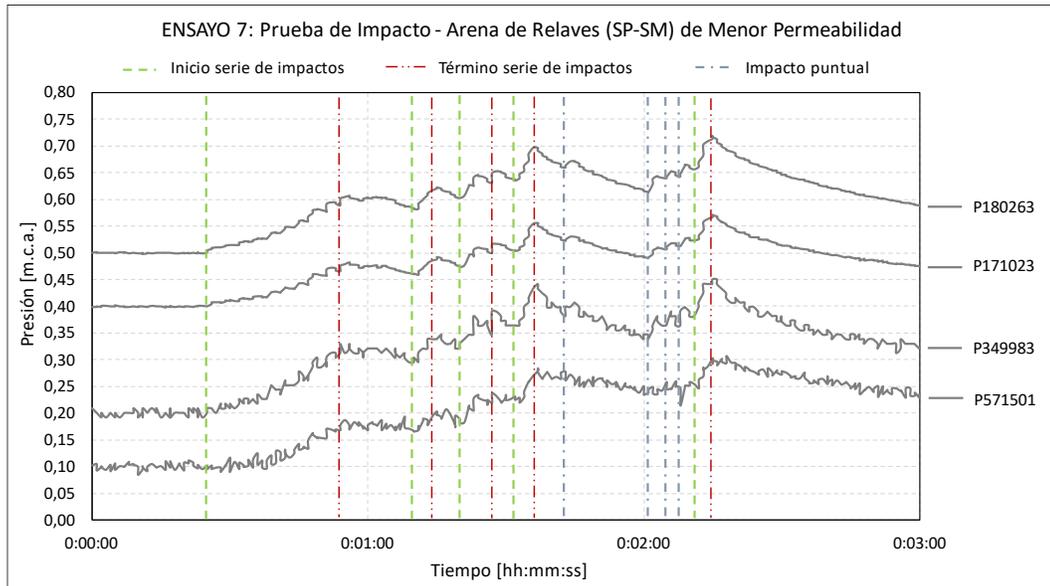


Figura 73: Ensayo 7 verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto). Segundo grupo. Arena de relaves (SP-SM) de menor permeabilidad.

Como se puede observar en la *Figura 73*, los incrementos de presión coinciden con los momentos en donde se inicia la serie de impactos, por lo que la respuesta por parte de los piezómetros es prácticamente inmediata. A su vez, resulta evidente que al momento de finalizar la serie de impactos, inmediatamente disminuye la presión, reafirmando de esta manera lo indicado anteriormente con respecto a la respuesta de los piezómetros.

A diferencia del caso anterior con la arena de mayor permeabilidad (*Figura 72*), los tiempos de recuperación son más lentos. Además, pese a que los impactos se realizaron prácticamente con la misma intensidad, los incrementos de presión resultan ser mayores cuando se tiene un suelo menos permeable (*Figura 73*). Esto es debido a la carga acumulada generada por los impactos en este tipo de suelos. Por último, es posible evidenciar mayor ruido en el registro del piezómetro que tiene mayor capacidad de medición (P349983) y en el del que tiene el filtro HAE unido al sensor (P571501).

5. Análisis de los resultados – Pruebas de laboratorio

5.1. Consideración de presión atmosférica – Lectura presión cero

Tal y como se puede observar en la *Figura 42*, existe una diferencia muy pequeña en el valor de las lecturas de presión cero cuando se tienen diferentes filtros y una condición saturada. Estos valores están dentro del rango de error de medición correspondiente a cada piezómetro de cuerda vibrante (*Tabla A.1*). Por el contrario, al observar la *Figura 43*, *Figura 44* y *Figura 45*, correspondientes a los casos sin filtro, con filtro LAE y con filtro HAE, respectivamente, en donde se comparan las condiciones saturadas con las no saturadas, resulta evidente la gran diferencia entre lecturas en la mayoría de los casos. Mientras que en la *Figura 42* la diferencia mayor es de 0,06 [m.c.a.], en la *Figura 43*, *Figura 44* y *Figura 45*, es de 0,35; 0,39 y 0,38 [m.c.a.] respectivamente, es decir, aproximadamente 6 veces más que en condición saturada. También resulta interesante observar que en dichas comparaciones, las mayores diferencias se presentan en los piezómetros que tienen una capacidad de medición menor.

El análisis de este ensayo permite determinar que las lecturas de presión cero cuando no se tiene el filtro, y cuando si se tiene, ya sea LAE o HAE, no difieren sustancialmente cuando se satura correctamente tanto la cámara del diafragma como también los filtros usados. Por el contrario, si no se tiene una correcta saturación, la diferencia en los resultados se hace mucho mayor y resulta más evidente en los piezómetros que tienen una capacidad de medición menor, como el caso de los tres piezómetros idénticos según el fabricante, marca Sisgeo (tres primeros de la *Tabla 2*), cuya capacidad máxima de medición es de 170 [kPa]. Además, como se menciona en la *Sección 2.7*, los piezómetros de cuerda vibrante son sensores de medición relativa, por lo que las lecturas cero son críticas para determinar una altura de presión exacta. Por lo tanto, cuando se tiene una correcta saturación, independientemente del filtro usado, se obtiene una correcta lectura de presión cero, permitiendo de esta manera que las futuras mediciones sean más exactas.

Cabe destacar que se llevaron a cabo lecturas de presión cero en diferentes posiciones: horizontal, vertical con el extremo libre (en donde se coloca el filtro) apuntando hacia arriba, y con el extremo libre apuntando hacia abajo, dado que el fabricante recomendaba que esta lectura se llevara a cabo posicionando los piezómetros CV en la orientación final prevista, es decir, de la misma manera en cómo irían instalados. Al analizar los resultados se observa que las lecturas de presión cero que permiten obtener mediciones más exactas corresponden a cuando se tiene el piezómetro en posición vertical con el filtro apuntando hacia abajo, por lo que los gráficos presentados en la *Figura 42*, *Figura 43*, *Figura 44* y *Figura 45*, corresponden a este último caso.

5.2. Verificación de calibración y prueba con carga hidráulica

Recordando que las tres cargas hidráulicas que se fijan en el permeámetro de carga constante corresponden a 2,4; 1,4 y 0,4 [m.c.a.], es posible observar en la *Figura 46* y *Figura 47*, correspondiente a los ensayos sin filtro y con filtro LAE respectivamente, que en la mayoría de los casos las mediciones no resultan ser tan exactas. Pese a lo anterior, el resultado que más llama la atención es la clara tendencia que se observa en cada ensayo. En otras palabras, si en cada gráfico se traza una línea que una los puntos del mismo color, es posible observar que dicha curva es prácticamente la misma en los tres casos (carga hidráulica fija de 2,4; 1,4 y 0,4 [m.c.a.]). Por lo tanto, pese a que las mediciones pueden no resultar ser tan exactas, si resultan ser precisas (al menos en cuanto a la diferencia de altura observada).

Tal y como se indica en la *Sección 2.7*, algunos autores creen que la principal razón por la que los piezómetros de cuerda vibrante no funcionan bien (presentan errores en sus mediciones), es por la saturación insatisfactoria del filtro. Por otro lado, otros autores indican que las fuentes de error en las lecturas del piezómetro de cuerda vibrante son el resultado tanto de los métodos de instalación iniciales como de los cambios en la atmósfera y el medio circundante. Siguiendo con lo anterior, muchas veces los piezómetros de cuerda vibrante son instalados en ambientes no saturados, y que se mantienen así a lo largo de muchos años. Esto ocasiona que en algún momento la cámara del sensor así como también el filtro usado se desaturen, desencadenando posibles errores de exactitud en las mediciones futuras.

El análisis de este ensayo es muy relevante, y quizás una de las principales conclusiones de este trabajo, puesto que permitiría concluir que, si se diera el caso en el que se genere la desaturación tanto de la cámara como del filtro LAE, cuando el piezómetro detecte la presión del agua, la medición podría no ser exacta, pero si útil para usarla de referencia y a partir de ella, determinar cuánto aumenta la presión del agua al interior del suelo. Por lo tanto, el piezómetro de cuerda vibrante más que ser un instrumento de medición exacta, en casos desfavorables, es un instrumento de medición precisa que permite determinar una correcta presión de agua, a partir de un nuevo valor de referencia.

Por último, cabe mencionar que los resultados asociados a los filtros HAE fueron descartados, y no incluidos en este informe, puesto que resultaron ser no concluyentes. Por ejemplo, cuando la carga fija en el permeámetro era de 2,4 [m.c.a.], las mediciones indicaban valores sobre los 5 [m.c.a.]. Esto puede deberse quizás a un exceso de presión generado al momento de conectar el piezómetro con la manguera del permeámetro y del agua retenida entre ambos, dado que la conexión se llevó a cabo al interior del contenedor con agua, con el objetivo de evitar la pérdida de esta y la presencia de aire. La manipulación puede haber sido incorrecta dado el filtro HAE usado, y haber inducido una presión adicional que quedó retenida en el sensor.

5.3. Verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros

Tal y como se puede observar en la *Figura 48, Figura 49, Figura 50, Figura 51 y Figura 52*, las mediciones en condición saturada (azul), es decir, en las que se tiene una correcta saturación tanto de la cámara del sensor como también de los filtros usados, presentan un error de exactitud con respecto a la medición realizada con la huincha de medir mucho menor que las de los casos no saturados (rojo). Esta diferencia resulta aún más relevante cuando se usa el filtro HAE. De esta manera se ratifica lo señalado por los autores en la *Sección 2.7*, en donde señalan que "...Se creía que la principal razón por la que los piezómetros no funcionaban bien era la saturación insatisfactoria del filtro. Por lo tanto, una incorrecta saturación de los filtros, en particular de los filtros HAE, genera errores en las mediciones de los piezómetros de cuerda vibrante...".

Pese a que en la primera prueba (lectura de presión cero) se determina que una correcta lectura depende de una correcta saturación, es gracias al análisis de esta prueba que se pudo respaldar dicha conclusión.

5.4. Verificación de mediciones con inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo)

Al analizar los resultados obtenidos en esta prueba, no es posible observar una clara tendencia en ninguno de los nueve casos ensayados con respecto a la inclinación del piezómetro en condición saturada (sin suelo): sin filtro, con el filtro LAE y con el filtro HAE, cada uno en tres posiciones: horizontal, vertical con el extremo libre (en donde se coloca el filtro) apuntando hacia abajo, y con el extremo libre apuntando hacia arriba. Como se puede observar en las figuras de la *Sección 4.2.4*, el error de exactitud con respecto a la medición realizada con la huincha de medir varía en todos los casos, y depende del piezómetro de cuerda vibrante usado. Por ejemplo, el piezómetro P190050 (*Tabla 2*) presenta el menor error, con respecto a la huincha de medir, cuando está posicionado verticalmente y con el filtro HAE apuntando hacia abajo (0,3%); mientras que el piezómetro P349983, cuando está posicionado verticalmente y con el filtro LAE apuntando hacia arriba (3,99%).

Pese a lo anterior, si se comparan los resultados sólo observando la posición del piezómetro, es decir, comparando los gráficos sólo entre colores, es posible determinar que el error de exactitud, con respecto a la medición realizada con la huincha de medir, resulta menor cuando los piezómetros se posicionan tanto horizontalmente como verticalmente con el extremo libre apuntando hacia arriba. Si ahora se comparan los resultados sólo observando el tipo de filtro usado, es decir, comparando los gráficos sólo del mismo color, es posible determinar que el error ya mencionado resulta menor cuando los piezómetros usan el filtro LAE saturado. Por último, si se comparan los dos resultados recién indicados, es posible determinar que el error ya mencionado resulta menor cuando los piezómetros están posicionados verticalmente y con el filtro LAE apuntando hacia arriba. Por lo tanto, se puede concluir que esta configuración es la más exacta de todas.

5.5. Verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo (dentro del contenedor)

Al analizar los resultados obtenidos en esta prueba, es posible observar en la mayoría de los casos el aumento momentáneo de la carga de agua (0,04 [m.c.a.]), producto del ingreso de agua al sistema. En particular, en los ensayos del primer grupo, correspondiente a los tres piezómetros de cuerda vibrante idénticos (tres primeros de la *Tabla 2*), es posible observar en la *Figura 62*, *Figura 63* y *Figura 64* dicho incremento en todas las situaciones, independientemente del filtro usado. Además, y con ayuda del registro en video, se determinó que durante aproximadamente 1 minuto y 45 segundos se mantuvo el incremento momentáneo de la carga de agua (con aumentos y descensos puntuales producto del flujo turbulento), para luego descender hasta alcanzar el valor inicial. Dicho rango de tiempo coincide con lo observado en la *Figura 62*, *Figura 63* y *Figura 64*, concluyendo de esta manera que al menos este tipo de piezómetros de cuerda vibrante posee una rápida respuesta y recuperación frente a los posibles cambios en el ambiente.

Por el contrario, en sólo dos de los cuatro piezómetros restantes se evidencia el aumento momentáneo de la carga de agua. Es más, en uno de esos dos (P171023) se evidencia el aumento sólo cuando está sin filtro, ya que con el filtro LAE puesto, registra un aumento de 0,1 [m.c.a.] aproximadamente. Coincidentemente el piezómetro P180263, que registra el mismo incremento momentáneo de la carga de agua en los dos ensayos, es de la misma marca y posee la misma estructura que los tres piezómetros idénticos mencionados anteriormente, con la salvedad de que posee una capacidad máxima de medición (1000 [kPa]) mucho mayor que la de los otros tres (170 [kPa]).

En cuanto a los piezómetros restantes (últimos dos de la *Tabla 2*), estos presentan incrementos de presión mucho mayores a los producidos por el ingreso del agua: 0,3 [m.c.a.] en el caso del piezómetro P349983 con filtro LAE y 0,1 [m.c.a.] en el caso del piezómetro P571501. Estos dos piezómetros son particularmente diferentes al resto. El primero de estos, al tratarse de un piezómetro de cuerda vibrante ventilado, puede que no sea el ideal para este tipo de ensayos, y por lo mismo sus mediciones resulten poco exactas. Algo similar ocurre con el segundo, dado que es el único piezómetro que posee un filtro unido a él. De esta manera, no es posible comparar sus resultados con otras situaciones, y poder determinar si el filtro cumple algún rol relevante en las mediciones, como pasa con el piezómetro P171023, en donde se evidencia un aumento de 0,1 [m.c.a.] aproximadamente sólo cuando está con el filtro LAE puesto.

En síntesis, los tres piezómetros idénticos, junto al piezómetro P180263, son los que mejor responden frente al rápido y momentáneo incremento de la carga de agua, mientras que los tres restantes son menos exactos. Ahora bien, si estos se organizan en orden decreciente de acuerdo con el grado de exactitud, teniendo como referencia que el aumento momentáneo de la carga de agua es de 0,04 [m.c.a.] y, además, se indica la capacidad máxima de medición de cada piezómetro (*Tabla 2*), se tiene la siguiente tabla comparativa.

Tabla 19: Grado de exactitud con respecto a la capacidad máxima de medición

Piezómetro CV	Incremento de presión medida [m.c.a.]	Capacidad máxima de medición [kPa]
P190050	0,04	170
P190051	0,04	170
P190052	0,04	170
P180263	0,04	1000
P171023	0,10	1000
P571501	0,10	686
P349983	0,30	5175

Al observar la tabla, resulta evidente la relación inversa que existe entre la exactitud de la medición del piezómetro con la capacidad máxima de medición de este, es decir, a medida que aumenta uno, disminuye el otro. Por lo tanto, del análisis de esta prueba es posible determinar que la exactitud de la medición del piezómetro de cuerda vibrante frente a cambios en el sistema (que tan bien responde), está directamente influenciada por la capacidad máxima de medición que posee el instrumento y por la magnitud del incremento/descenso de la presión del agua. Esto último quiere decir que, por ejemplo, la exactitud de la medición no siempre será baja para los casos en donde se utilice el piezómetro P349983, que tiene una capacidad máxima de medición de 5175 [kPa], sino que, dada su capacidad, tendrá una mejor respuesta frente a mayores cambios de presión que los observados en esta prueba.

5.6. Verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad

Tal y como se puede observar en la *Figura 68* y *Figura 69*, casi todas las mediciones (con excepción de una) en el suelo saturado de mayor permeabilidad (café) presentan un error de exactitud, con respecto a la medición realizada con la huincha de medir, menor que en el suelo saturado de menor permeabilidad (gris). Teniendo en consideración los errores de medición asociados a cada piezómetro de cuerda vibrante (*Tabla A.1*), conviene detallar a continuación la tabla de la cual se obtuvieron los resultados observados en la *Figura 69*. En la tabla se indica la presión medida por cada piezómetro en [m.c.a.], la altura de agua medida con la huincha de medir en [m], el error de exactitud con respecto a la medición realizada con la huincha de medir en [%], la diferencia entre las mediciones en [m.c.a.] y el error de medición asociado a cada piezómetro en [m.c.a.].

Tabla 20: Resultados ensayo de verificación de mediciones con suelo de menor permeabilidad

Piezómetro	Presión [m.c.a]	Altura de agua [m]	Error de exactitud [%]	Diferencia [m.c.a.]	Error de medición [m.c.a.]
P190050	0,42	0,40	6,51	0,02	0,02
P190051	0,40	0,40	0,54	0,00	0,02
P190052	0,37	0,39	6,50	0,02	0,03
P180263	0,36	0,39	7,08	0,03	0,04
P171023	0,37	0,38	1,88	0,01	0,12
P349983	0,45	0,40	12,37	0,05	0,17
P571501	0,43	0,40	5,66	0,03	0,04

Como se puede observar en la tabla anterior, pese a que las mediciones en el suelo de menor permeabilidad presentan mayores errores de exactitud que en el suelo de mayor permeabilidad (con excepción de una), estos valores están dentro del error de medición de cada uno de los piezómetros de cuerda vibrante usados en este ensayo.

Además, tal y como se indica en la *Sección 3.4.6*, en ambos ensayos uno de los tres piezómetros de cuerda vibrante idénticos (P190050) cuenta con un filtro diferente a los usados por los otros dos, con la finalidad de ampliar la comparativa de resultados. En el ensayo con suelo de mayor permeabilidad, el piezómetro P190050 posee un filtro HAE en vez de uno LAE (ambos saturados), mientras que, en el ensayo con suelo de menor permeabilidad, es al revés. En ambos casos los resultados obtenidos no se diferencian con los de los otros dos piezómetros. En la *Figura 68* es posible observar que el error de exactitud, con respecto a la medición realizada con la huincha de medir, es similar al del piezómetro P190051; mientras que en la *Figura 69*, el error de exactitud es similar al del piezómetro P190052. Por lo tanto, se puede concluir que el filtro usado no tiene un rol relevante en estos casos, siempre y cuando se encuentre correctamente saturado.

5.7. Verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto)

Con el objetivo de simular una prueba sísmica, se llevan a cabo golpes con diferentes intensidades (baja, media y alta) y en diferentes intervalos de tiempo, con un intervalo máximo en algunos casos de 10 segundos entre cada golpe. Además, se procura replicar los mismos golpes en ambos casos, de esta manera los resultados obtenidos pueden ser comparables. Cabe destacar que cada golpe que se le da a la placa metálica hunde cada vez más a esta, por lo que, al término del ensayo, termina hundida por completo en el suelo, tal y como se observa en la *Figura 36* y *Figura 37*. Por lo anterior, en el primer ensayo, correspondiente a la prueba de impacto sobre el suelo de mayor permeabilidad, se evidenció un incremento final en la carga de agua de

0,03 [m.c.a.] con respecto a la inicial, de 0,545 [m.c.a.]. Mientras que, en el segundo ensayo, se evidenció un aumento de tan sólo 0,002 [m.c.a.] con respecto a la inicial, de 0,578 [m.c.a.].

Al analizar la *Figura 70* y *Figura 72*, lo primero que se puede observar es que la respuesta (tiempo de reacción) por parte de los piezómetros de cuerda vibrante es prácticamente inmediata en el suelo de mayor permeabilidad (café) cuando este se somete a movimientos generados por los reiterados impactos en la superficie del sistema. Lo mismo ocurre con los tiempos de recuperación, es decir, el tiempo en estabilizar nuevamente su lectura. Como se observan en los gráficos cafés, al cabo de tres minutos, los piezómetros logran estabilizarse, manteniendo una medición constante de su nueva condición, evidenciando de esta manera el incremento final en la carga de agua de 0,03 [m.c.a.].

Por otro lado, en la *Figura 71* y *Figura 73*, es posible observar que, en el suelo de menor permeabilidad (gris), la respuesta por parte de los piezómetros de cuerda vibrante es prácticamente inmediata, coincidiendo con los momentos en donde se inicia la serie de impactos, al igual que en el suelo de mayor permeabilidad (café). Pero a diferencia de este último, los tiempos de recuperación son más lentos, tardando mucho más tiempo en estabilizarse y alcanzar su condición final. Como se observa en los gráficos grises, al cabo de tres minutos, los piezómetros no logran estabilizarse, y no reflejan el incremento final de tan sólo 0,002 [m.c.a.].

De esta manera se puede concluir que el tiempo de respuesta de los piezómetros de cuerda vibrante frente a cambios rápidos y bruscos en el ambiente, como los movimientos generados por un sismo, no se ve influenciado por la permeabilidad del suelo en el que están midiendo. Lo que sí se ve influenciado es el tiempo de recuperación, es decir, el tiempo en estabilizar nuevamente su lectura. A medida que el suelo sea cada vez menos permeable, el tiempo de recuperación de los piezómetros será cada vez más lento, tomando mucho más tiempo en estabilizar su lectura y, por consiguiente, alcanzar su condición final.

6. Conclusiones

El objetivo de este trabajo de título es poder proponer mejoras en las aplicaciones de campo de los piezómetros de cuerda vibrante, es decir, mejoras en la instalación, en la puesta en servicio y en la operación a largo plazo de estos, indicando con ello las posibles limitaciones de su uso y las condiciones necesarias para su correcto funcionamiento.

Una de las primeras conclusiones, que resulta válida para todas las pruebas que se llevan a cabo en este trabajo, tiene relación con la saturación del instrumento. Tal y como se puede observar en el análisis de la primera prueba de laboratorio, correspondiente a la consideración de presión atmosférica y lectura de presión cero, es posible determinar que esta última se puede llevar a cabo con el piezómetro de cuerda vibrante sin filtro o con algún filtro colocado, ya sea LAE o HAE, puesto que las mediciones no difieren sustancialmente entre sí, siempre y cuando se sature correctamente tanto la cámara del diafragma como también los filtros usados. Por el contrario, si no se tiene una correcta saturación, la diferencia en los resultados se hace mucho mayor y resulta evidente. Además, del análisis de la tercera prueba de laboratorio, correspondiente a la verificación de mediciones con distintas condiciones de saturación de los filtros, es posible determinar que las mediciones en condición saturada, es decir, en las que se tiene una correcta saturación tanto de la cámara del sensor como también de los filtros usados, presentan un error de exactitud con respecto a la medición realizada con la huincha de medir mucho menor que las de los casos no saturados. Esta diferencia resulta aún más relevante cuando se usa el filtro HAE. De esta manera es posible ratificar lo señalado en el trabajo de Sorensen y Simonsen. En él, los autores creen que la principal razón por la que los piezómetros de cuerda vibrante no funcionan bien (presentan errores en sus mediciones), es por la saturación insatisfactoria del filtro. Por lo tanto, indican que una incorrecta saturación de los filtros, en particular de los filtros HAE, genera errores en las mediciones de los piezómetros de cuerda vibrante, al igual que este trabajo.

Además, como se menciona en la *Sección 2.7*, los piezómetros de cuerda vibrante son sensores de medición relativa, por lo que las lecturas cero son críticas para determinar una altura de presión exacta. Por lo tanto, independientemente del filtro usado, se debe tener una correcta saturación para determinar la presión cero del instrumento, y con ello garantizar que las futuras mediciones sean más exactas.

En cuanto a la posición en la que deben ir los piezómetros al momento de realizar la lectura de presión cero, el fabricante recomienda la orientación final prevista, es decir, posicionarlos de la misma manera en cómo irán instalados. Pese a lo anterior, al analizar los resultados se observa que las lecturas de presión cero que permiten obtener mediciones más exactas corresponden a cuando se tiene el piezómetro en posición vertical con el filtro apuntando hacia abajo, pese a que esta posición difiere de la determinada como óptima más adelante.

Por otro lado, el análisis de la segunda prueba de laboratorio, correspondiente a la verificación de calibración y prueba con carga hidráulica, resulta ser muy relevante, y quizás la principal conclusión de este trabajo de título, puesto que permite concluir que el piezómetro de cuerda vibrante más que ser un instrumento de medición exacta, en casos desfavorables, es un instrumento de medición precisa que permite determinar una correcta presión de agua, a partir de un nuevo valor de referencia.

Otra de las conclusiones de este trabajo de título tiene relación con la configuración de instalación óptima de los piezómetros de cuerda vibrante en el sistema, en otras palabras, la posición óptima de colocación de estos y el tipo de filtro usado. Del análisis de la cuarta prueba de laboratorio, correspondiente a la verificación de mediciones con inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo), se puede concluir que la configuración óptima (más exacta de todas) corresponde a la posición vertical con el filtro LAE apuntando hacia arriba. Ahora bien, en principio esta configuración es sólo válida para ambientes sólo con agua, en donde ni siquiera se cuestiona el tipo de filtro usado, ya que este toma relevancia cuando hay suelo. Es en este punto que cobra importancia el análisis de la sexta prueba de laboratorio, correspondiente a la verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad, dado que permite ratificar la configuración óptima anteriormente descrita, en los ensayos con suelos de diferente permeabilidad. Además, se puede concluir que el filtro usado no tiene un rol relevante en estos ensayos, siempre y cuando se encuentre correctamente saturado. Por lo tanto, gracias a esta conclusión es posible complementar la obtenida a partir del análisis de la cuarta prueba de laboratorio, y con ello determinar que la configuración de instalación óptima (mediciones más exactas) del piezómetro de cuerda vibrante, en un ambiente ya sea sólo con agua o con suelo saturado⁸, se logra cuando los piezómetros se posicionan verticalmente y con el filtro LAE saturado apuntando hacia arriba.

Finalmente, la última gran conclusión de este trabajo de título tiene relación con la respuesta de los piezómetros de cuerda vibrante frente a cambios en el sistema. El análisis de la quinta prueba de laboratorio, correspondiente a la verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo, permite determinar que la exactitud de la medición del piezómetro de cuerda vibrante frente a cambios en el sistema, es decir, qué tan bien responde este, está directamente influenciada por la capacidad máxima de medición que posee el instrumento y por la magnitud del incremento/descenso de la presión del agua. Esto último quiere decir que, por ejemplo, la exactitud de la medición no siempre será baja para los casos en donde se utilice un piezómetro con una gran capacidad de medición (por ejemplo de 5175 [kPa]), sino que, dada su capacidad, tendrá una mejor respuesta frente a mayores cambios de presión que los observados en la quinta prueba. Además, el análisis de la séptima y última prueba de laboratorio, correspondiente a la verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas de impacto), permite concluir que el tiempo de respuesta de los piezómetros de cuerda vibrante frente a cambios rápidos y bruscos en el ambiente, como los movimientos generados por un sismo, no se ve influenciado por la permeabilidad del suelo en el que están midiendo. Lo que si se ve influenciado es el tiempo

⁸ La conclusión en principio es válida sólo para los suelos saturados analizados en este trabajo de título, y no otros más finos.

de recuperación, es decir, el tiempo en estabilizar nuevamente su lectura. A medida que el suelo sea cada vez menos permeable, el tiempo de recuperación de los piezómetros será cada vez más lento, y, por consiguiente, tardará mucho más en alcanzar su condición final. Por lo tanto, a partir del análisis de estas dos pruebas, es posible concluir que la respuesta de los piezómetros de cuerda vibrante frente a cambios rápidos y bruscos en el ambiente, como la filtración de un gran caudal o los movimientos generados por un sismo, depende tanto de la capacidad máxima de medición que posee el instrumento, como también de la magnitud del incremento/descenso de la presión del agua en el ambiente, y por último de la permeabilidad del suelo en el que se está midiendo.

Por último, a partir del análisis y de las conclusiones de las pruebas de laboratorio estáticas y dinámicas con piezómetros de cuerda vibrante, es posible proponer las siguientes mejoras en sus aplicaciones de campo, indicando con ello las posibles limitaciones de su uso y las condiciones necesarias para su correcto funcionamiento:

- Previo a la instalación de los piezómetros de cuerda vibrante, se debe llevar a cabo correctamente la saturación, tanto de la cámara del diafragma como también de los filtros usados tanto LAE como HAE, sobre todo estos últimos. Esto resulta fundamental para lograr mediciones exactas. Para obtener una correcta saturación, primero se debe llenar un balde grande con agua potable limpia, procurando que no haya factores externos que alteren su temperatura. Luego, se deben retirar los filtros y se deben colocar los piezómetros en el fondo del balde, durante al menos una hora. Se debe realizar el mismo procedimiento con los filtros, procurando retirar todas las burbujas de su interior, para luego colocarlos en el fondo del balde en posición vertical, con los poros más próximos a la superficie. Este último gran detalle permite que las posibles burbujas suban, atraviesen los poros, y den como resultado una correcta saturación.
- Para la lectura de presión cero del piezómetro de cuerda vibrante, es primordial tener una correcta saturación. De esta forma es posible garantizar que las futuras mediciones sean más exactas. Esta lectura, al igual que la saturación, se debe llevar a cabo previo a la instalación de los piezómetros. Teniendo saturadas correctamente la cámara del sensor, así como también los filtros usados, se puede llevar a cabo la lectura de presión cero con o sin filtro, puesto que las mediciones no difieren sustancialmente entre sí. Pese a lo anterior, se recomienda hacerlo sin el filtro puesto. Para obtener una correcta lectura, primero se debe tener el piezómetro al interior de un balde grande con agua potable limpia, por al menos una hora, procurando que no haya factores externos que alteren su temperatura. Luego, se debe retirar el piezómetro del balde y sostener en posición vertical con el extremo libre apuntando hacia abajo por al menos un minuto, procurando sostener sólo el cable. Inmediatamente después, se debe volver a sumergir el piezómetro en el balde con agua por al menos dos minutos. Por último, se debe repetir el proceso recién descrito al menos dos veces más, para luego obtener un valor promedio.

-
- Si se desea instalar los piezómetros de cuerda vibrante en un suelo cuyas propiedades lo clasifiquen como una arena, independientemente del porcentaje de finos, se recomienda instalar los piezómetros en posición vertical con el filtro LAE saturado apuntando hacia arriba. De esta manera se tendrán mediciones más exactas, siempre y cuando se sature correctamente tanto la cámara del diafragma como también el filtro LAE, y por sobre todo, el ambiente en donde se instalarán se encuentre saturado.
 - Ahora bien, si se desea instalar los piezómetros de cuerda vibrante en ambientes no saturados, y que se mantendrán así por mucho tiempo (meses o años), hay que tener muy presente que en algún momento la cámara del sensor así como también el filtro usado se desaturarán, desencadenando de esta manera posibles errores de exactitud en las mediciones futuras. Por consiguiente, cuando el piezómetro detecte la presión del agua, la medición podría no ser exacta, pero sí útil para usarla de referencia y a partir de ella, determinar cuánto aumenta la presión del agua al interior del suelo. Por lo tanto, ante situaciones desfavorables como la recién descrita, el piezómetro de cuerda vibrante más que ser un instrumento de medición exacta, es un instrumento de medición precisa que permite determinar una correcta presión de agua, a partir de un nuevo valor de referencia. En este caso es imperante instalar los piezómetros en posición vertical con el filtro (de preferencia LAE) saturado apuntando hacia arriba.
 - Por último, si se desea instalar piezómetros de cuerda vibrante con el objetivo de evidenciar alzas rápidas y bruscas de presión, producidas por ejemplo por la filtración de un gran caudal o los movimientos generados por un sismo, se deben tener en consideración tres factores para determinar el piezómetro más adecuado para dicho propósito: la capacidad máxima de medición que posee el piezómetro; la magnitud del incremento/descenso de la presión del agua que se esperaría alcanzar en el ambiente; y por último, la permeabilidad del suelo en el que se instalarán los piezómetros.

Cabe mencionar que durante el desarrollo de este trabajo de título surgieron varias problemáticas y limitaciones no previstas, como por ejemplo lecturas erradas por parte de los piezómetros de cuerda vibrante, dado que el software de trabajo no usaba una configuración fija, sino que debía ajustarse de acuerdo al tipo de prueba, y en particular, al piezómetro usado, ralentizando de esta manera en gran medida el desarrollo del plan de trabajo establecido; o que los piezómetros con mayores capacidades de medición, respondían de mejor manera en ambientes con mayores presiones que los considerados en las pruebas de laboratorio, entre otras. Esto dio paso a nuevas interrogantes, y con ellas, a nuevas ideas de investigación. Por lo anterior, la prueba final considerada en un principio, correspondiente a la verificación de instalación y mediciones en un entorno de grout, fue descartada con el objetivo de continuar el trabajo descrito en este informe y poder seguir ahondando en la investigación del funcionamiento de los piezómetros de cuerda vibrante bajo diferentes configuraciones y ambientes. Por lo tanto, en el capítulo siguiente se deja establecido un trabajo de laboratorio/terreno propuesto para seguir avanzando con el entendimiento del comportamiento de estos sensores y su adecuado uso.

7. Trabajo propuesto

El objetivo de este trabajo propuesto es poder ampliar todo lo aprendido y concluido en este trabajo de título, sin tener que repetir los mismos errores y partir con una gran base de conocimiento. Por lo anterior, lo ideal sería poder utilizar los mismos piezómetros de cuerda vibrante usados en este trabajo, así como también el mismo data logger y software, puesto que estos últimos son relevantes para registrar de forma exacta y precisa las mediciones de cada piezómetro. Además, en el caso particular del software, se pudo establecer una configuración de ajustes óptimos para el trabajo, después de varias problemáticas y dudas con respecto a su funcionamiento, por lo que resulta más que provechoso trabajar a partir de ello.

7.1. Nueva verificación de mediciones con carga hidráulica

Considerando que la mayoría de los piezómetros de cuerda vibrante utilizados poseen grandes capacidades de medición, se podría replicar la prueba con carga hidráulica, pero esta vez usando carga hidráulicas mucho mayores, es decir, estableciendo cargas de agua de 5 [m.c.a] en adelante, o incluso ir registrando cada 10 [m.c.a]. Para su correcto desarrollo se deberá seguir la misma metodología de la prueba con carga hidráulica (*Sección 3.4.2*), reemplazando el permeámetro de carga constante por algún contenedor similar, unido a una manguera muchísimo más larga que la utilizada en el laboratorio. Dadas las características de esta nueva prueba, no podría realizarse en el laboratorio y necesariamente habría que salir a terreno.

7.2. Nueva verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo

Recordando que en la prueba de verificación de mediciones con flujo en el sistema sin suelo, la mayoría de los piezómetros registró mediciones poco exactas, resulta interesante replicar esta prueba pero esta vez con un sistema que permita la circulación tanto de un flujo laminar, como de uno turbulento. En particular, esta prueba resultaría interesante para analizar la respuesta del piezómetro de cuerda vibrante ventilado (P349983), que a su vez es el que posee mayor capacidad de medición, y el que registró las mediciones menos exactas. Para su correcto desarrollo se deberá crear un nuevo sistema, compuesto por un contenedor de acrílico más bajo y mucho más alargado que el usado, junto a un sistema de inyección de agua que permita además crear tanto flujos laminares como turbulentos. Además, en esta prueba podrían colocarse en diferentes posiciones los piezómetros de cuerda vibrante, con el objetivo de verificar si existe alguna diferencia entre ellas. Algunas posiciones podrían ser iguales a las establecidas en la prueba de verificación de mediciones con inclinación del piezómetro en presencia de agua (sin suelo), es decir, horizontal, vertical con el filtro apuntando hacia abajo, y con el filtro apuntando hacia arriba, y otras nuevas como situarlos horizontalmente con el filtro en contacto directo con el flujo y en sentido contrario. Dadas las características de esta nueva prueba, podría realizarse en el laboratorio.

7.3. Tiempo de desaturación y saturación de los piezómetros de cuerda vibrante

Una de las principales conclusiones de este trabajo de título tiene relación con las condiciones desfavorables, en particular, cuando el ambiente en donde se instalarán los piezómetros de cuerda vibrante no se encuentra saturado, provocando que en algún momento la cámara del sensor así como también el filtro usado se desaturen. De esta conclusión resulta interesante determinar, o al menos tener una referencia, del tiempo que toman en desaturarse los piezómetros de cuerda vibrante una vez instalados. Por lo tanto, se podría replicar la prueba de verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad, modificando algunas variables, con el objetivo de determinar el tiempo que toman en desaturarse los piezómetros (cámara y diafragma), así como también el tiempo que toman en volver a saturarse por completo, y si estos tiempos dependen de la permeabilidad del suelo. Para su correcto desarrollo se deberá seguir la misma metodología de la prueba con suelos de diferente permeabilidad (*Sección 3.4.6*), con la novedad de que se realizará tres veces el mismo ensayo para cada uno de los suelos, cambiando en cada uno la saturación de este. El primer ensayo se llevará a cabo de la misma forma; mientras que el segundo ensayo consistirá en replicar el primero, pero el suelo no deberá estar saturado (sólo estarán saturados los piezómetros); y por último, el tercer ensayo consistirá en replicar el primero, pero tanto el suelo como los piezómetros no deberán estar saturados. A diferencia del segundo ensayo, en el tercero se deberá saturar el suelo de la misma forma en cómo se hizo en el primero, una vez instalados los piezómetros.

De esta manera, gracias al primer ensayo se obtendrá una medición de referencia por cada piezómetro. Mientras que del segundo ensayo se obtendrá el tiempo que toman en desaturarse los piezómetros. Como en este caso el suelo no estará saturado, se espera que la primera medición de cada piezómetro sea igual a cero (considerando para ello la lectura de presión cero de cada piezómetro). Si no ocurre lo anterior, tal y como se concluyó en este trabajo de título, el valor obtenido puede usarse como referencia, es decir, fijarse como el “cero” del instrumento, y a partir de él, empezar a medir los cambios. Dicho lo anterior, el momento en el que la medición sea diferente del nuevo “cero”, se podrá considerar como el inicio de la desaturación y cuando la lectura se estabilice y no presente mayores cambios, como el término de esta. Por último, del tercer ensayo se podrá registrar todo el proceso de saturación del suelo, y con ello, la saturación del propio piezómetro, por lo que se podrá determinar el tiempo que toman en saturarse estos. En este último punto cobra relevancia la medición de referencia de cada piezómetro obtenida del primer ensayo, dado que permitirá determinar si la medición realizada por los piezómetros es correcta. Por otro lado, además de determinar si la permeabilidad juega algún rol fundamental en los tiempos de desaturación y saturación de los piezómetros de cuerda vibrante, podría resultar interesante colocar en diferentes posiciones los piezómetros, con el objetivo de verificar si existe alguna diferencia en los tiempos de cada una. Dadas las características de esta nueva prueba, podría realizarse en el laboratorio, teniendo en cuenta que se cuenta con todo lo necesario.

7.4. Nueva verificación de mediciones con suelos saturados de diferente permeabilidad

Siguiendo con las pruebas con suelo, resultaría interesante analizar el comportamiento de los piezómetros de cuerda vibrante en suelos con las mismas características que los usados en tranques de relaves, es decir, mismo tipo de suelo, porcentaje de finos, grado de compactación, entre otras variables, con el objetivo de emular en el laboratorio el mismo ambiente de campo. Para su correcto desarrollo se deberá seguir la misma metodología de la prueba con suelos de diferente permeabilidad (*Sección 3.4.6*), con la única diferencia de que el suelo usado será uno nuevo. Dadas las características de esta nueva prueba, podría realizarse en el laboratorio.

7.5. Verificación de mediciones en presencia de movimiento (pruebas sísmicas)

Como en la prueba de verificación de mediciones en presencia de movimiento se simuló una prueba sísmica, mediante golpes con diferentes intensidades (baja, media y alta) y en diferentes intervalos de tiempo, en este trabajo propuesto se sugiere replicar dicha prueba en una mesa vibradora, con la finalidad de estandarizar y controlar algunas variables (como la frecuencia), y con ello poder ratificar y ampliar los resultados obtenidos en este trabajo de título. Para esta nueva prueba se podrá considerar la configuración establecida en la *Sección 3.4.7*, con la consideración de reforzar el contenedor de acrílico y evitar posibles accidentes durante el ensayo. Dadas las características de esta nueva prueba, podría realizarse en el laboratorio

7.6. Verificación de instalación y mediciones en un entorno de grout

Por último, se propone llevar a cabo la prueba final considerada en un principio en este trabajo de título, correspondiente a la verificación de instalación y mediciones en un entorno de grout. Tal y como se indica en la *Sección 2.8.2*, el método totalmente embebido en lechada de cemento es de los más usados en la práctica hoy en día, dado que la instalación es más económica, rápida y permite la colocación de varios piezómetros de cuerda vibrante por pozo. Ahora bien, hay que destacar que algunos autores recalcan que este método sólo se aplica a los piezómetros de cuerda vibrante instalados en suelos saturados, excluyendo los suelos insaturados, que exhiben presiones de gas positivas o grandes presiones negativas (succiones). Además, en varios estudios se considera una buena práctica elegir una lechada con una permeabilidad lo más cercana posible a la del suelo. Por lo mismo, se debe tener el cuidado adecuado para preparar una mezcla de lechada que imite lo mejor posible la rigidez y permeabilidad del suelo circundante.

Por lo anterior, para esta prueba se considerará la configuración establecida en la *Sección 3.4.6*, con la novedad de que se verterá una lechada que envuelva al piezómetro de cuerda vibrante. En cuanto a la lechada, se utilizará la dosificación de grout más utilizada hoy en día. De esta forma, se podrán verificar las mediciones en un entorno de grout y determinar cuan relevante resulta ser la dosificación usada cuando se mide en suelos con diferente permeabilidad. Además, se llevará a cabo esta misma prueba pero con los suelos no saturados, al igual que el tercer

ensayo de la tercera prueba propuesta en este capítulo, con el objetivo de ampliar los resultados y posteriores análisis de esta prueba.

Por consiguiente, para la realización de estas nuevas pruebas estáticas y dinámicas tanto de laboratorio como de terreno, se necesitan al menos los siguientes instrumentos y materiales:

- 7 piezómetros de cuerda vibrante, descritos en la *Tabla 2*.
- Filtros LAE y HAE, descritos en la *Tabla 1*.
- 1 data logger, descrito en la *Sección 3.2*.
- Software DVW Toolbox asociado al data logger, descrito en la *Sección 3.2*.
- 1 contenedor de acrílico para agua y suelo, de al menos 104 litros.
- 1 nuevo contenedor de acrílico que permita el flujo de agua en su interior.
- Sistema de inyección de agua que permita además crear tanto flujos laminares como turbulentos.
- 3 suelos de diferente permeabilidad.
- 1 contenedor similar al permeámetro de carga constante.
- 1 manguera con una longitud de al menos 50 metros.
- Huincha de medir metálica.
- Mesa vibradora.
- Grout.
- Bentonita.
- Huinchas y cintas aislantes.
- Tubos de PVC.
- Embudo de plástico.

8. Bibliografía

- [1] Alva Hurtado, J., & Escalaya Advíncula, M. (2011). Instrumentación Geotécnica de la Presa Pillones. *Pan-Am CGS Geotechnical Conference*.
- [2] Baird, A. J., & Gaffney, S. W. (1994). Cylindrical Piezometer Responses in a Humified Fen Peat. En *Hydrology Research* (Vol. 25, págs. 167-182). Obtenido de <https://doi.org/10.2166/nh.1994.0002>
- [3] Canary Systems. (2019). *Vibrating Wire Piezometer Deployment Guidelines*.
- [4] Central Water Commission. (2018). *Guidelines for Instrumentation of Large Dams*.
- [5] Choquet, P., Juneau, F., Debreuille, P. J., & Bessette, J. (1999). Reliability, long-term stability and gage performance of vibrating wire sensors with reference to case histories. *Proceedings of the 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, (págs. 49-54).
- [6] Contreras, I., Grosser, A., & Ver Strate, R. (Junio de 2008). The Use of the Fully-grouted Method for Piezometer Installation. *Geotechnical News*, 30-37.
- [7] Dunicliff, J. (1993). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. Wiley-Interscience.
- [8] Geosense. (2014). *Application Guide - Piezometers*.
- [9] Geosense. (2020). *VW Piezometers - Instruction Manual*.
- [10] Ingeniería GCE. (12 de Julio de 2018). *Tipos de Piezómetros*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2022, de Ingeniería GCE - Especialistas en Geotecnia, Construcción y Estructura: <https://ingenieriagce.wordpress.com/2018/07/12/tipos-de-piezometros/>
- [11] Marefat, V., Duhaime, F., Chapuis, R. P., & Le Borgne, V. (04 de Septiembre de 2018). Performance of Fully Grouted Piezometers under Transient Flow Conditions: Field Study and Numerical Results. *Geotechnical Testing Journal*, 25. doi:10.1520/GTJ20170290
- [12] Martínez, G., & Hürlimann, M. (2016). *Análisis del comportamiento del suelo por infiltración en una ladera y su relación ante el deslizamiento superficial de Cercs*. Escola de Camins, Departamento de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona.
- [13] Mikkelsen, P. E., & Green, G. E. (2003). Piezometers in Fully Grouted Boreholes. *International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. Oslo.

-
- [14] Nakashima, S., Kawasaki, H., Kubota, S., Nakano, T., & Shimizu, N. (2012). *Application of GPS displacement monitoring system and vibration wire piezometers into monitoring deformation and seepage behavior of an earth-filled dam* (Vol. 68).
- [15] *Precisión y exactitud*. (21 de Octubre de 2022). Recuperado el 02 de Octubre de 2022, de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Precisi%C3%B3n_y_exactitud&oldid=146795186
- [16] QBPROFE. (19 de Agosto de 2020). *Conceptos de Instrumentación Industrial*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2022, de QBPROFE Academy:
<https://www.qbprofe.com/automatizacion-instrumentacion-industrial/conceptos-de-instrumentacion-industrial/>
- [17] Raïmat, C., Zarroca, M., Hürlimann, M., Corominas, J., & Luis-Fonseca, R. (2013). *Resultados preliminares del uso de piezómetros de cuerda vibrante como herramienta a considerar para el estudio de la generación de deslizamientos en morrenas glaciares*. Barcelona.
- [18] Raventós Fornós, J., & Arroyo Alvarez de Toledo, M. (2016). Instalación de piezómetros con sellado continuo en el Puerto de Barcelona. *10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica*, (págs. 355-362). La Coruña.
- [19] Roctest. (2014). *Vibrating Wire Piezometer. Instruction Manual*. Obtenido de <https://roctest.com/wp-content/uploads/2017/01/E1100D->
- [20] RST Instruments. (2019). *VW2100 Vibrating Wire Piezometer - Instruction Manual*.
- [21] Scientific Campbell. (2019). *CDM-VW300 Series - Dynamic Vibrating Wire VSPECT Analyzers*.
- [22] Sisgeo. (2014). *Piezómetros Casagrande y Abiertos*.
- [23] Sisgeo. (2015). *Piezómetros Piezo-Resistivos*.
- [24] Sisgeo. (2020). *Piezómetros de Cuerda Vibrante*.
- [25] Sorensen, K., & Simonsen, T. (2018). Performance Of Vibrating Wire Piezometers In Very Low Permeable Clay. *International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, (págs. 1-20). Río de Janeiro.
- [26] *Vibrating Wire Piezometer – Types and Operating Principle*. (21 de Enero de 2020). Recuperado el 02 de Noviembre de 2022, de Encardio Rite:
<https://www.encardio.com/blog/vibrating-wire-piezometer-types-and-operating-principle/>

-
- [27] Wan, M., & Standing, J. (2014). Field measurement by fully grouted vibrating wire piezometers. *Geotechnical Engineering*, 167, 547-564. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1680/geng.13.00153>
- [28] Zita Fernandes, A. (05 de Diciembre de 2017). *Exactitud y precisión*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2022, de Diferenciador - Descubre las diferencias y las semejanzas: <https://www.diferenciador.com/diferencia-entre-exactitud-y-precision/>

Anexo A – Pruebas de laboratorio

A.1. Capacidad máxima y error de medición de los piezómetros de cuerda vibrante (CV) utilizados

Tabla A.1: Características de los piezómetros CV utilizados

Marca	Código	Filtro	Capacidad máxima de medición		Error de medición c/r a la capacidad máxima de medición			
			[kPa]	[m.c.a.] ⁹	[%]	[kPa]	[m.c.a.]	[cmH ₂ O] ¹⁰
Sisgeo	P190050	HAE y LAE	170	17,34	0,1221	0,21	0,02	2,12
Sisgeo	P190051	HAE y LAE	170	17,34	0,0897	0,15	0,02	1,56
Sisgeo	P190052	HAE y LAE	170	17,34	0,1612	0,27	0,03	2,79
Sisgeo	P180263	LAE	1000	101,97	0,03449	0,34	0,04	3,52
Sisgeo	P171023	LAE	1000	101,97	0,11533	1,15	0,12	11,76
Geosense	P349983	LAE	5175	527,72	0,0317	1,64	0,17	16,73
ACE	P571501	HAE	686,47	70,00	0,06017	0,41	0,04	4,21

⁹ [m.c.a.] = metro columna de agua.

¹⁰ [cmH₂O]: centímetro de agua o centímetro columna de agua.

A.2. Ensayo de granulometría

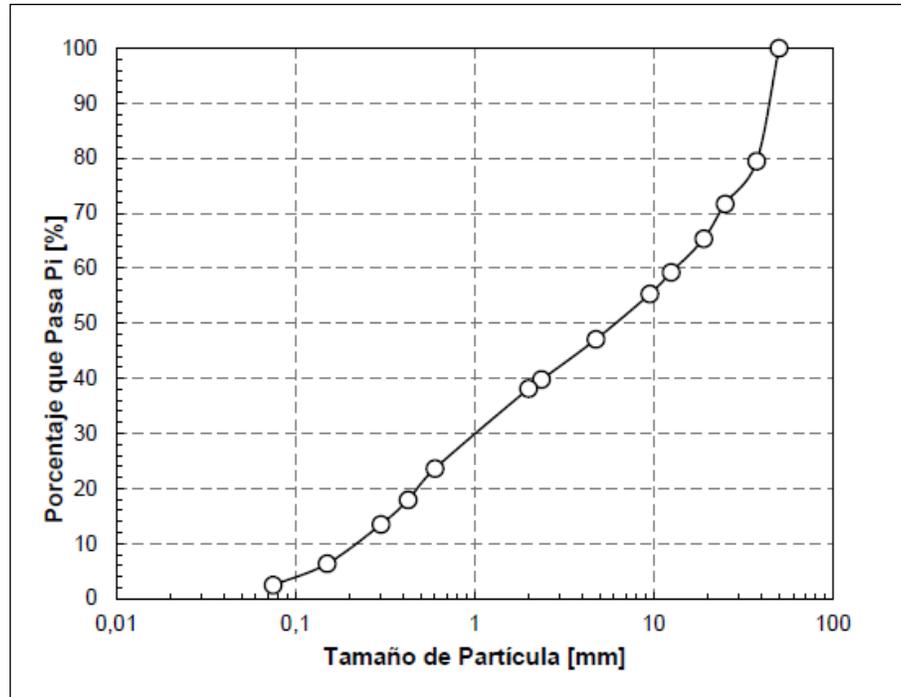


Figura A.1: Curva Granulométrica.

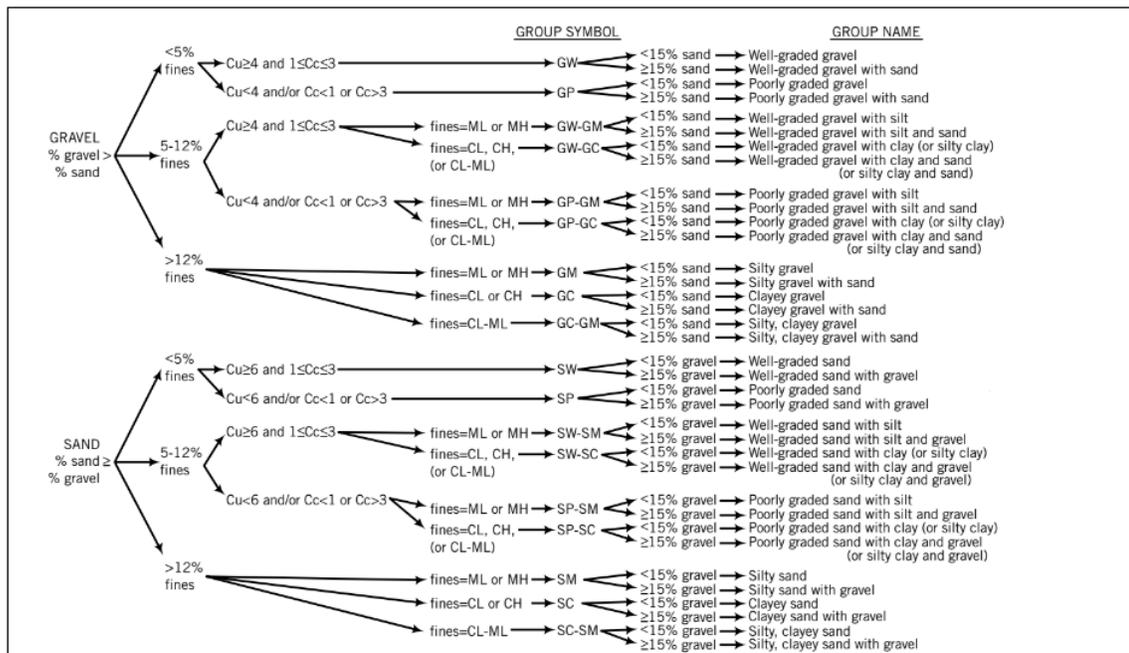


Figura A.2: Tabla para clasificación de suelos según ASTM D2487. Budhu (2011).

A.2.1. Memoria de cálculo

Coefficiente de uniformidad

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Donde:

- C_u [-]: Coeficiente de uniformidad.
- D_{60} [mm]: Diámetro por el que pasa el 60% de la muestra de suelo.
- D_{10} [mm]: Diámetro por el que pasa el 10% de la muestra de suelo.

Coefficiente de curvatura

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

Donde:

- C_c [-]: Coeficiente de curvatura.
- D_{60} [mm]: Diámetro por el que pasa el 60% de la muestra de suelo.
- D_{30} [mm]: Diámetro por el que pasa el 30% de la muestra de suelo.
- D_{10} [mm]: Diámetro por el que pasa el 10% de la muestra de suelo.

Porcentaje de suelo retenido en el tamiz de apertura D_i

$$R_i = \frac{P_{ri}}{P_t} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Donde:

- R_i [%]: Porcentaje de suelo retenido en el tamiz de apertura D_i .
- P_{ri} [gr]: Peso retenido por la malla i .
- P_t [gr]: Peso total.

Porcentaje de suelo que pasa por la malla de apertura D_i

$$P_i = 100 - \sum_{j=1}^i R_j \quad [\%] \quad (4)$$

Donde:

- P_i [%]: Porcentaje de suelo que pasa por la malla de apertura D_i .
- R_j [%]: Porcentaje de suelo retenido en el tamiz de apertura D_j .

A.3. Ensayo de permeabilidad de carga constante

A.3.1. Memoria de cálculo

Ley de Darcy

$$v = k \cdot i \quad (5)$$

Donde:

- v [cm/s]: Velocidad del flujo.
- k [cm/s]: Coeficiente de permeabilidad.
- i [-]: Gradiente hidráulico.

Gradiente hidráulico

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (6)$$

Donde:

- i [-]: Gradiente hidráulico.
- Δh [cm]: Carga hidráulica a lo largo de la muestra. Diferencia en la cabeza en los manómetros.
- L [cm]: Longitud de la muestra.

Coeficiente de permeabilidad

$$q = k \cdot i \cdot A \rightarrow k = \frac{q \cdot L}{A \cdot \Delta h} \quad (7)$$

Donde:

- k [cm/s]: Coeficiente de permeabilidad.
- q [cm³/s]: Cantidad de flujo por unidad de tiempo.
- L [cm]: Longitud de la muestra.
- A [cm²]: Área de la sección transversal de la muestra.
- Δh [cm]: Carga hidráulica a lo largo de la muestra. Diferencia en la cabeza en los manómetros.

Anexo B – Hojas de calibración

B.1. Piezómetro CV – P190050. Sisgeo

		CALIBRATION REPORT		
		N. 1900804		
Serial Number:	P190050	Customer:	GEOSINERGIA	
Product Code:	0PK20A17000	Job Number:	19-00032	
Model:	PIEZOMETER 170 kPa	Project Code:		
Type:	Vibrating Wire	Cable (m):	5	
Calibration Date:	30/01/2019 14:44			
Test Conditions				
Temperature:	22 ± 0.5 °C	Humidity:	31 ± 10%	
		Barometric Pressure:	982 ± 5 hPa	
Calibration Method				
Calibration is made by direct comparison method using a calibration bench. Calibration is made at SISGEO laboratory. SISGEO S.r.l. is a Certified UNI EN ISO 9001 Company. Calibration procedures: IST 10/01*; IST 10/04*; IST 10/06*; IST 10/13*; IST 10/28* (*: in accordance to the instruments model) Calibration is made according to inclinometric, displacement, load and pressure conventions in reference to calibration equipment.				
Traceability is through first line standards, validated by certificates of calibration				
Pressure Indicator 154: GE Druck, CM1, UKAS 0055104 Waveform Generator 157: Keysight Technologies, 33509B, LAT 046 353238 Multimeter 171: Keysight Technologies, 3458A, LAT 046 358517				
- The measurement results reported in this Calibration Report were obtained following the calibration procedures and the reference samples of instruments written above. They relate only to the calibrated item and they are valid only for the time and conditions of calibration, unless otherwise specified. - The measurements uncertainties (U) stated in this document have been determined according to the ISO/IEC Guide 98 and to EA-4/02. Usually they have been estimated as expanded uncertainty obtained multiplying the standard uncertainty by the coverage k factor corresponding to a confidence level of about 95%. Usually the k factor is 2. - MPE: Maximum Permitted Error				
RESULTS				
Temperature Linear Factor:	kT = 0.1418705 [kPa/°C]			
Reading thermally compensated:	Rct = Rmeas + ΔT*kT			
Linear Sensitivity Factors: (1)	A = -6.4135E-02 [kPa/digit]	B = 5.5188E+02 [kPa]		
Maximum Linear Error + U: (2)	0.3121 [%FS]			
MPE Lin. = 0.4 [%FS]				
Final Linear Reading: (3)	Rcl = A*Rmeas + B [kPa]			
Polynomial Sensitivity Factors: (4)	A = -1.1454E-10 [kPa/digit ³]	B = 2.0794E-06 [kPa/digit ²]	C = -7.6042E-02 [kPa/digit]	D = 5.7290E+02 [kPa]
Maximum Polynomial Error + U: (2)	0.1221 [%FS]			
MPE Pol. = 0.25 [%FS]				
Final Polynomial Readings: (6)	Rcp = A*Rmeas ³ + B*Rmeas ² + C*Rmeas + D [kPa]			
CRITERIA	Max Lin. Err. + U < MPE Lin.		COMPLIANT To the Datasheet	
	Max Pol. Err. + U < MPE Pol.			
Issue Date:	31.01.2019		CQE: <i>Renzo Biondi</i>	
<small>SISGEO S.r.l. - Via F. Serpero 4F1 - 20060 Masate - Milano (Italy) Tel +39-02-95764130 - Fax +39-02-95762011 - E-mail info@sisgeo.com - www.sisgeo.com Cap. Soc. 99.000 Euro i.v. - VAT n. IT10732420152 - Tribunale Milano. 333230 - REA Milano. 1413159</small>				
<small>Mod. 11141 Rev.2</small>			<small>Page 1 of 2</small>	

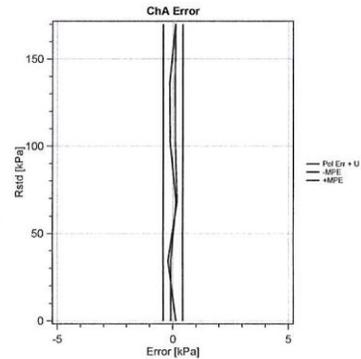
Figura B.1: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190050. Sisgeo. Parte 1 de 2.



CALIBRATION REPORT

N. 1900804

Ch. A				
Rstd ⁽⁶⁾ [kPa]	Rmeas ⁽⁷⁾ [digit]	U [kPa]	Rcl ⁽³⁾	Rcp ⁽⁵⁾
0	8597.99	0.0728539	0.4555829	0.01208633
34	8077.076	0.07762609	33.86421	34.00817
68	7551.193	0.08254652	67.59152	67.9457
102	7018.453	0.0875902	101.7586	102.0356
136	6483.935	0.09273703	136.0397	136.0498
170	5949.229	0.09797076	170.3329	169.991
170	5949.289	0.09797076	170.329	169.9872
136	6484.727	0.09273703	135.9889	135.9994
102	7019.201	0.0875902	101.7106	101.9878
68	7551.809	0.08254652	67.55202	67.90614
34	8075.2	0.07762609	33.98453	34.12986
0	8598.977	0.0728539	0.392282	-0.0527477



LEGEND

- (1): Linear factors obtained by means of linear formula according to the least squares method.
- (2): The errors shows related to residual error on the calibration step applying linear/polynomical correction + Uncertainty.
- (3): Values calculated using linear correction.
- (4): Polynomial factors obtained by means of linear multiply regression formula.
- (5): Values calculated using polynomial correction.
- (6): Reference readings.
- (7): Instruments readings.

NOTES:

- a) % F.S. error is calculated on whole range.
- b) Resulting error depends on the effects of linearity and hysteresis.
- c) The errors reported into the charts are the results of the sum of each step error and the related measure uncertainty.

digit = Hz²/1000

WIRING: Red = VW; Black = VW; White = Thermistor; Green = Thermistor; Shield = Ground

Figura B.2: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190050. Sisgeo. Parte 2 de 2.

B.2. Piezómetro CV – P190051. Sisgeo

		CALIBRATION REPORT N. 1900805	
Serial Number: P190051			
Product Code:	0PK20A17000	Customer:	GEOSINERGIA
Model:	PIEZOMETER 170 kPa	Job Number:	19-00032
Type:	Vibrating Wire	Project Code:	
Calibration Date:	30/01/2019 14:44	Cable (m):	5
Test Conditions			
Temperature:	22 ± 0.5 °C	Humidity:	31 ± 10%
		Barometric Pressure:	982 ± 5 hPa
Calibration Method			
Calibration is made by direct comparison method using a calibration bench.			
Calibration is made at SISGEO laboratory. SISGEO S.r.l. is a Certified UNI EN ISO 9001 Company.			
Calibration procedures: IST 10/01*; IST 10/04*; IST 10/06*; IST 10/13*; IST 10/28* (*: in accordance to the instruments model)			
Calibration is made according to inclinometric, displacement, load and pressure conventions in reference to calibration equipment.			
Traceability is through first line standards, validated by certificates of calibration			
Pressure Indicator 154: GE Druck, CM1, UKAS 0055104			
Waveform Generator 157: Keysight Technologies, 33509B, LAT 046 353238			
Multimeter 171: Keysight Technologies, 3458A, LAT 046 358517			
- The measurement results reported in this Calibration Report were obtained following the calibration procedures and the reference samples of instruments written above. They relate only to the calibrated item and they are valid only for the time and conditions of calibration, unless otherwise specified.			
- The measurements uncertainties (U) stated in this document have been determined according to the ISO/IEC Guide 98 and to EA-4/02. Usually they have been estimated as expanded uncertainty obtained multiplying the standard uncertainty by the coverage k factor corresponding to a confidence level of about 95%. Usually the k factor is 2.			
- MPE: Maximum Permitted Error			
RESULTS			
Temperature Linear Factor:		kT = 0.2290746 [kPa/°C]	
Reading thermally compensated:		Rct = Rmeas + ΔT*kT	
Linear Sensitivity Factors: (1)		A = -6.7407E-02 [kPa/digit]	B = 5.8699E+02 [kPa]
Maximum Linear Error + U: (2)		0.1959 [%FS]	
MPE Lin. = 0.4 [%FS]			
Final Linear Reading: (3)		Rcl = A*Rmeas + B [kPa]	
Polynomial Sensitivity Factors: (4)		A = -1.3422E-10 [kPa/digit ²]	B = 2.7868E-06 [kPa/digit ²]
		C = -8.6412E-02 [kPa/digit]	D = 6.2956E+02 [kPa]
Maximum Polynomial Error + U: (2)		0.0897 [%FS]	
MPE Pol. = 0.25 [%FS]			
Final Polynomial Readings: (5)		Rcp = A*Rmeas ³ + B*Rmeas ² + C*Rmeas + D [kPa]	
CRITERIA	[Max Lin. Err.] + U < [MPE Lin.]		
	[Max Pol. Err.] + U < [MPE Pol.]		
	COMPLIANT		
	To the Datasheet		
Issue Date:	31.01.2019		
	CQE: <i>Renzo Biondi</i>		
SISGEO S.r.l. - Via F. Serpero 4/F1 - 20060 Masate - Milano (Italy) Tel +39-02-95764130 - Fax +39-02-95762011 - E-mail info@sisgeo.com - www.sisgeo.com Cap. Soc. 99.000 Euro i.v. - VAT n. IT10732420152 - Tribunale Milano. 333230 - REA Milano. 1413159			
Mod. 11141 Rev.2		Page 1 of 2	

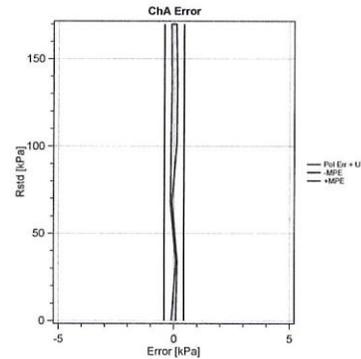
Figura B.3: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190051. Sisgeo. Parte 1 de 2.



CALIBRATION REPORT

N. 1900805

Ch. A				
Rstd ⁽⁶⁾ [kPa]	Rmeas ⁽⁷⁾ [digit]	U [kPa]	Rcl ⁽³⁾	Rcp ⁽⁴⁾
0	8704.308	0.07425831	0.2586325	0.02917628
34	8205.478	0.07894566	33.88338	33.98948
68	7701.062	0.08378863	67.88447	68.06875
102	7195.879	0.08876176	101.9373	102.0397
136	6689.933	0.09384436	136.0415	136.0054
170	6184.032	0.09901958	170.1427	170.0157
170	6184.273	0.09901958	170.1264	169.9995
136	6690.683	0.09384436	135.9909	135.955
102	7196.984	0.08876176	101.8628	101.9655
68	7702.074	0.08378863	67.81625	68.00057
34	8206.236	0.07894566	33.83229	33.9381
0	8704.838	0.07425831	0.2231069	-0.007078408



LEGEND

- (1): Linear factors obtained by means of linear formula according to the least squares method.
- (2): The errors shows related to residual error on the calibration step applying linear/polynomial correction + Uncertainty.
- (3): Values calculated using linear correction.
- (4): Polynomial factors obtained by means of linear multiply regression formula.
- (5): Values calculated using polynomial correction.
- (6): Reference readings.
- (7): Instruments readings.

NOTES:

- a) % F.S. error is calculated on whole range.
- b) Resulting error depends on the effects of linearity and hysteresis.
- c) The errors reported into the charts are the results of the sum of each step error and the related measure uncertainty.

digit = Hz²/1000

WIRING: Red = VV; Black = VV; White = Thermistor; Green = Thermistor; Shield = Ground

SISGEO S.r.l. - Via F. Serpero 4/F1 - 20060 Mesate - Milano (Italy) Tel +39-02-95764130 - Fax +39-02-95762011 - E-mail info@sisgeo.com - www.sisgeo.com
 Cap. Soc. 99.000 Euro i.v. - VAT n. IT10732420152 - Tribunale Milano. 333230 - REA Milano. 1413159

Mod. 11141 Rev.2

Page 2 of 2

Figura B.4: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190051. Sisgeo. Parte 2 de 2.

B.3. Piezómetro CV – P190052. Sisgeo

		CALIBRATION REPORT N. 1900806	
Serial Number: P190052			
Product Code:	OPK20A17000	Customer:	GEOSINERGIA
Model:	PIEZOMETER 170 kPa	Job Number:	19-00032
Type:	Vibrating Wire	Project Code:	
Calibration Date:	30/01/2019 14:44	Cable (m):	5
Test Conditions			
Temperature:	22 ± 0.5 °C	Humidity:	31 ± 10%
		Barometric Pressure:	982 ± 5 hPa
Calibration Method			
Calibration is made by direct comparison method using a calibration bench.			
Calibration is made at SISGEO laboratory. SISGEO S.r.l. is a Certified UNI EN ISO 9001 Company.			
Calibration procedures: IST 10/01*; IST 10/04*; IST 10/06*; IST 10/13*; IST 10/28* (*: in accordance to the instruments model)			
Calibration is made according to inclinometric, displacement, load and pressure conventions in reference to calibration equipment.			
Traceability is through first line standards, validated by certificates of calibration			
Pressure Indicator 154: GE Druck, CM1, UKAS 0055104			
Waveform Generator 157: Keysight Technologies, 33509B, LAT 046 353238			
Multimeter 171: Keysight Technologies, 3458A, LAT 046 358517			
- The measurement results reported in this Calibration Report were obtained following the calibration procedures and the reference samples of instruments written above. They relate only to the calibrated item and they are valid only for the time and conditions of calibration, unless otherwise specified.			
- The measurements uncertainties (U) stated in this document have been determined according to the ISO/IEC Guide 98 and to EA-4/02. Usually they have been estimated as expanded uncertainty obtained multiplying the standard uncertainty by the coverage k factor corresponding to a confidence level of about 95%. Usually the k factor is 2.			
- MPE: Maximum Permitted Error			
RESULTS			
Temperature Linear Factor:	kT = 0.2416137 [kPa/°C]		
Reading thermally compensated:	Rct = Rmeas + ΔT*kT		
Linear Sensitivity Factors: (1)	A= -6.4700E-02 [kPa/digit]	B= 5.3061E+02 [kPa]	
Maximum Linear Error + U: (2)	0.2136 [%FS]		
MPE Lin. = 0.4 [%FS]			
Final Linear Reading: (3)	Rcl = A*Rmeas + B [kPa]		
Polynomial Sensitivity Factors: (4)	A= 1.3919E-10 [kPa/digit ³]	B= -2.8569E-06 [kPa/digit ²]	C= -4.5349E-02 [kPa/digit]
Maximum Polynomial Error + U: (2)	0.1612 [%FS]		
MPE Pol. = 0.25 [%FS]			
Final Polynomial Readings: (5)	Rcp = A*Rmeas ³ + B*Rmeas ² + C*Rmeas + D [kPa]		
CRITERIA	Max Lin. Err. + U < MPE Lin.		COMPLIANT To the Datasheet
	Max Pol. Err. + U < MPE Pol.		
Issue Date:	31.01.2019		CQE: <i>Renzo Bruni</i>
<small>SISGEO S.r.l. - Via F. Serpero 4/F 1 - 20060 Masate - Milano (Italy) Tel. +39-02-95764130 - Fax +39-02-95762011 - E-mail: info@sisgeo.com - www.sisgeo.com Cap. Soc. 99.000 Euro i.v. - VAT n. IT10732420152 - Tribunale Milano: 333230 - REA Milano: 1413159</small>			
<small>Mod. 11141 Rev.2</small>			<small>Page 1 of 2</small>

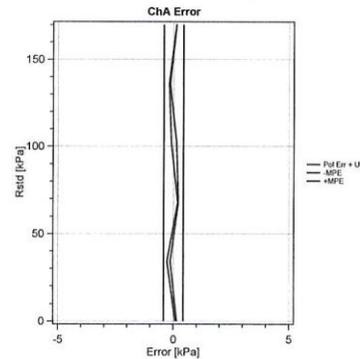
Figura B.5: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190052. Sisgeo. Parte 1 de 2.



CALIBRATION REPORT

N. 1900806

Ch. A				
Rstd ⁽⁶⁾ [kPa]	Rmeas ⁽⁷⁾ [digit]	U [kPa]	Rcl ⁽³⁾	Rcp ⁽⁴⁾
0	8202.419	0.07309344	-0.08726925	-0.008864684
34	7671.159	0.07785095	34.28524	34.19614
68	7150.734	0.08275801	67.95672	67.89395
102	6624.924	0.08778954	101.9766	102.011
136	6098.875	0.09292534	136.012	136.0935
170	5573.284	0.09814902	170.0177	169.9749
170	5573.384	0.09814902	170.0112	169.9685
136	6099.455	0.09292534	135.9744	136.056
102	6625.754	0.08778954	101.9229	101.9572
68	7151.116	0.08275801	67.93201	67.86918
34	7673.332	0.07785095	34.14465	34.05575
0	8203.329	0.07309344	-0.1461462	-0.06721532



LEGEND

- (1): Linear factors obtained by means of linear formula according to the least squares method.
- (2): The errors shows related to residual error on the calibration step applying linear/polynomial correction + Uncertainty.
- (3): Values calculated using linear correction.
- (4): Polynomial factors obtained by means of linear multiply regression formula.
- (5): Values calculated using polynomial correction.
- (6): Reference readings.
- (7): Instruments readings.

NOTES:

- a) % F.S. error is calculated on whole range.
- b) Resulting error depends on the effects of linearity and hysteresis.
- c) The errors reported into the charts are the results of the sum of each step error and the related measure uncertainty.

digit = Hz²/1000

WIRING: Red = VV; Black = VV; White = Thermistor; Green = Thermistor; Shield = Ground

SISGEO S.r.l. - Via F. Serpero 4/F1 - 20060 Masate - Milano (Italy) Tel +39-02-95764130 - Fax +39-02-95762011 - E-mail info@sisgeo.com - www.sisgeo.com
Cap. Soc. 99.000 Euro i.v. - VAT n. IT10732420152 - Tribunale Milano: 333230 - REA Milano: 1413159

Mod. 11141 Rev.2

Page 2 of 2

Figura B.6: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P190052. Siggeo. Parte 2 de 2.

B.4. Piezómetro CV – P180263. Sisgeo



CALIBRATION REPORT

Model: Piezometer	0PK20SE1000	Serial/Number: P180263
Type: Vibrating Wire		Serial/Number: 03-4417-68
Customer: GEOSINERGIA		Job number: 18-00083
Cable Length: 15 m		Date: 09/02/2018

Test conditions:

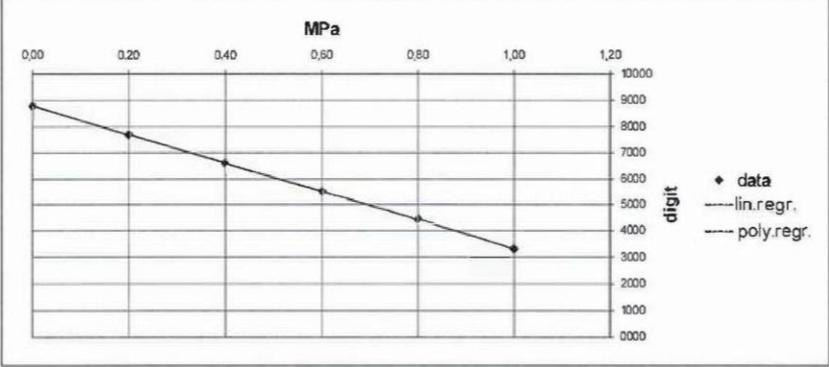
Power supply [Vdc]: 0
Temperature [°C]: 22
Humidity [%]: 33
Atmospheric pressure [mbar]: 990

Calibration has been made according to the Quality Assurance System UNI EN ISO 9001:2008 - IST. 10/01
Metrological chain

Main: Druck Digital Pressure Indicator mod. DPI 515 s/n S1500575, Yokogawa Calibrator mod. 7651 s/n S1VVK0176,
Hameg Function generator mod. HM8030-S s/n 54710037, HBM Calibrator mod. K307 s/n 34200
Secondary: Sisgeo Read out unit s/n 087

measures uncertainty: ± 0,07 kPa / 6E-04 Hz

pressure MPa	readings [digit]		statistics		
	up	down	avg.[digit]	lin.[MPa]	polyn.[MPa]
0,00	8771	8770	8770	0,00	0,00
0,20	7694	7695	7694	0,20	0,20
0,40	6610	6611	6610	0,40	0,40
0,60	5517	5518	5517	0,60	0,60
0,80	4416	4417	4417	0,80	0,80
1,00	3311	3311	3311	1,00	1,00



RESULTS			
Linear sensitivity factor		S	max.err.
		[digit/MPa]	%F.S.
		-5460,33326	0,25043
Polynomial sensitivity factors	A	B	C
[MPa] = A[digit] ² + B[digit] + C	[MPa/digit ²]	[MPa/digit]	[MPa]
	-5,841E-10	-1,761E-04	1,589E+00
			0,03449

NOTES: Resulting error depends on the effects of linearity and hysteresis.
With "Multilogger" software the linear factor S has to be inserted reverted (1/S)
digit = Hzx10⁻³
Temperature coefficient K = 0,000044 MPa/°C

Wiring: red=coil; black=coil; white=thermistor; green=thermistor

Quality Assurance Manager: *Roberta Puppo* Production chief: *M. S. S.*

SISGEO S.r.l. Via F. Serpero 4/FI - 20060 Masate - Milano (Italy) Tel.+39-02-95784130 - Fax +39-02-95762011 - E-mail: info@sisgeo.com - http://www.sisgeo.com

Figura B.7: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P180263. Sisgeo.

B.5. Piezómetro CV – P171023. Sisgeo

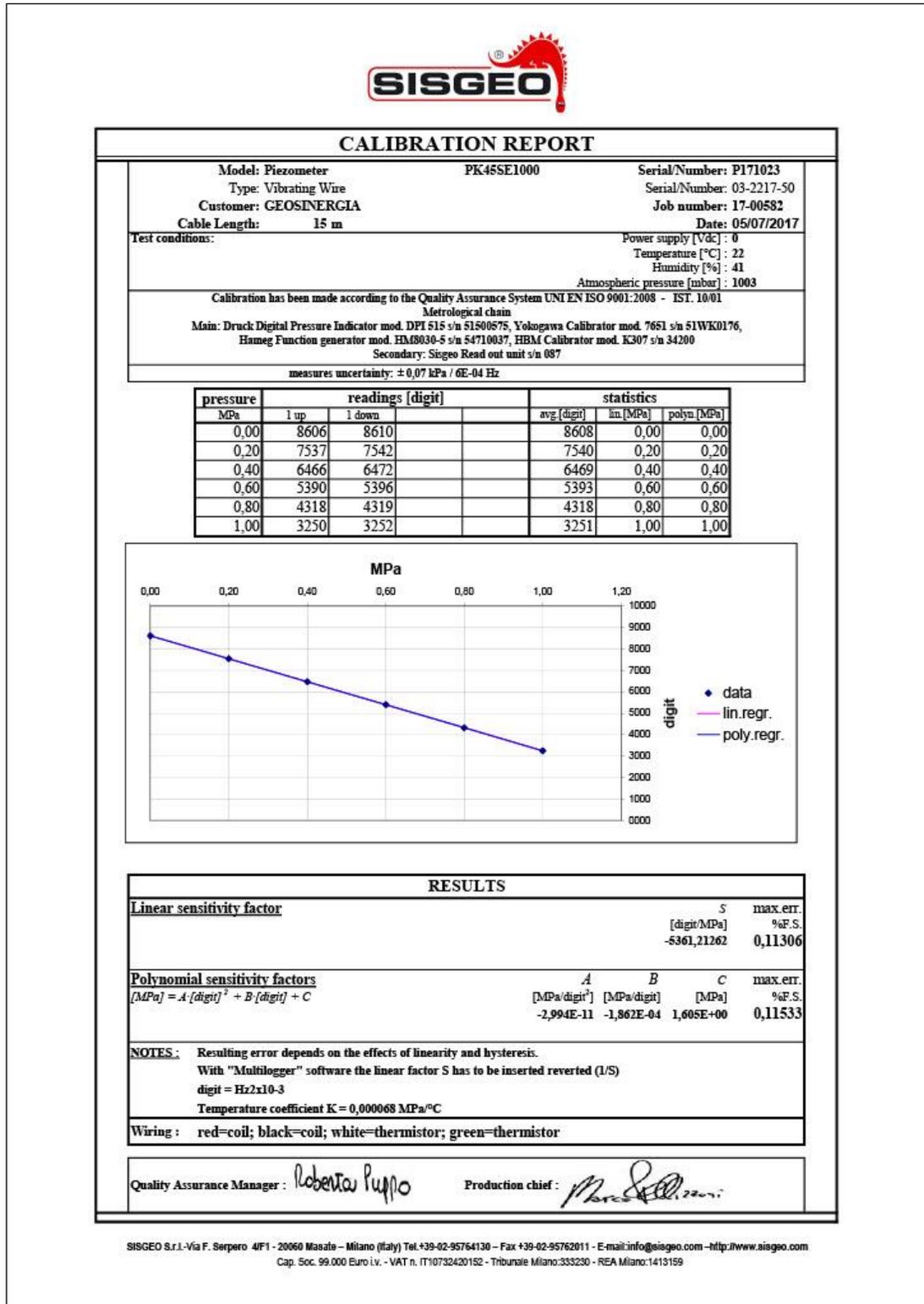


Figura B.8: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P171023. Sisgeo.

B.6. Piezómetro CV – P349983. Geosense



GEOSENSE QUALITY FORM
 FORM No G/QF/149
 ISS: 8
 DATE: Dec-18
 SIG: GC

VENTED VW PIEZOMETER LAE CALIBRATION

Model	VWP-3310	Cal date	25/02/2019	SN.	8233
Serial	349983	Baro	1024.0	Readout No.	2108
Works ID	GV 13 5	Temp °C	20	R/O Cal. date	09/05/2018

Applied pressure		Readings [digit]			Calculated Pressure		Error% fso	
psi	kPa	1st Cycle	2nd Cycle	avg[digit]	lin.[kPa]	polyn.[kPa]	linear	polynomial
0.000	0.000	9497.6	9497.1	9497.3	-16.78	-1.17	-0.32%	-0.02%
150.109	1035.000	8744.8	8744.1	8744.5	1039.28	1036.05	0.08%	0.02%
300.218	2070.000	7999.4	7998.8	7999.1	2084.84	2072.45	0.29%	0.05%
450.326	3105.000	7264.7	7264.2	7264.4	3115.38	3103.24	0.20%	-0.03%
600.435	4140.000	6533.7	6533.4	6533.5	4140.61	4137.84	0.01%	-0.04%
750.544	5175.000	5806.1	5806.1	5806.1	5161.00	5176.59	-0.27%	0.03%

Calibration of Fluke Pressure Controller PPC4EX S/N: 8233 valid from 23rd March 2018. Certificate of Calibration No 47934, Chamois Metrology UKAS No 0822

CALIBRATION FACTORS

Linear factor (k)		
kPa per digit -1.402735906	psi per digit -0.203442	mH ₂ O per digit -0.143039
Polynomial factors		
kPa	psi	mH ₂ O
A 8.51671E-06	1.2352E-06	8.6846E-07
B -1.533065697	-0.222345	-0.156329
C		
Thermal factor (T)		
kPa per °C -3.539914879	psiper °C -0.513403173	mH ₂ O per °C -0.360971

Note: Digits are Hz² x 10⁻³ units.
(please consult the User Manuals for conversion of alternative reading units)

Polynomial calculation [kPa] = A * (Reading)² + B * (Reading) + C + T * (Current Temp - Site Zero Temp)
C = -A*(Site Zero Reading²) - B*(Site Zero Reading)

Linear calc = k (kPa) * (Current Reading - Site Zero Reading) + T * (Current Temp - Site Zero Temp)



THIS CERTIFICATE IS VALID ONLY WHEN CARRYING THE OFFICIAL ORIGINAL STAMP OF GEOSENSE BELOW

Nova House, Rougham Industrial Estate, Rougham, Bury St Edmunds, Suffolk IP30 9ND, England
www.geosense.co.uk e sales@geosense.co.uk t +44(0)1359 270457

Figura B.9: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P349983. Geosense.

B.7. Piezómetro CV – P571501. ACE

Calibration Sheet

VW Piezometer

- Model : 1500US
- Serial No. : 571501
- Range : 7kg/cm² (99.4psi)
- Temp. Device : Thermistor (3kΩ @25°C)
- Baro. Pressure :1006mb

- Cal. Date : 2019.08.06
- Cal. Temp : 27°C
- Readout : ACE-1000
- Cable Length : 100m

Pressure (kg/cm ²)	Reading		Error (% FSR)
	Hz	10 ³ Hz ²	
0.0	2510.0	6300.1	0.056
1.4	2415.2	5833.2	-0.094
2.8	2314.5	5356.9	0.025
4.2	2209.4	4881.4	-0.038
5.6	2096.9	4397.0	0.100
7.0	1978.5	3914.5	-0.048

■ **Pressure(kg/cm²) = A × Hz² + B × Hz + C -Tct x (Tc - Ti) -Bcb x (Bc - Bi)**

● ABC Factor : Measuring [Hz]

A Factor	:	-0.0000034371
B Factor	:	0.0022709408
C Factor	:	15.9580310235

■ **Pressure(kg/cm²)= Gage Factor x (Current Reading - Zero Reading) -Tct x (Tc - Ti) -Bcb x (Bc - Bi)**

● Gage Factor : Measuring [10³Hz²]

Gage Factor	:	-0.00293
Zero Reading	:	6307.58

Tct : Thermal. Coefficient, Tc : Current Temperature, Ti : Initial Temperature
Bcb : Baro. Coefficient, Bc : Current Baro. Pressure, Bi : Initial Baro. Pressure

● Thermal Coefficient(kg/cm²/°C) : -0.012503

[Cable Connection]

Frequency - Red, Black	Temperature - Green, White
------------------------	----------------------------

■ The gage factor and zero reading of this calibration sheet are calculated using a linear regression analysis method.
■ If any factor(overload, temperature, humidity etc.) that affects to the precision, accuracy of measuring instrument, it is useless.

Calibrated By : B. W. Nam /

9, Dangjeong-ro 27beon-gil,
Gunpo-si, Gyeonggi-do,
(15850) Korea

Phone : 82-31-459-8753/7
Fax : 82-31-459-8758
E-mail : acens@naver.com
Web : www.aceinstrument.com

ACE INSTRUMENT CO., LTD.
The first value in Geotechnical
& Structure Instrumentation

Figura B.10: Hoja de calibración piezómetro de cuerda vibrante (CV) P571501. ACE.