
Modelo 4800

Celdas de presión de suelos

Manual de instrucciones



DECLARACIÓN DE GARANTÍA

GEOKON garantiza que sus productos estarán libres de defectos en sus materiales y su mano de obra, bajo uso y funcionamiento normal, durante un período de 13 meses a partir de la fecha de compra. Si la unidad no funciona correctamente, debe ser devuelta a la fábrica para su evaluación, con el flete pagado. Una vez que sea examinada por GEOKON, si se determina que la unidad está defectuosa, se reparará o reemplazará sin cargos. Sin embargo, la **GARANTÍA SE INVALIDA** si la unidad muestra evidencias de haber sido manipulada o de haber sido dañada como resultado de corrosión o corriente, calor, humedad o vibración excesivos, especificaciones incorrectas, mala aplicación, mal uso u otras condiciones de funcionamiento fuera del control de GEOKON. Los componentes que se desgastan o dañan por el uso incorrecto no tienen garantía. Esto incluye los fusibles y las baterías.

GEOKON fabrica instrumentos científicos cuyo uso indebido es potencialmente peligroso. Los instrumentos están diseñados para ser instalados y utilizados solo por personal calificado. No hay garantías, excepto las que se indican en este documento. No existe ninguna otra garantía, expresa o implícita, incluyendo, sin limitación a, las garantías de comercialización implicadas o de adecuación para un propósito en particular. GEOKON no se hace responsable por cualquier daño o pérdida causada a otros equipos, ya sea directo, indirecto, incidental, especial o consecuente que el comprador pueda experimentar como resultado de la instalación o uso del producto. La única compensación para el comprador por cualquier incumplimiento de este acuerdo por parte de GEOKON o cualquier incumplimiento de cualquier garantía por parte de GEOKON no excederá el precio de compra pagado por el comprador a GEOKON por la unidad o las unidades, o el equipo directamente afectado por tal incumplimiento. Bajo ninguna circunstancia, GEOKON reembolsará al reclamante por pérdidas incurridas al retirar y/o volver a instalar el equipo.

Se tomaron todas las precauciones para garantizar la exactitud en la preparación de los manuales y/o el software; sin embargo, GEOKON no asume responsabilidad alguna por omisiones o errores que puedan surgir ni asume responsabilidad por daños o pérdidas que resulten del uso de los productos de acuerdo con la información contenida en el manual o software.

No se puede reproducir ninguna porción de este manual de instrucciones, por ningún medio, sin el consentimiento por escrito de geokon. La información contenida en este documento se considera precisa y confiable. Sin embargo, GEOKON no asume responsabilidad alguna por errores, omisiones o malas interpretaciones. La información en este documento está sujeta a cambios sin aviso previo.

El logotipo y el nombre comercial GEOKON® son marcas comerciales registradas en la Oficina de Patentes y Marcas Registradas de los Estados Unidos.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 TEORÍA DE FUNCIONAMIENTO	1
1.2 DISEÑO DE LAS CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS	2
1.3 CONSTRUCCIÓN DE LAS CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS	3
1.3.1 CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS MODELO 4800	3
1.3.2 CELDAS DE PRESIÓN DE CONTACTO ("FAT BACK") MODELO 4810	4
1.3.3 CELDA DE CARGA HIDRÁULICA MODELO 4815	4
1.3.4 CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS "JACKOUT" MODELO 4820	5
1.3.5 CELDAS DE PRESIÓN DEL SUELO PUSH-IN MODELO 4830	5
2. INSTALACIÓN	7
2.1 PRUEBAS PRELIMINARES	7
2.2 INSTALACIÓN DE LA CELDA DE PRESIÓN	7
2.2.1 INSTALACIÓN DE LAS CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS MODELO 4800 EN EL INTERIOR DE RELLENOS Y TERRAPLENES	7
2.2.2 INSTALACIÓN DE CELDAS DE PRESIÓN DE CONTACTO ("FAT BACK") MODELO 4810	9
2.2.3 INSTALACIÓN DE LA CELDA DE CARGA HIDRÁULICA MODELO 4815	11
2.2.4 INSTALACIÓN DE CELDAS DE PRESIÓN "JACKOUT" MODELO 4820 EN ZANJAS PANTALLA	11
2.2.5 INSTALACIÓN DE CELDAS PARA MEDIR LA PRESIÓN DEL SUELO EN LA BASE DE ZAPATAS, LOSAS, PAVIMENTOS, ETC.	12
2.2.6 INSTALACIÓN DE CELDAS DE PRESIÓN PUSH-IN PARA MEDIR PRESIONES DE SUELOS LATERALES	13
2.3 INSTALACIÓN Y EMPALME DE CABLES	14
2.4 RUIDO ELÉCTRICO	15
2.5 LECTURAS INICIALES	15
3. TOMA DE LECTURAS	16
3.1 GK-404 CONSOLA DE LECTURA DE CUERDA VIBRANTE	16
3.1.1 OPERACIÓN DE LA GK-404	16
3.2 GK-405 CONSOLA DE LECTURA DE CUERDA VIBRANTE	17
3.2.1 CONECTAR SENSORES CON CONECTORES DE PASO ADJUNTOS DE 10 PUNTOS	17
3.2.2 CONECTAR SENSORES CON CONDUCTORES DESCUBIERTOS	17
3.2.3 OPERACIÓN DE LA GK-405	17
3.3 MEDICIÓN DE TEMPERATURAS	17
4. REDUCCIÓN DE DATOS	19
4.1 CÁLCULO DE LA PRESIÓN	19
4.2 CORRECCIÓN DE LA TEMPERATURA	19

4.3 CORRECCIÓN BAROMÉTRICA	20
5. SOLUCIÓN DE PROBLEMAS	22
APÉNDICE A. ESPECIFICACIONES	23
A.1 CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS	23
A.2 TERMISTOR DE TEMPERATURA ESTÁNDAR	23
APÉNDICE B. DERIVACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL TERMISTOR	24
APÉNDICE C. EFECTOS DE LA TEMPERATURA DE LA PRESIÓN DEL SUELO Y CÉLULAS DE TENSIÓN	25
C.1 FORMULAS	25
C.2 EJEMPLOS	27
APÉNDICE D. NO LINEALIDAD Y USO DE UN POLINOMIO DE SEGUNDO ORDEN PARA MEJORAR LA EXACTITUD DE LA PRESIÓN CALCULADA	28

FIGURAS

FIGURA 1: REDISTRIBUCIÓN DE LA TENSIÓN, SUELO DÉBIL / CELDAS RÍGIDAS	 1
FIGURA 2: REDISTRIBUCIÓN DE LA TENSIÓN, SUELO FUERTE / CELDAS RÍGIDAS	.. 2
FIGURA 3: REDISTRIBUCIÓN DE LA TENSIÓN, SUELO RÍGIDO / CELDAS DÉBILES	... 2
FIGURA 4: CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS RECTANGULAR MODELO 4800	 3
FIGURA 5: CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS CIRCULAR MODELO 4800	 4
FIGURA 6: CELDAS DE PRESIÓN DE CONTACTO MODELO 4810	 4
FIGURA 7: CELDA DE CARGA HIDRÁULICA MODELO 4815	 5
FIGURA 8: CELDAS DE PRESIÓN JACKOUT MODELO 4820	 5
FIGURA 9: CELDAS DE PRESIÓN PUSH-IN MODELO 4830	 6
FIGURA 10: INSTALACIÓN DE LA CELDA DE PRESIÓN MODELO 4800	 8
FIGURA 11: FIJACIÓN DEL MODELO 4810 AL DE CONCRETO	 10
FIGURA 12: INSTALACIÓN DE LA CELDA DE PRESIÓN MODELO 4810	 10
FIGURA 13: MODELO 4815 MIDIENDO CARGAS EN EL REVESTIMIENTO DE UN TÚNEL	 11
FIGURA 14: INSTALACIÓN DE LA CELDA DE PRESIÓN JACKOUT MODELO 4820	... 12
FIGURA 15: INSTALACIÓN DE LA CELDA DE PRESIÓN MODELO 4800-1-1P	 13
FIGURA 16: CONSOLA DE LECTURA GK-404	 16
FIGURA 17: CONECTOR LEMO A GK-404	 16
FIGURA 18: CONSOLA DE LECTURA GK-405	 17
FIGURA 19: MUESTRA DE HOJA DE CALIBRACIÓN	 21
FIGURA 20: RADIO (R) Y GROSOR (D)	 25

TABLAS

TABLA 1: PROPORCIONES PARA DOS MEZCLAS DE LECHADA..... 9

TABLA 2: TABLA DE CABLEADO DEL 4830..... 14

TABLA 3: FACTORES DE MULTIPLICACIÓN PARA UNIDADES DE INGENIERÍA 19

TABLA 4: ESPECIFICACIONES..... 23

TABLA 5: RESISTENCIA DE TERMISTOR DE 3KΩ 24

TABLA 6: VALORES TÍPICOS DE VARIOS PARÁMETROS DE CELDA 26

ECUACIONES

ECUACIÓN 1: PRINCIPIO DE ESTRÉS EFECTIVO DE TERZAGHI.....	1
ECUACIÓN 2: CÁLCULO DE DÍGITOS.....	19
ECUACIÓN 3: CONVERTIR DÍGITOS A PRESIÓN	19
ECUACIÓN 4: CORRECCIÓN DE TEMPERATURA SOLO PARA EL TRANSDUCTOR...	20
ECUACIÓN 5: RESISTENCIA DE TERMISTOR DE $3K\Omega$	24
ECUACIÓN 6: EXPANSIÓN DEL LÍQUIDO PARA UN AUMENTO DE TEMPERATURA DE 1 °C.....	25
ECUACIÓN 7: COMPRESIÓN DE LÍQUIDO.....	25
ECUACIÓN 8: EXPANSIÓN DEL LÍQUIDO.....	25
ECUACIÓN 9: DEFORMACIÓN EN EL CENTRO	25
ECUACIÓN 10: DEFORMACIÓN EN EL BORDE.....	25
ECUACIÓN 11: DIFERENCIA DE DEFORMACIÓN	26
ECUACIÓN 12: EXPANSIÓN TOTAL PROMEDIO DE LA CELDA.....	26
ECUACIÓN 13: ECUACIONES COMBINADAS.....	26
ECUACIÓN 14: INCRUSTACIÓN TOTAL.....	26
ECUACIÓN 15: INCRUSTACIÓN TOTAL PARA LAS CELDAS DE PRESIÓN DE CONTACTO.....	26
ECUACIÓN 16: CÁLCULO DE PRESIÓN CON POLINOMIO DE SEGUNDO ORDEN...	28
ECUACIÓN 17: "LINEALIDAD (%F.S.)" EN HOJA DE CALIBRACIÓN.....	28
ECUACIÓN 18: CÁLCULO DE C UTILIZANDO LA LECTURA DE PRESIÓN CERO DE LA HOJA DE CALIBRACIÓN	28

1. INTRODUCCIÓN

1.1 TEORÍA DE FUNCIONAMIENTO

Las celdas de presión de suelos, a veces llamadas celdas de presión total o celdas de tensión total, están diseñadas para medir las tensiones en el suelo o la presión del suelo sobre las estructuras. Las celdas responderán no solo a las presiones de suelos, sino también a las presiones del agua subterránea o la presión del agua intersticial, de ahí el término presión total o tensión total. Es necesaria una medición simultánea de la presión del agua intersticial (μ), utilizando un piezómetro, para separar la tensión efectiva (σ') de la tensión total (σ) según lo define el principio de tensión efectiva de Terzaghi:

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

ECUACIÓN 1: Principio de estrés efectivo de Terzaghi

Estos parámetros, junto con las características de resistencia del suelo, determinarán el comportamiento del suelo bajo cargas.

Las celdas de presión de suelos del tipo descrito aquí son del tipo hidráulico: dos placas planas soldadas entre sí en su periferia y separadas por un pequeño espacio lleno de fluido hidráulico. La presión de la tierra actúa para comprimir las dos placas juntas, creando así una presión dentro del fluido. Si las placas son lo suficientemente flexibles (es decir, si son lo suficientemente delgadas en relación con su extensión lateral), entonces en el centro de la placa el efecto de soporte de la periferia soldada es insignificante, y se puede afirmar que en el centro de la celda la presión externa del suelo está exactamente equilibrada por la presión interna del fluido.

Esto es cierto solo si la flexión de las placas se mantiene al mínimo y, por lo tanto, es importante que la celda sea rígida. Esto, en un sentido práctico, significa que el fluido dentro de la celda debe ser lo más incompresible posible y que el transductor de presión requerido para medir la presión del fluido también debe ser rígido con muy poco cambio de volumen bajo presión creciente.

Las pruebas realizadas por investigadores (Dunncliff, 1988) han demostrado que la introducción de una celda de tensión plana en una masa de suelo alterará el campo de tensión de una manera que depende de la rigidez relativa de la celda, con respecto al suelo, y también con respecto a la relación de aspecto de la celda, es decir, la relación entre el ancho de la celda y su grosor. Una celda gruesa alterará la tensión más que una celda delgada. Por estas razones, lo mejor es una celda delgada y rígida, y los estudios han demostrado que una relación de aspecto de al menos 20 a 1 es lo mejor.

Idealmente, la celda debería ser tan rígida (compresible) como el suelo, pero en la práctica esto es difícil de lograr. Si la celda es más rígida (menos compresible) que el suelo, entonces registrará en exceso la presión del suelo debido a una zona de suelo inmediatamente alrededor de la celda que está "protegida" por la celda y por lo tanto no experimenta la presión total del suelo. Esto se puede representar esquemáticamente como se muestra en la Figura 1.

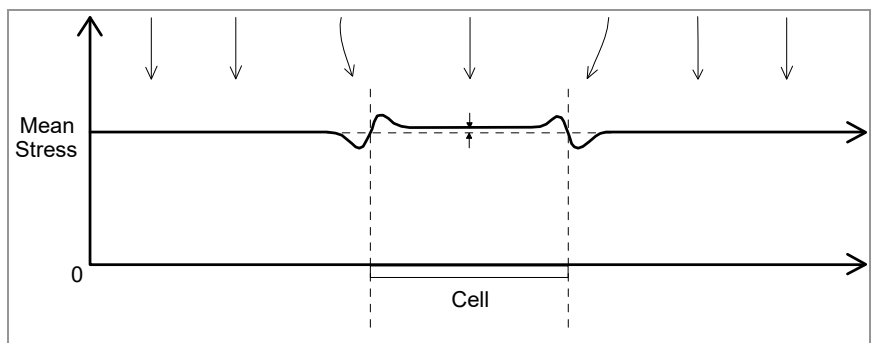


FIGURA 1: Redistribución de la tensión, suelo débil con celdas rígidas

Como puede verse, hay una concentración de tensión en el borde rígido, pero en el centro de la celda la tensión del suelo es solo ligeramente más alta que la tensión media del suelo, es decir, solo un poco más alta que la tensión que se obtendría si la celda no estuviera presente.

En un suelo más fuerte, la zona sin tensión alrededor del borde de la celda es más extensa; por lo tanto, el grado de registro excesivo de la tensión media es mayor en el centro de la celda. Esto se representa esquemáticamente en la Figura 2.

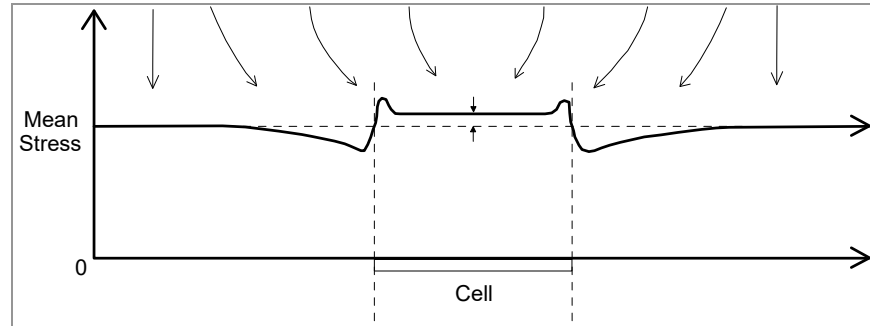


FIGURA 2: Redistribución de la tensión, suelo fuerte con celdas rígidas

En un suelo rígido, la celda puede ser menos rígida (más comprimible) que el suelo, en cuyo caso la celda registrará de forma insuficiente la tensión media del suelo, ya que las tensiones en el suelo tienden a "tender un puente" alrededor de la celda. Esto se representa esquemáticamente en la Figura 3.

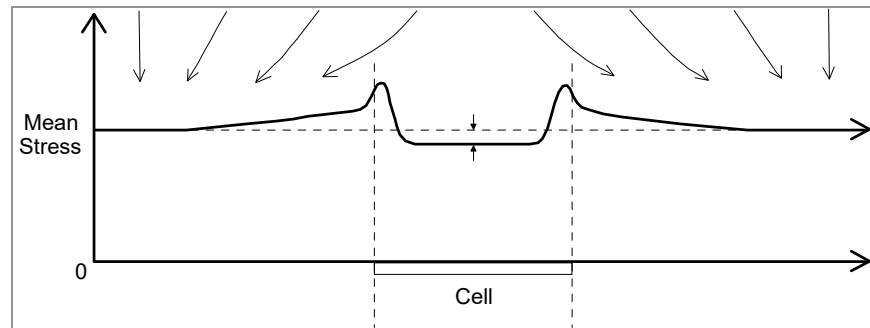


FIGURA 3: Redistribución de la tensión, suelo rígido con celdas débiles

Las pruebas realizadas en la Universidad de Ohio (Ohio, EE. UU.) con varios tipos de suelos diferentes han demostrado que para las celdas GEOKON el grado máximo de registro excesivo o insuficiente equivale al 15% de la tensión media del suelo.

Deben tenerse en cuenta otros factores. La variabilidad inherente de las propiedades del suelo, que dan lugar a diversas tensiones del suelo en diferentes ubicaciones, y la correspondiente dificultad para obtener una buena muestra de la tensión media de un número limitado de ubicaciones de celdas. Además, la respuesta de la celda a su entorno inmediato depende principalmente de qué tan cerca la masa de suelo inmediatamente alrededor de la celda tenga la misma rigidez o compresibilidad o el mismo grado de compactación que la masa de suelo no perturbada. Los métodos de instalación deberán prestar especial atención a este detalle.

1.2 DISEÑO DE LAS CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS

Las celdas de presión de suelos están construidas a partir de dos placas de acero inoxidable soldadas entre sí alrededor de la periferia para dejar un espacio estrecho entre ellas. Este espacio está lleno de aceite hidráulico sin aire, que está conectado hidráulicamente a un transductor de presión. El transductor de presión convierte la

presión del aceite en una señal eléctrica, que se transmite a través de un cable de señal a la ubicación de lectura.

En general, las celdas de presión de suelos GEOKON utilizan una construcción completamente soldada; esto significa que el espacio que confina el aceite es completamente metálico y no requiere juntas tóricas (o-ring), que tienden a atrapar aire y reducir la rigidez de la celda. El aire se elimina del aceite con un desaireador Nold DeAerator*, que mejora sustancialmente la rigidez del fluido y el rendimiento de la celda. El transductor de presión que se emplea normalmente es el GEOKON modelo 4500H, que está disponible en varios rangos de presión diferentes (consulte el Apéndice A.1). El cable se conecta al transductor de manera sellada e impermeable. Para las celdas de presión del suelo ubicadas dentro de una masa de suelo, el cable puede estar blindado y provisto de un alivio de tensión en la celda para reducir la probabilidad de que se salga.

Dentro de la carcasa del transductor de presión de cuerda vibrante, hay un termistor para medir la temperatura en la ubicación de la celda. Además, un supresor de sobretensiones de plasma tripolar dentro de la carcasa del transductor protege el arranque y las bobinas de lectura de la cuerda vibrante de los transitorios eléctricos, como los que pueden ser inducidos por la caída de rayos directos o indirectos.

También se encuentran disponibles transductores de presión alternativos con salida de voltaje (0-100 mV, 0-5 VCC, 0-10 VCC) o corriente (4-20 mA) para la capacidad de lectura dinámica. Consulte con la fábrica para obtener más detalles.

1.3 CONSTRUCCIÓN DE LAS CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS

1.3.1 CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS MODELO 4800

Las celdas de presión de suelos modelo 4800 pueden tener una forma rectangular o circular. El tamaño estándar para el modelo 4800 rectangular es 150 mm x 250 mm (6" x 10"), para el circular es de 230 mm (9") de diámetro. El grosor estándar para ambos estilos es de 6 mm (relación de aspecto ~ 40). Para pruebas de laboratorio, se pueden fabricar celdas más pequeñas y delgadas. Contacte a la fábrica para obtener más detalles.

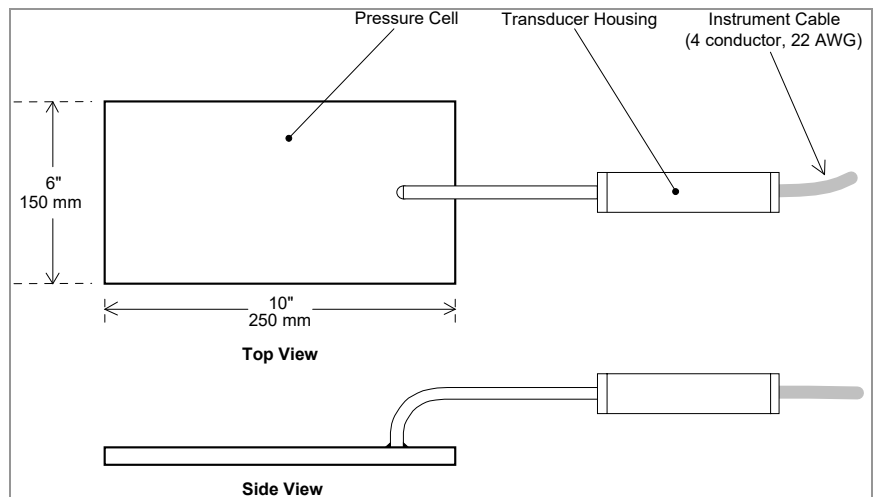


FIGURA 4: Celdas de presión de suelos rectangular modelo 4800

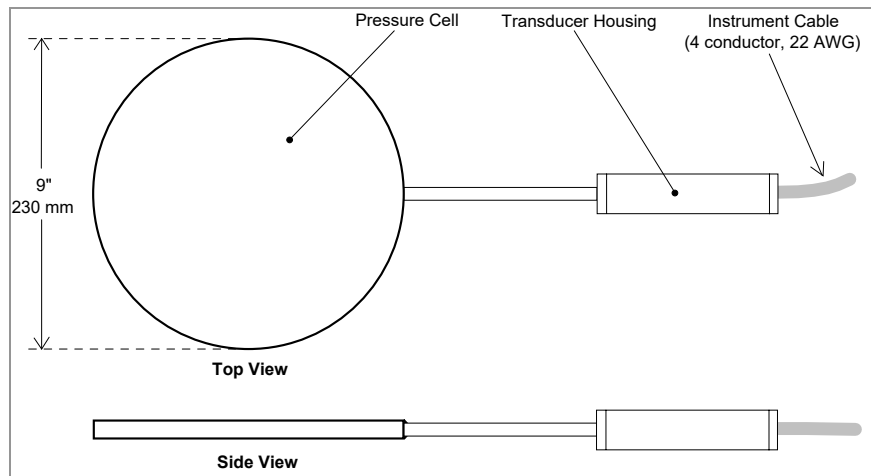


FIGURA 5: Celdas de presión de suelos circular modelo 4800

1.3.2 CELDAS DE PRESIÓN DE CONTACTO ("FAT BACK") MODELO 4810

Las celdas de presión de suelos modelo 4810 están diseñadas para medir las presiones de suelos en estructuras. Una de las placas es gruesa y está diseñada para apoyarse contra la superficie externa de la estructura de una manera que evitará la flexión de la celda. La otra placa es delgada y reacciona a la presión del suelo.

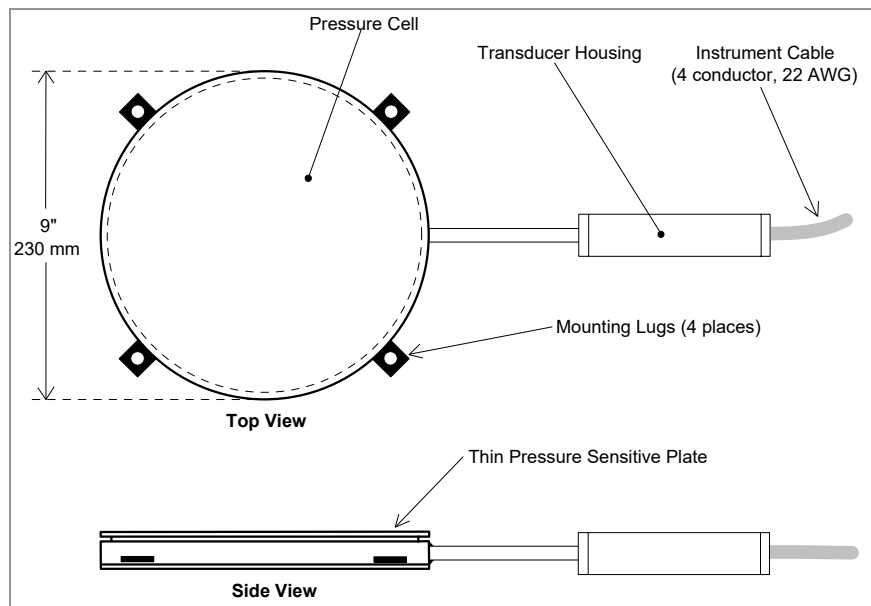


FIGURA 6: Celdas de presión de contacto modelo 4810

1.3.3 CELDA DE CARGA HIDRÁULICA MODELO 4815

La celda de carga hidráulica modelo 4815 se ha utilizado para la medición de cargas en pilotes y de cargas concentradas en revestimientos de túneles. La carcasa del transductor de presión está conectada directamente y perpendicular a la placa gruesa posterior.

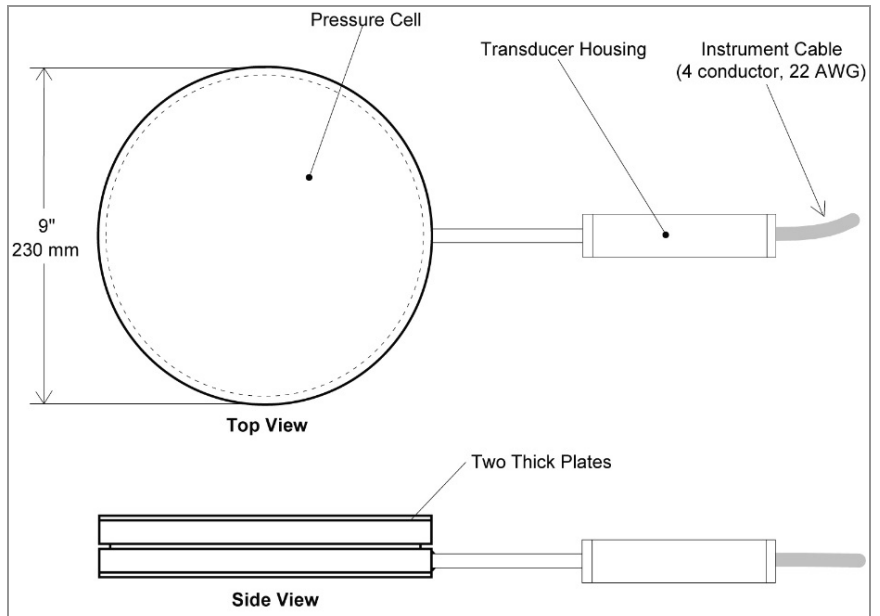


FIGURA 7: Celda de carga hidráulica modelo 4815

1.3.4 CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS "JACKOUT" MODELO 4820

Las celdas de presión de suelos modelo 4820 están diseñadas específicamente para medir las presiones de suelos en la parte posterior de muros pantallas. La carcasa del transductor de presión está conectada directamente y perpendicular a la placa gruesa posterior.

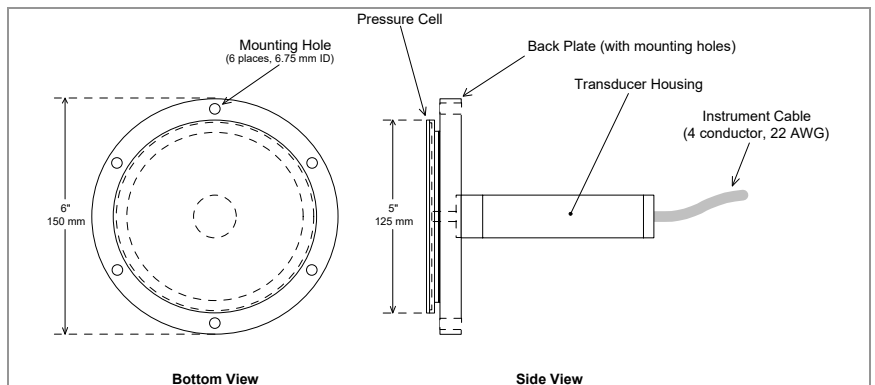


FIGURA 8: Celdas de presión Jackout modelo 4820

1.3.5 CELDAS DE PRESIÓN DEL SUELO PUSH-IN MODELO 4830

Las celdas de presión Push-In modelo 4830 están diseñadas para colocarse en su lugar para la medición de presiones totales en suelos y rellenos de tierra. El transductor de presión semiconductor permite la medición de presiones dinámicas. Se proporciona una rosca en el extremo de la celda para permitir la instalación utilizando tramos de tubería o varillas de perforación.

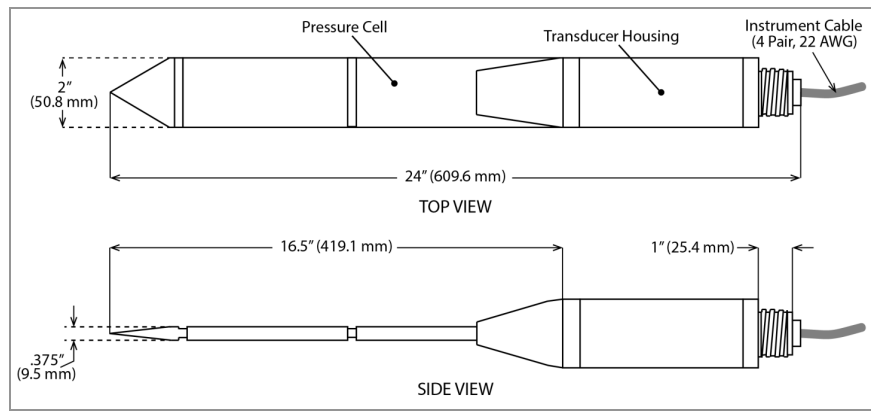


FIGURA 9: Celdas de presión Push-In modelo 4830

2. INSTALACIÓN

2.1 PRUEBAS PRELIMINARES

Siempre es aconsejable, antes de que comience la instalación, verificar que las celdas funcionen correctamente. Cada celda se suministra con una hoja de calibración, que muestra la relación entre los dígitos de lectura y la presión, así como la lectura inicial de cero sin carga. (La Figura en la Sección 4 muestra una hoja de calibración típica). Los cables eléctricos de la celda (generalmente los cables rojo y negro) están conectados a una caja de lectura (vea la Sección 3) y la lectura cero dada en la hoja de calibración se compara con la lectura cero actual. Las dos lecturas no deben diferir en más de 50 dígitos después de tener debidamente en cuenta las correcciones realizadas para diferentes temperaturas, presiones barométricas y altura sobre el nivel del mar y la posición real de la celda (ya sea de forma vertical u horizontal).

Al presionar la celda, debería ser posible cambiar los dígitos de lectura, haciendo que caigan a medida que aumenta la presión.

Puede verificar también la continuidad de la corriente eléctrica usando un ohmímetro. La resistencia entre los cables del medidor debe ser de aproximadamente 180 ohmios, $\pm 5\%$. Verifica la resistencia entre los dos cables del termistor (normalmente blanco y verde). Utilizando la Tabla 5 del Apéndice B, convierta la resistencia a temperatura. Compare los resultados con la temperatura ambiente actual. La resistencia entre cualquier conductor y la protección no deberá exceder los 20 megaohmios. Recuerda agregar la resistencia del cable durante la verificación (los cables de cobre trenzados calibre 22 AWG son aproximadamente de 14.7Ω por 1,000 pies (48.5Ω por km), multiplica por dos para ambas direcciones).

2.2 INSTALACIÓN DE LA CELDA DE PRESIÓN

2.2.1 INSTALACIÓN DE LAS CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS MODELO 4800 EN EL INTERIOR DE RELLENOS Y TERRAPLENES

Las celdas de presión de suelos se instalan normalmente con las superficies planas horizontales para medir las tensiones verticales. Sin embargo, se pueden colocar en otras orientaciones, dentro del relleno, para medir tensiones en otras direcciones, por ejemplo, una celda colocada con las superficies planas verticales medirá las tensiones horizontales en una dirección perpendicular a las placas de la celda. A veces se colocan en ángulos de 45 grados.

La experiencia ha demostrado que los intentos de medir las presiones de suelos en rellenos fracasan con frecuencia. El problema es doble. En primer lugar, la distribución de la tensión en el relleno puede ser inherentemente variable debido a las distintas propiedades del suelo y a los distintos grados de compactación del suelo. Por lo tanto, la tensión del suelo en un lugar puede no ser típico de los lugares circundantes. En segundo lugar, una celda instalada directamente en el relleno podría resultar en la creación de una zona anómala inmediatamente alrededor de la celda donde puede haber un material diferente, de grano más fino, con menos compactación. (El material alrededor de la celda puede estar mal compactado debido a la necesidad de evitar daños en la celda.)

En un relleno de tierra, no se esperaría que esta zona de mala compactación fuera un problema, ya que se supone que la tierra de arriba se mueva hacia abajo para llenar los vacíos y consolidar el terreno. Sin embargo, bajo la influencia del agua de lluvia y la vibración, cualquier espacio en el suelo inmediatamente alrededor, y especialmente debajo, de la celda puede crecer, provocando que la celda se desacople por completo del suelo que la rodea. En tales situaciones, las tensiones internas del suelo rodean la celda en lugar de atravesarla. Entonces, la celda registrará solo una presión muy baja, que no cambia mucho a medida que aumentan las cargas. Esta situación ocurre con frecuencia.

MÉTODO DE LECHADA DÉBIL

Una forma de evitar el problema es colocar la celda dentro de una lechada débil. Un método utilizado con éxito en Sudáfrica, por Oosthuizen et al, utiliza esencialmente técnicas similares a la descrita en la Sección 2.2.5. La instalación de las celdas comienza cuando el relleno alcanza una altura de un metro por encima del nivel del instrumento. La ubicación del instrumento y las zanjas de los cables se excavan a un metro de profundidad, la cavidad del instrumento, con lados inclinados a 45° (Figura 10).

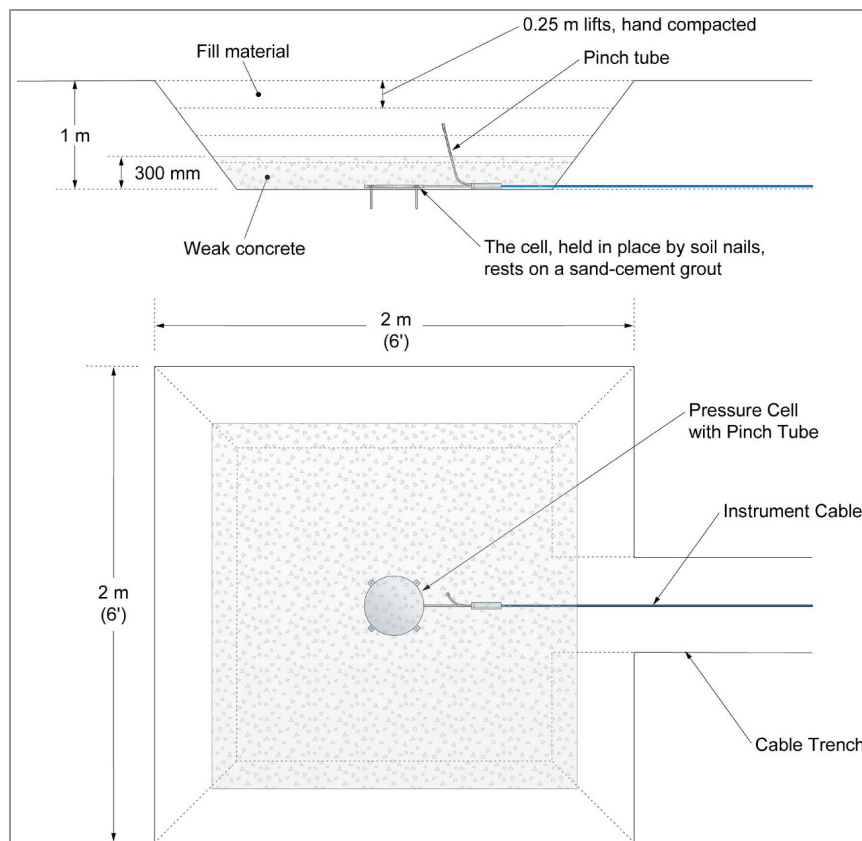


FIGURA 10: Instalación de la celda de presión de suelos modelo 4800

Las celdas (modelo 4800-1-1P, completas con tubos manguito y asas) se colocan sobre una capa delgada de lechada de cemento y arena que no se encoge, y se clavan en su posición utilizando las asas de las celdas provistas para este propósito. La cavidad excavada se rellena luego a una profundidad de 300 mm con un cemento débil en capas de 100 mm, vibrado con un vibrador interno. Después de 24 horas, las celdas se presurizan apretando los tubos manguitos hasta que la presión en la celda, que se muestra en un cuadro de lectura conectado, comienza a cambiar.

La ubicación del instrumento que contiene las celdas cementadas y la zanja de cables se rellena luego en capas de 250 mm, utilizando el mismo material que el relleno principal colocado a mano y compactado con pisones de relleno neumáticos o de gasolina, o rodillos vibratorios de zanjas. Después de esto, pueden continuar con las prácticas estándar de llenado y compactación de la construcción.

Los grupos de celdas de presión de suelos, colocados de acuerdo con los métodos descritos anteriormente, pueden instalarse en zanjas, debajo del nivel del terraplén temporal o en rampas por encima del nivel del terraplén temporal. En presas, por ejemplo, suele ser conveniente instalar en zanjas en el núcleo de relleno laminado impermeable, y en rampas en las zonas de filtración y zonas de concha de relleno de roca compactada. En terraplenes de tierra conviene instalarlo en zanjas. Al hacerlo, se pueden obtener más fácilmente grados adecuados de compactación del relleno sin dañar los

grupos de celdas o los conjuntos de cables. A medida que se cubren y compactan las celdas, se deben tomar lecturas repetidas para asegurarse de que las celdas continúen funcionando correctamente.

Vea la Sección 2.3 sobre la instalación y protección de los cables.

Aplicación	Lechada para suelos medios a duros		Lechada para suelos blandos	
Materiales	Peso	Relación por peso	Peso	Relación por peso
Agua	30 galones	2.5	75 galones	6.6
Cemento Portland	94 lbs. (un saco)	1	94 lbs. (un saco)	1
Bentonita	25 lbs. (según se necesite)	0.3	39 lbs. (según se necesite)	0.4
Notas	La resistencia de esta mezcla a la compresión a los 28 días es de alrededor de 50 psi, similar a la de una arcilla muy rígida a dura. El coeficiente es alrededor de 10,000 psi		La resistencia de esta mezcla a los 28 días es alrededor de 4 psi, similar a la de una arcilla muy suave.	

TABLA 1: *Proporciones para dos mezclas de lechada*

MÉTODO ALTERNATIVO

En este método, la celda de presión utilizada para monitorear las presiones verticales de la tierra se coloca directamente en el relleno. Los procedimientos son similares a los de la Sección Método de lechada débil, excepto que la celda de presión no tiene un tubo manguito y se prescinde de la capa de lechada débil. En cambio, la celda se coloca sobre una almohadilla de mortero de fraguado rápido. Esto se hace para asegurar un contacto uniforme con el suelo en el fondo de la zanja. Luego, la celda se cubre con tierra colocada en capas de 300 mm y compactadas como antes.

2.2.2 INSTALACIÓN DE CELDAS DE PRESIÓN DE CONTACTO ("FAT BACK") MODELO 4810

Esta sección detalla las instrucciones de instalación para las celdas de presión de suelos modelo 4810, que se utilizan para medir las presiones de suelos en estructuras. En los rellenos para muelles, pilotes, estribos de puentes, muros de contención, alcantarillas y otras estructuras, las celdas pueden instalarse dentro de una estructura de concreto que se va a verter o directamente sobre la superficie de una estructura existente. Para muros pantallas, la celda de presión de suelos modelo 4820 se utiliza como se describe en la Sección 2.2.4.

INSTALACIÓN EN CONCRETO VERTIDO

Al verter concreto, las celdas se pueden sujetar a los encofrados con clavos a través de las asas soldadas al borde de la celda. Coloque la celda de modo que la placa delgada sensible a la presión esté directamente contra el encofrado de concreto. Clave las placas al encofrado ligeramente de tal manera que se enganchen lo suficiente con el concreto y no se salgan del concreto cuando se quiten los encofrados. Enrute el cable dentro del concreto hasta un lugar de lectura conveniente o hasta un bloque en el interior donde se pueda enrollar el cable sobrante. Proteja el cable de daños durante la colocación del concreto y la vibración atándolo a barras de refuerzo adyacentes. Vea la Figura 11.

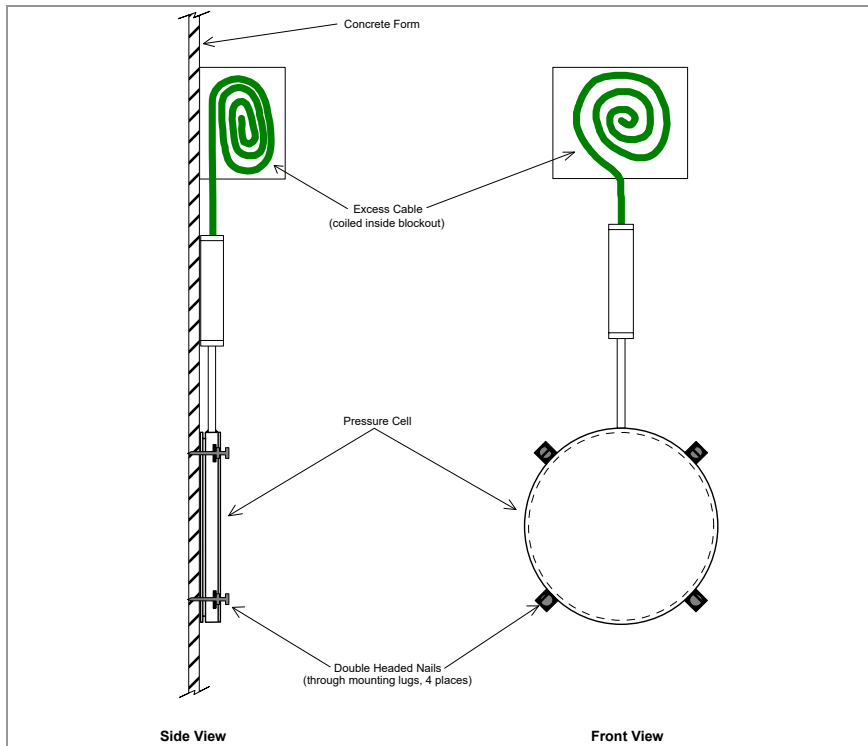


FIGURA 11: Fijación del modelo 4810 al encofrado de concreto

INSTALACIÓN EN SUPERFICIES EXISTENTES

Las asas soldadas al borde de la celda se pueden usar para sujetar la celda contra la estructura usando clavos, tirafondos, alambre de amarre, etc. Incluso si la superficie es lisa, pero especialmente cuando la superficie es rugosa o irregular, se requiere una almohadilla de mortero entre la celda y la estructura. Vea la Figura 12.

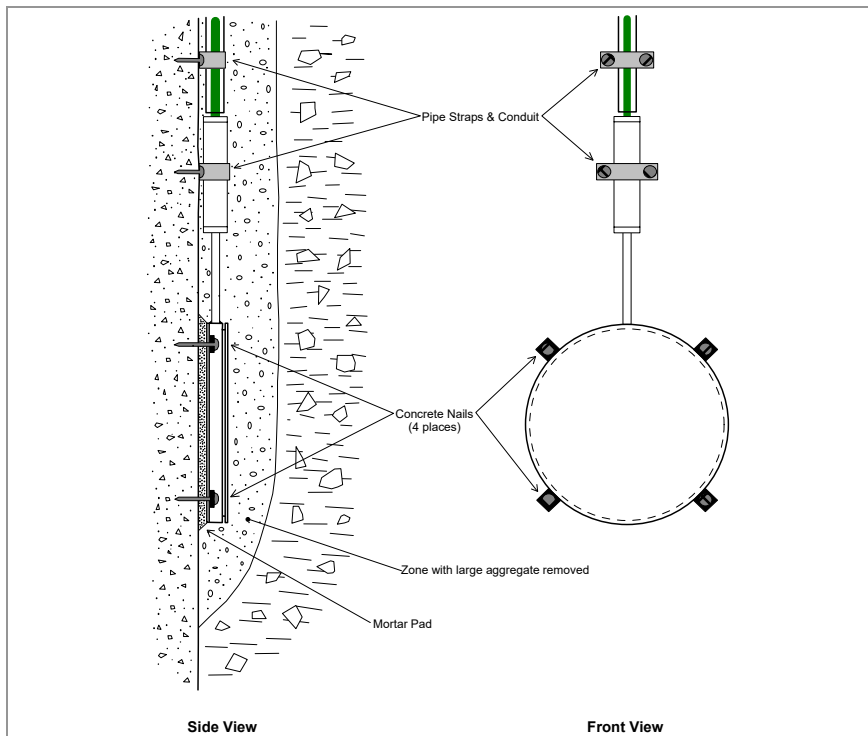


FIGURA 12: Instalación de la celda de presión de contacto modelo 4810

Use las asas de la celda como plantilla para ubicar la posición para perforar los orificios para la instalación de anclajes de expansión o instale los anclajes cerca y use alambre para mantener las celdas en su lugar. Alternativamente, la celda se puede clavar en su lugar usando las asas como guía.

Mezcle un poco de mortero de cemento de fraguado rápido o cemento epóxico. Aplique esto con una paleta en la superficie y luego empuje la celda hacia el cemento para que el exceso de cemento salga por los bordes de la celda. Mantenga la celda en su lugar mientras el cemento se asienta y luego complete la instalación agregando los tirafondos (usando los anclajes de expansión) y apretando o clavando la celda en su lugar. Proteja la celda, la carcasa del transductor y el cable del contacto directo con grandes trozos de roca cubriéndolos con un material de relleno de grano fino del que se hayan eliminado todos los trozos de más de 10 mm (0.5"). Este material se mantiene cerca de la celda y el cable a medida que se coloca el relleno. Se puede lograr una protección adicional del cable mediante el uso de un conducto metálico sujeto a la superficie de la estructura.

2.2.3 INSTALACIÓN DE LA CELDA DE CARGA HIDRÁULICA MODELO 4815

Una instalación particular, que se muestra en la Figura 13, utilizó la celda de carga hidráulica modelo 4815 para medir la carga concentrada en el revestimiento en un túnel de un pilote de madera existente (que soporta una construcción superior) que había sido cortado por la excavación del túnel en suelo congelado. La celda de carga fue diseñada para medir cualquier aumento de carga en el revestimiento del túnel que pudiera ocurrir cuando, al final de la construcción del túnel, se permitió que el suelo se descongelara. La celda de carga se colocó debajo del fondo de la pila y se mantuvo temporalmente en su lugar con asas y una almohadilla de mortero hasta que se roció el revestimiento del túnel de concreto proyectado.

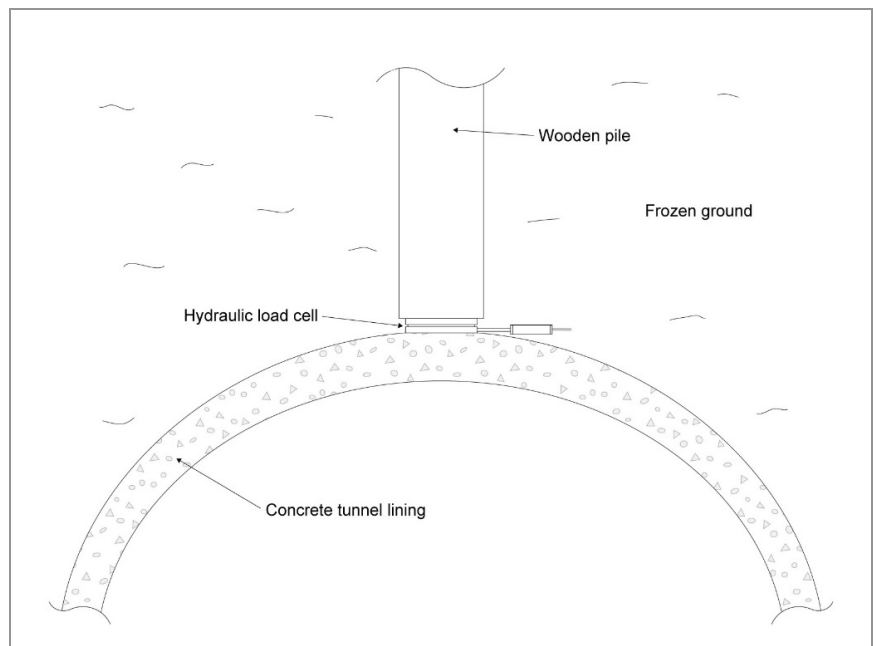


FIGURA 13: Celda de carga hidráulica modelo 4815 que mide cargas en el revestimiento de un túnel

2.2.4 INSTALACIÓN DE CELDAS DE PRESIÓN "JACKOUT" MODELO 4820 EN ZANJAS PANTALLA

La celda de presión Jackout (JOPC) primero debe ensamblarse en el marco Jackout (pieza GEOKON # 4820-5 o 4820-6). El ensamblaje se muestra en la Figura 14. La placa de soporte tiene un orificio circular cortado y orificios para pernos para encajar en la celda de presión Jackout y está conectada a un extremo de un gato hidráulico de doble acción por medio de puntales de acero. La placa de soporte y la placa de reacción están

arqueadas en la parte superior e inferior para evitar que se enganchen en los lados de la zanja pantalla. La placa de reacción está unida al otro lado del gato hidráulico de doble acción. El gato está sujeto firmemente al cable de refuerzo y dispuesto de manera que las placas se muevan libremente hacia afuera. La línea hidráulica y el cable de señal se atan a una de los refuerzos a intervalos de un metro (~ tres pies).

Cuando la jaula de refuerzo se ha bajado a su profundidad adecuada, el gato se activa, forzando las dos placas contra los muros de la zanja.

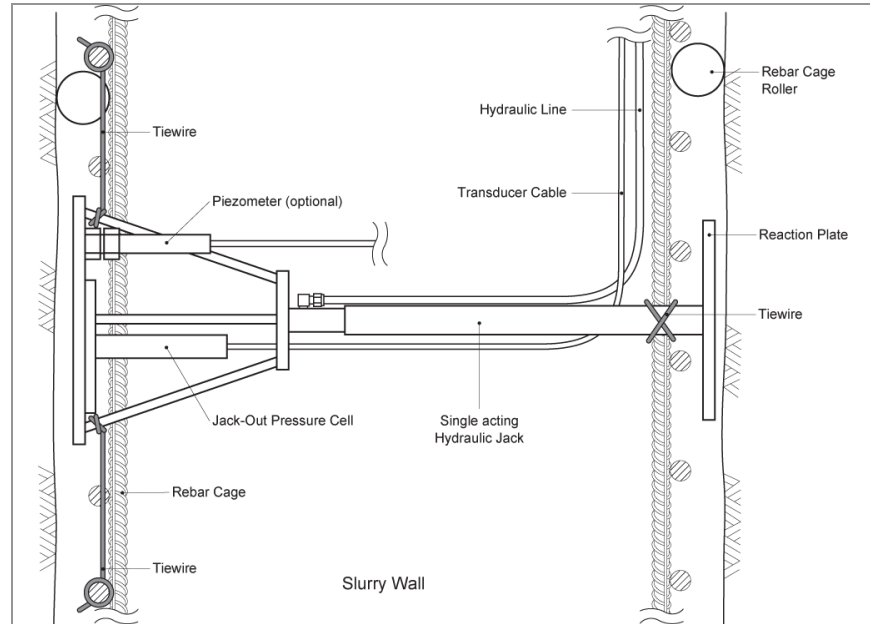


FIGURA 14: Instalación de la celda de presión Jackout modelo 4820

La observación de la presión indicada por el JOPC (consulte la Sección 3 para conocer las instrucciones de lectura) indicará cuándo la celda ha contactado con el muro. Bombee el gato hasta que la lectura de JOPC indique una presión aproximada de 70 KPa (10 psi) mayor que la presión de la pantalla a la profundidad del JOPC. Esto asegura que la celda se apoye contra los muros de la zanja y que la presión de la lechada de concreto no cerrará el gato, lo que podría permitir que las placas de reacción se alejen de los muros de la zanja. Verifique la lectura del JOPC de vez en cuando, porque la presión puede desvanecerse si los muros de la zanja son blandos y flexibles. Vuelva a presurizar según sea necesario. Deje el gato presurizado hasta que la lechada se haya asentado.

2.2.5 INSTALACIÓN DE CELDAS PARA MEDIR LA PRESIÓN DEL SUELO EN LA BASE DE ZAPATAS, LOSAS, PAVIMENTOS, ETC.

La experiencia ha demostrado que los intentos de medir las presiones de suelos de contacto en la base de zapatas, losas, pavimentos, etc., fracasan con frecuencia. El problema es doble. En primer lugar, la distribución de la tensión de contacto puede ser inherentemente variable debido a las distintas propiedades y a los distintos grados de compactación del suelo. Por lo tanto, la tensión de contacto en un lugar puede no ser típico de los lugares circundantes. En segundo lugar, una celda instalada como se describe en la Sección 2.2.1 podría resultar en la creación de una zona anómala inmediatamente alrededor de la celda donde puede haber un material diferente, de grano más fino, con menos compactación. (El material alrededor de la celda puede estar mal compactado debido a la necesidad de evitar daños en la celda.)

En un relleno de tierra, esta zona de mala compactación no sería un problema, ya que la tierra de arriba se moverá hacia abajo para llenar los vacíos y consolidar el terreno. Sin embargo, donde hay una losa de concreto inmediatamente encima de la celda, esta consolidación puede no ocurrir. De hecho, bajo la influencia del agua de lluvia y la

vibración, los espacios alrededor de la celda pueden crecer, provocando que la celda se desacople por completo del concreto de arriba. En tal situación, la losa de concreto forma un puente sobre el espacio y las cargas en el concreto rodean la celda en lugar de atravesarla. La celda registra solo una presión muy baja, que no cambia a medida que aumentan las cargas.

La mejor manera de evitar el problema es colocar la celda dentro del concreto si es posible. Esto a menudo se puede hacer cuando la capa de unión de concreto inicial se extiende sobre la superficie del suelo. En este momento, se presiona una celda de presión de suelos modelo 4800-1-1P con un tubo manguito en la capa de unión para que descansa contra el suelo debajo. Se puede usar un trípode con peso para mantener la celda de tensión en su lugar hasta que el concreto se endurezca. El tubo manguito está dispuesto para sobresalir por encima de la capa de unión y, cuando el concreto se ha endurecido, se utiliza para presurizar la celda y asegurar un buen contacto entre la celda y el concreto circundante. Vea la Figura 15. La ventaja de este método es su sencillez y que permite compactar completamente el suelo debajo del concreto de la forma habitual.

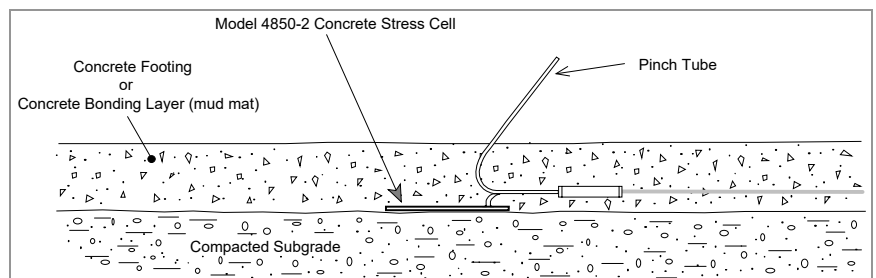


FIGURA 15: Instalación de la celda de presión de suelos modelo 4800-1-1P

2.2.6 INSTALACIÓN DE CELDAS DE PRESIÓN PUSH-IN PARA MEDIR PRESIONES DE SUELOS LATERALES

El modelo 4830 está diseñado para ser empujado en suelos blandos utilizando las barras de perforación disponibles, generalmente AW. A menos que el suelo sea muy blando, se recomienda perforar un pozo hasta aproximadamente dos pies de la ubicación deseada y luego empujar la celda el resto del camino.

Algunas cosas para tener en cuenta:

EFFECTOS DE LA TEMPERATURA

Esta celda de presión es relativamente rígida debido a la geometría y la necesidad de una construcción robusta para empujar en el suelo. Siempre es recomendable obtener las lecturas de presión cero antes de la instalación en el pozo a la temperatura del pozo. Es posible que el sensor tarde mucho tiempo en alcanzar el equilibrio térmico, pero esta es una medida importante y si no es posible tomar esta lectura en el pozo, es posible tomar la lectura en un balde de agua que está a la temperatura del suelo.

SATURACIÓN DEL PIEZÓMETRO

El filtro y el sensor del piezómetro vienen saturados de fábrica y sellados con cinta Mylar. No retires la cinta hasta justo antes de que el sensor esté instalado en el suelo. El filtro se satura dibujando un vacío en el sensor y luego permitiendo que el agua fluya hacia el sensor cuando se libera el vacío. Si el sensor debe instalarse y luego retirarse para su uso en otros sitios, el proceso de saturación debe realizarse en cada instalación. GEOKON puede suministrar el equipo portátil necesario para lograr esto.

PRESIÓN EXCESIVA

Al empujar la celda hacia el suelo, es posible que se generen presiones que excedan el rango de escala completa del sensor, lo que provoque que el sensor experimente un cambio de cero o incluso un daño permanente. Para evitar esto, se deben tomar lecturas

a medida que se presiona el sensor. Cuando la presión indicada se acerca al 150% de la escala completa, la operación de empuje debe terminarse hasta que la salida del sensor regrese a su rango calibrado.

CABLEADO DE SENSORES

Tabla de cableado del 4830-1		Tabla de cableado del 4830-2	
Colores de los cables (Cable azul 02-250V6)	Función	Colores de los cables (Cable púrpura 04-375V9)	Función
Rojo	Sensor de celda de presión +	Rojo	Sensor de celda de presión +
Negro	Sensor de celda de presión -	Negro del cable rojo	Sensor de celda de presión -
Blanco	Termistor	Blanco	Sensor del piezómetro +
Verde	Termistor	Negro del cable blanco	Sensor del piezómetro -
Desnudo	Tierra (Protección)	Azul	Termistor
		Negro del cable azul	Termistor
			Tierra (Protección)

TABLA 2: *Tabla de cableado del 4830*

2.3 INSTALACIÓN Y EMPALME DE CABLES

Los procedimientos de colocación de cables varían según las instalaciones individuales. Sin embargo, en general, todas las instalaciones tienen en común los siguientes requisitos:

1. El cable debe protegerse contra daños por partículas angulares del material en el que está incrustado.
2. El cable debe protegerse contra daños por los equipos de compactación.
3. En terraplenes y rellenos de tierra y roca, el cable debe protegerse contra estiramientos como resultado de la compactación diferencial del terraplén.
4. En estructuras de concreto, el cable debe protegerse de daños durante la colocación y vibración del concreto.

En terraplenes, los cables pueden estar incrustados en una cubierta protectora de arena o materiales de terraplén finos seleccionados. Una instalación típica podría comprender, por ejemplo, la colocación de una serie de cables en una capa preparada que consta de no menos de 200 mm (8") de material fino seleccionado compactado. Para establecer un grado aceptable sin interferencia indebida con las operaciones de construcción, la capa preparada puede ubicarse en una zanja o en una rampa expuesta. En presas de pedraplenes con núcleos de relleno de tierra, por ejemplo, con frecuencia es conveniente instalar cables en zanjas en las zonas de núcleo y filtro fino, y en rampas en el filtro grueso y zonas de concha de pedraplenes compactadas. Los cables individuales deben tener una separación mínima de 12 mm (0.5") y ningún cable debe estar a menos de 150 mm (6") del borde de la capa preparada. En casos en los que los cables deban cruzarse entre sí, o en los que se deba colocar más de una capa de cables en una matriz determinada, los cables deben estar separados entre sí por un intervalo vertical de no menos de 50 mm (2") de arena compactada a mano o material fino seleccionado de terraplén. Dado que la capacidad de alargamiento del cable eléctrico es bastante sustancial, no es necesario instalar el cable con meandros en forma de "S".

Durante el relleno de zanjas en presas de tierra, un tapón, de aproximadamente medio metro (dos pies) de ancho, hecho de una mezcla de bentonita al 5% (por volumen) de una fuente aprobada y que exhibe un factor de hinchamiento libre de aproximadamente 600%, y 95% de material de terraplén, se puede colocar en las zanjas a intervalos de no más de 20 metros (50 pies). El propósito de los tapones de bentonita es reducir la posibilidad de filtración de agua a través del núcleo del terraplén a lo largo de las zanjas rellenadas.

El cable se puede marcar con etiquetas de cable Mylar. Para un cable individual, el número de identificación debe estar pegado cerca del extremo del cable. Se pueden

especificar etiquetas de cable adicionales para ayudar en la identificación si es necesario desenterrar cables para empalmarlos, etc.

Los kits de empalme recomendados por GEOKON incorporan moldes, los cuales se posicionan alrededor del empalme y luego se rellenan con epóxico para impermeabilizar las conexiones. Cuando están bien hechos, este tipo de empalmes equivalen o son mejores que los cables en fuerza y propiedades eléctricas. Contacta a GEOKON para obtener materiales para empalmes e instrucciones adicionales para el empalme de cables.

Pueden terminarse los cables decapando y estañando los conductores individuales y luego conectándolos a un cable de conexión de la consola de lectura. En forma alternativa, puede usar un conector que se enchufará directamente a la consola de lectura o a un receptáculo en un cable de conexión especial.

2.4 RUIDO ELÉCTRICO

Debe tener cuidado al instalar los cables del instrumento para mantenerlos tan lejos como sea posible de fuentes de interferencia eléctrica como líneas eléctricas, generadores, motores, transformadores, soldadoras de arco, etc. Los cables nunca deben enterrarse o correr junto a líneas de corriente alterna. Los cables del instrumento captarán el ruido de 50 o 60 Hz (u otra frecuencia) del cable de alimentación y esto probablemente causará un problema para obtener una lectura estable. Contacte a la fábrica para saber más sobre opciones de filtrado disponibles para usar con los registradores de datos y lectores GEOKON si tiene alguna dificultad.

2.5 LECTURAS INICIALES

En el momento de la instalación, debe tomar y registrar las lecturas iniciales cuidadosamente, junto con la presión barométrica y la temperatura. Tome las lecturas iniciales mientras la celda está en posición, antes de cubrirla con relleno y verter el concreto. ¡Nuevamente, es imperativo que se tomen las lecturas iniciales con carga cero!

3. TOMA DE LECTURAS

3.1 GK-404 CONSOLA DE LECTURA DE CUERDA VIBRANTE

La consola de lectura de cuerda vibrante Modelo GK-404 es una unidad portátil, de bajo uso de energía, que es capaz de operar durante 20 horas continuas con dos baterías AA. Está diseñada para las lecturas de todos los instrumentos de cuerda vibrante GEOKON, y tiene la capacidad de mostrar las lecturas como dígitos, frecuencia (Hz), períodos (μ s), o microdeformaciones (μ e). La GK-404 también muestra la temperatura del transductor (incorporado en el termistor) con una resolución de 0.1 °C.



FIGURA 16: Consola de lectura GK-404



FIGURA 17: Conector Lemo a GK-404

3.1.1 OPERACIÓN DE LA GK-404

1. Fije los conductores sueltos alineando el círculo rojo del conector Lemo plata con la línea roja de la parte superior de la GK-404 (vea Figura 17). Inserte el conector Lemo en la GK-404 hasta que quede fijo en su posición.
2. Conecte cada uno de los broches a los conductores del sensor según su color, considerando que el azul representa la protección (descubierto).
3. Para encender la GK-404, presione el botón **Encendido/Apagado** en el panel frontal de la unidad. Se mostrará la pantalla inicial de configuración.
4. Después de un momento, la GK-404 comenzará a tomar lecturas y las mostrará con base en las configuraciones de los botones **Pos** y **Modo**.

La pantalla de la unidad mostrará lo siguiente (de izquierda a derecha):

- La posición actual: configurada por el botón **Pos**, mostrado de la A a la F.
- La lectura actual: configurada por el botón **Modo**, mostrada como un valor numérico seguido por la unidad de medición.
- La lectura de la temperatura del instrumento fijado en grados Centígrados.

Use los botones **Pos** y **Modo** para seleccionar la posición correcta y las unidades a mostrar para el modelo de equipo que adquirió.

La GK-404 continuará tomando mediciones y mostrando las lecturas hasta que la unidad se apague, ya sea en forma manual o por el temporizador de apagado automatizado (en caso de contar con uno).

Para obtener más información, consulte el manual de la GK-404.

3.2 GK-405 CONSOLA DE LECTURA DE CUERDA VIBRANTE

La consola de lectura GK-405 cuenta con dos componentes:

- La unidad de consola de lectura, que consiste en una computadora personal portátil Windows con la aplicación para la consola de lectura de cuerda vibrante GK-405.
- El módulo remoto de la GK-405, está alojado en una carcasa resistente a la intemperie.

El módulo remoto puede conectarse con cables al sensor a través de:

- Conductores sueltos con caimanos, en caso de que el cable sensor termine en cables descubiertos.
- Un conector de 10 pines.

Las dos unidades se comunican de forma inalámbrica a través de Bluetooth®, un protocolo de comunicaciones digitales confiable. Usando Bluetooth, la unidad puede operar desde el receptáculo de un módulo remoto, o, si le es más conveniente, puede retirarse y operarse a hasta 20 metros del módulo remoto.

La GK-405 muestra la temperatura del termistor en grados Celsius.

Para obtener más información, consulte el Manual de Instrucciones de la GK-405.



FIGURA 18: Consola de lectura GK-405

3.2.1 CONECTAR SENSORES CON CONECTORES DE PASO ADJUNTOS DE 10 PUNTOS

Alinee las ranuras del conector del sensor (macho), con el conector adecuado en la consola (conector hembra, sensor etiquetado o célula de carga). Empuje el conector hasta que quede en su posición, luego gire el anillo exterior del conector macho hasta que quede fijo en su posición.

3.2.2 CONECTAR SENSORES CON CONDUCTORES DESCUBIERTOS

Fije los conductores sueltos a los conductores descubiertos del sensor de cuerda vibrante GEOKON conectando cada uno de los broches a los conductores del sensor según su color, considerando que el azul representa la protección (descubierto).

3.2.3 OPERACIÓN DE LA GK-405

Presione el botón de encendido en la unidad de lectura. Una vez que la configuración se termine, se encenderá una luz azul intermitente indicando que los dos componentes están listos para conectarse en forma inalámbrica. Arranque el programa GK-405 VVRA siguiendo los pasos siguientes:

1. Pulse "Iniciar" en la ventana principal de su PC portátil.
2. Seleccione "Programas".
3. Pulse el icono GK-405 VVRA.

Después de unos segundos, la luz azul deberá dejar de parpadear y permanecerá encendida. La ventana de Lecturas en vivo se desplegará en su PC portátil.

Configure el modo Mostrar en la letra correcta requerida para su equipo. Para obtener más información, consulte el Manual de instrucciones de la GK-405.

3.3 MEDICIÓN DE TEMPERATURAS

Todos los instrumentos de cuerda vibrante GEOKON están equipados con un termistor para leer la temperatura. El termistor ofrece una salida de resistencia variable según cambia la temperatura. Los conductores blanco y verde del cable del instrumento generalmente se conectan con el termistor interno.

Las consolas de lectura GK-404 y GK-405 leerán el termistor y mostrarán la temperatura en grados Centígrados.

PARA LEER LAS TEMPERATURAS USANDO UN OHMÍMETRO:

1. Conecte un ohmímetro a los conductores verde y blanco del termistor que provienen del instrumento. Debido a que los cambios en la resistencia por temperatura son muy grandes, el efecto de la resistencia de los cables generalmente es insignificante. En el caso de los cables más largos, se puede aplicar una corrección, equivalente aproximadamente a 48.5Ω por km (14.7Ω por cada 1000 pies) a 20°C . Multiplique estos factores por dos para contabilizar ambas direcciones.
2. Busque las temperaturas de las resistencias medidas en Apéndice B.

4. REDUCCIÓN DE DATOS

4.1 CÁLCULO DE LA PRESIÓN

Las unidades básicas utilizadas por GEOKON para medir y reducir los datos de las celdas de presión del suelo de alambre vibrante son "dígitos". Las lecturas de GEOKON muestran "dígitos" en la posición de lectura de la celda de presión de suelos. El cálculo de dígitos se basa en la siguiente ecuación:

$$\text{digits} = \left(\frac{1}{\text{Period}} \right)^2 \times 10^{-3} \quad \text{or} \quad \text{digits} = \frac{\text{Hz}^2}{1000}$$

ECUACIÓN 2: Cálculo de dígitos

Para convertir dígitos a presión, se aplica la siguiente ecuación:

Presión * (Lectura actual - Lectura inicial) * Factor de calibración

O

$$P = (R_1 - R_0) \times G$$

ECUACIÓN 3: Convertir dígitos a presión

La lectura inicial (R_0) se obtiene normalmente durante la instalación (generalmente la lectura cero). El factor de calibración (G , generalmente en términos de psi o kPa por dígito) proviene de la hoja de calibración suministrada (en la Figura 19 se muestra una hoja de calibración típica). Para convertir la salida a otras unidades de ingeniería, multiplique el factor de calibración por el multiplicador de conversión que se indica en la Tabla 3.

A	De	psi	"H ₂ O	'H ₂ O	mm H ₂ O	m H ₂ O	"HG	mm HG	atm	mbar	bar	kPa	MPa
psi	1		.036127	.43275	.0014223	1.4223	.49116	.019337	14.696	.014503	14.5039	.14503	145.03
"H ₂ O	27.730	1		12	.039372	39.372	13.596	.53525	406.78	.40147	401.47	4.0147	4016.1
'H ₂ O	2.3108	.08333	1		.003281	3.281	1.133	.044604	33.8983	.033456	33.4558	.3346	334.6
mm H ₂ O	704.32	25.399	304.788	1		1000	345.32	13.595	10332	10.197	10197	101.97	101970
m H ₂ O	.70432	.025399	.304788	.001	1		.34532	.013595	10.332	.010197	10.197	.10197	101.97
"HG	2.036	.073552	.882624	.0028959	2.8959	1		.03937	29.920	.029529	29.529	.2953	295.3
mm HG	51.706	1.8683	22.4196	.073558	73.558	25.4	1		760	.75008	750.08	7.5008	7500.8
atm	.06805	.002458	.029499	.0000968	.0968	.03342	.001315	1		.000986	.98692	.009869	9.869
mbar	68.947	2.4908	29.8896	.098068	98.068	33.863	1.3332	1013.2	1		1000	10	10000
bar	.068947	.002490	.029889	.0000981	.098068	.033863	.001333	1.0132	.001	1		.01	10
kPa	6.8947	.24908	2.98896	.0098068	9.8068	3.3863	.13332	101.320	.1	100	1		1000
MPa	.006895	.000249	.002988	.0000098	.009807	.003386	.000133	.101320	.0001	.1		.001	1

TABLA 3: Factores de multiplicación para unidades de ingeniería

Por ejemplo, suponga una lectura inicial de $R_0 = 9101$, una lectura actual de $R_1 = 7390$ y un factor de calibración de -0.1192 kPa/dígito. La presión calculada es:

$$204 \text{ kPa} = (7390 - 9101) \times -0.1192$$

(El Apéndice D muestra cómo se puede usar un polinomio de segundo orden para mejorar la precisión).

4.2 CORRECCIÓN DE LA TEMPERATURA

La celda de presión de suelos de cuerda vibrante es bastante sensible a las fluctuaciones de temperatura, pero a menudo los cambios de temperatura en el suelo son menores y pueden ignorarse. Las correcciones de los efectos de la temperatura en el transductor solo se pueden realizar utilizando el factor térmico (K) suministrado en la hoja de calibración (vea la Figura 19) junto con una ecuación para su uso adecuado. Vea la Ecuación 4.

Corrección de temperatura * (Temperatura actual - Temperatura inicial) * Factor térmico

O

$$P_{\text{corregido}} = (R_1 - R_0)G + (T_1 - T_0)K$$

ECUACIÓN 4: Corrección de temperatura solo para el transductor

Después, debe agregarse el valor de la corrección de la temperatura a la presión calculada usando la Ecuación 3. Por ejemplo, suponga una temperatura inicial de 25° C, una temperatura en el momento de la medición de 12° C y un factor térmico de +0.03852 kPa/° C. La presión corregida térmicamente es:

$$203.5 \text{ kPa} = 204 + (12 - 25) \times 0.03852$$

Tome en cuenta que esta corrección de temperatura se aplica solo al transductor de presión, no a toda la celda rodeada de suelo o suelo y concreto, cada uno con su propio coeficiente de expansión de temperatura (diferente). Comercialmente no es práctico medir este efecto sin incurrir en grandes gastos. El efecto suele ser pequeño en profundidades donde la temperatura es bastante constante, pero donde las temperaturas varían, el efecto puede ser bastante grande. Para obtener más información, consulte el Apéndice D, que ofrece un tratamiento teórico.

En la práctica, la mejor manera de compensar las temperaturas es derivar un factor a partir de mediciones simultáneas de presión y temperatura en momentos en que la temperatura está cambiando y cuando se puede suponer con seguridad que la carga aplicada no está cambiando.

4.3 CORRECCIÓN BAROMÉTRICA

El transductor de presión utilizado en las celdas de presión de suelos de cuerda vibrante GEOKON está vacío y sellado herméticamente y responderá a la fluctuación de la presión barométrica. Si se requiere una corrección para estas fluctuaciones, entonces es necesario registrar la presión barométrica inicial (S_0) y la presión barométrica en el momento de cada lectura (S_1) y restar el cambio ($S_1 - S_0$) de la lectura de presión calculada.



48 Spencer St. Lebanon, NH 03786 USA

Vibrating Wire Pressure Transducer Calibration Report

Model Number: 4500INS-350 kPa

Date of Calibration: September 20, 2011

Serial Number: 1124847

Temperature: 22.8 °C

Barometric Pressure: 999.1 mbar

Technician: Stewart Kinnear

Applied Pressure (kPa)	Gage Reading 1st Cycle	Gage Reading 2nd Cycle	Average Gage Reading	Calculated Pressure (Linear)	Error Linear (%FS)	Calculated Pressure (Polynomial)	Error Polynomial (%FS)
0.0	8980	8981	8981	0.298	0.09	-0.059	-0.02
70.0	8395	8395	8395	70.06	0.02	70.13	0.04
140.0	7811	7811	7811	139.7	-0.10	139.9	-0.02
210.0	7223	7223	7223	209.7	-0.08	210.0	0.00
280.0	6634	6634	6634	279.9	-0.03	280.0	-0.01
350.0	6042	6043	6043	350.4	0.11	350.0	0.01

(kPa) Linear Gage Factor (G): -0.1192 (kPa/ digit)

Regression Zero: 8983

Polynomial Gage factors:

A: -3.082E-07

B: -0.1145

C:

Thermal Factor (K): 0.03852 (kPa/ °C)

Calculate C by setting P=0 and R_1 = initial field zero reading into the polynomial equation

(psi) Linear Gage Factor (G): -0.01728 (psi/ digit)

Polynomial Gage Factors:

A: -4.47E-08

B: -0.01661

C:

Thermal Factor (K): 0.005586 (psi/ °C)

Calculate C by setting P=0 and R_1 = initial field zero reading into the polynomial equation

Calculated Pressures:

Linear, $P = G(R_1 - R_0) + K(T_1 - T_0)(S_1 - S_0)^*$

Polynomial, $P = AR_1^2 + BR_1 + C + K(T_1 - T_0)(S_1 - S_0)^*$

*Barometric pressures expressed in kPa or psi. Barometric compensation is not required with vented transducers.

The above instrument was found to be in tolerance in all operating ranges.
The above named instrument has been calibrated by comparison with standards traceable to the NIST, in compliance with ANSI Z540-1.

This report shall not be reproduced except in full without written permission of Geokon Inc.

FIGURE 19: Muestra de hoja de calibración

5. SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

El mantenimiento y la resolución de problemas de las celdas de presión de cuerda vibrante se limitan a verificaciones periódicas de las conexiones de los cables. Una vez instalados, las celdas son generalmente inaccesibles y las soluciones son limitadas. Consulte la siguiente lista de problemas y posibles soluciones en caso de que surjan dificultades. Consulte con la fábrica para obtener ayuda para solucionar problemas.

SÍNTOMA: LA RESISTENCIA DEL TERMISTOR ES DEMASIADO ALTA

- ☐ Probablemente, hay algún circuito abierto. Revise todas las conexiones, terminales y enchufes. Si encuentra algún corte en el cable, empalme de acuerdo con los procedimientos recomendados.

SÍNTOMA: LA RESISTENCIA DEL TERMISTOR ES DEMASIADO BAJA

- ☐ Es probable que haya algún corto. Revise todas las conexiones, terminales y enchufes. Si encuentra algún corte en el cable, empalme de acuerdo con los procedimientos recomendados.
- ☐ Puede que el agua haya penetrado en el transductor. No hay solución.

SÍNTOMA: LAS LECTURAS DE LA CELDA DE PRESIÓN SON INESTABLES

- ☐ ¿La consola de lectura está posicionada correctamente? Si está utilizando un registrador de datos para registrar las lecturas automáticamente, ¿las configuraciones de excitación de la frecuencia de barrido son correctas? Intenta leer la celda en una posición de lectura diferente.
- ☐ ¿Hay una fuente de interferencia eléctrica cerca? Las fuentes más probables de ruido eléctrico son motores, generadores, transformadores, soldadores de arco y antenas.
- ☐ Asegúrese de que el cable blindado de drenaje esté conectado a tierra. Conecte el cable blindado de drenaje a la consola de lectura usando la pinza azul.
- ☐ ¿La consola de lectura funciona con otra celda de presión? Si no es así, es posible que la consola de lectura tenga poca batería o no funcione correctamente. Consulte el manual de la consola de lectura correspondiente para conocer las instrucciones de carga o solución de problemas.

SÍNTOMA: LA CELDA DE PRESIÓN NO LEE

- ☐ ¿El cable está cortado o aplastado? Esto se puede comprobar con un ohmímetro. La resistencia del cable es de aproximadamente 14.7Ω por 1000' de cable de calibre 22 AWG. Multiplique este factor por dos para considerar ambas direcciones.
- ☐ Si la resistencia es muy alta o infinita (megaohmios), se debe sospechar que un cable está cortado. Si la resistencia es muy baja ($<100\Omega$), es probable que se produzca un cortocircuito en el cable.
- ☐ ¿La consola de lectura o el registrador de datos funciona con otra celda de presión? Si no es así, es posible que la consola de lectura o el registrador de datos no estén funcionando correctamente. Consulte el manual de la consola de lectura o del registrador de datos para obtener más instrucciones.

Refiérase a la resistencia esperada para varias combinaciones de cables a continuación.

Niveles de cabezas del sensor de cuerda vibrante

Rojo/Negro $\cong 180\Omega$

Verde/Blanco 3000Ω a 25°C

Cualquier otra combinación de cables tendrá como resultado una medición de resistencia infinita.

APÉNDICE A. ESPECIFICACIONES

A.1 CELDAS DE PRESIÓN DE SUELOS

Modelo:	4800 Celda de presión de suelos (rectangular)	4800 Celda de presión de suelos (circular)	4800 Celda de presión de contacto	4800 Celda de presión Jackout
Rangos ¹	70 kPa (10 psi) 170 kPa (25 psi) 350 kPa (50 psi) 700 kPa (100 psi) 1 MPa (150 psi) 2 MPa (300 psi) 3 MPa (435 psi) 5 MPa (750 psi) 7.5 MPa (1100 psi) 20 MPa (3000 psi)	70 kPa (10 psi) 170 kPa (25 psi) 350 kPa (50 psi) 700 kPa (100 psi) 1 MPa (150 psi) 2 MPa (300 psi) 3 MPa (435 psi) 5 MPa (750 psi) 7.5 MPa (1100 psi) 20 MPa (3000 psi)	350 kPa (50 psi) 700 kPa (100 psi) 1 MPa (150 psi) 2 MPa (300 psi) 3 MPa (500 psi) 5 MPa (750 psi)	350 kPa (50 psi) 700 kPa (100 psi) 1 MPa (150 psi) 2 MPa (300 psi) 3 MPa (500 psi) 5 MPa (750 psi)
Resolución	±0.025% FSR			
Exactitud ⁴	±0.5% FSR (±0.1% FSR con una expresión polinómica)			
Linealidad:	±0.5% FSR (estándar), ±0.1% FSR (opcional)			
Rango excesivo:	1.5 x presión nominal			
Temperatura de funcionamiento:	-20 a +80 °C			
Rango de frecuencia de excitación	1400-3500 Hz			
Rango de frecuencia de salida	2000-3000 Hz			
Dimensiones de la celda: ² (área activa)	150 × 250 mm 6 × 10"	230 mm DE 9" DE	230 mm DE 9" DE	25 mm DE 5" DE
Resistencia de la bobina:	150 Ω			
Material:	Acero inoxidable 316			
Peso:	2.3 kg. (5 lbs.)	2.3 kg. (5 lbs.)	4.7 kg. (10.3 lbs.)	2.7 kg. (6 lbs.)
Cable eléctrico: ³	Dos pares trenzados (cuatro conductores trenzados), calibre 22 AWG. Protección de papel aluminio (con cuerda de drenaje), cubierta de PVC, DE nominal = 6.3 mm (0.250 pulgadas)			

TABLA 4: Especificaciones

Notas:

¹ Consulte con la fábrica para conocer otros rangos disponibles

² Consulte con la fábrica para conocer otros tamaños disponibles.

³ Consulte con la fábrica para conocer los tipos de cables alternativos.

⁴ La precisión declarada es la precisión del transductor de presión. La precisión total del sistema depende de muchos factores, como se discutió en la Sección 1.1.

A.2 TERMISTOR DE TEMPERATURA ESTÁNDAR

Rango: -80 to +150 °C

Exactitud: ±0.5 °C

APÉNDICE B. DERIVACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL TERMISTOR

RESISTENCIA DE TERMISTOR DE 3KΩ

Tipos de termistor:

- YSI 44005, Dale #1C3001-B3, Alpha #13A3001-B3
- Honeywell 192-302LET-A01

Ecuación para obtener la resistencia a la temperatura:

T = 1 / (A+B(LnR)+C(LnR^3)) - 273.15

ECUACIÓN 5: Resistencia de termistor de 3kΩ

Donde:

T = Temperatura en °C

LnR = Registro natural de la resistencia del termistor

A = 1.4051 x 10⁻³

B = 2.369 x 10⁻⁴

C = 1.019 x 10⁻⁷

Nota: Coeficientes calculados entre los -50 y los +150 °C.

Ohmios	Temp.	Ohmios	Temp.	Ohmios	Temp.	Ohmios	Temp.	Ohmios	Temp.
201.1 K	-50	15.72 K	-9	2221	32	474.7	73	137.2	114
187.3 K	-49	14.90 K	-8	2130	33	459.0	74	133.6	115
174.5 K	-48	14.12 K	-7	2042	34	444.0	75	130.0	116
162.7 K	-47	13.39 K	-6	1959	35	429.5	76	126.5	117
151.7 K	-46	12.70 K	-5	1880	36	415.6	77	123.2	118
141.6 K	-45	12.05 K	-4	1805	37	402.2	78	119.9	119
132.2 K	-44	11.44 K	-3	1733	38	389.3	79	116.8	120
123.5 K	-43	10.86 K	-2	1664	39	376.9	80	113.8	121
115.4 K	-42	10.31 K	-1	1598	40	364.9	81	110.8	122
107.9 K	-41	9796	0	1535	41	353.4	82	107.9	123
101.0 K	-40	9310	1	1475	42	342.2	83	105.2	124
94.48 K	-39	8851	2	1418	43	331.5	84	102.5	125
88.46 K	-38	8417	3	1363	44	321.2	85	99.9	126
82.87 K	-37	8006	4	1310	45	311.3	86	97.3	127
77.66 K	-36	7618	5	1260	46	301.7	87	94.9	128
72.81 K	-35	7252	6	1212	47	292.4	88	92.5	129
68.30 K	-34	6905	7	1167	48	283.5	89	90.2	130
64.09 K	-33	6576	8	1123	49	274.9	90	87.9	131
60.17 K	-32	6265	9	1081	50	266.6	91	85.7	132
56.51 K	-31	5971	10	1040	51	258.6	92	83.6	133
53.10 K	-30	5692	11	1002	52	250.9	93	81.6	134
49.91 K	-29	5427	12	965.0	53	243.4	94	79.6	135
46.94 K	-28	5177	13	929.6	54	236.2	95	77.6	136
44.16 K	-27	4939	14	895.8	55	229.3	96	75.8	137
41.56 K	-26	4714	15	863.3	56	222.6	97	73.9	138
39.13 K	-25	4500	16	832.2	57	216.1	98	72.2	139
36.86 K	-24	4297	17	802.3	58	209.8	99	70.4	140
34.73 K	-23	4105	18	773.7	59	203.8	100	68.8	141
32.74 K	-22	3922	19	746.3	60	197.9	101	67.1	142
30.87 K	-21	3748	20	719.9	61	192.2	102	65.5	143
29.13 K	-20	3583	21	694.7	62	186.8	103	64.0	144
27.49 K	-19	3426	22	670.4	63	181.5	104	62.5	145
25.95 K	-18	3277	23	647.1	64	176.4	105	61.1	146
24.51 K	-17	3135	24	624.7	65	171.4	106	59.6	147
23.16 K	-16	3000	25	603.3	66	166.7	107	58.3	148
21.89 K	-15	2872	26	582.6	67	162.0	108	56.8	149
20.70 K	-14	2750	27	562.8	68	157.6	109	55.6	150
19.58 K	-13	2633	28	543.7	69	153.2	110		
18.52 K	-12	2523	29	525.4	70	149.0	111		
17.53 K	-11	2417	30	507.8	71	145.0	112		
16.60 K	-10	2317	31	490.9	72	141.1	113		

TABLA 5: Resistencia de termistor de 3KΩ

APÉNDICE C. EFECTOS DE LA TEMPERATURA DE LA PRESIÓN DEL SUELO Y CÉLULAS DE Tensión

El siguiente tratamiento teórico no es de ninguna manera riguroso, hay algunas suposiciones y aproximaciones cuestionables, pero debería dar una idea de la magnitud del efecto térmico que se espera en las celdas de presión del suelo hidráulicas, enterradas en el suelo o instaladas en el contacto entre suelo y la estructura, y en celdas de tensión de concreto incrustadas en concreto.

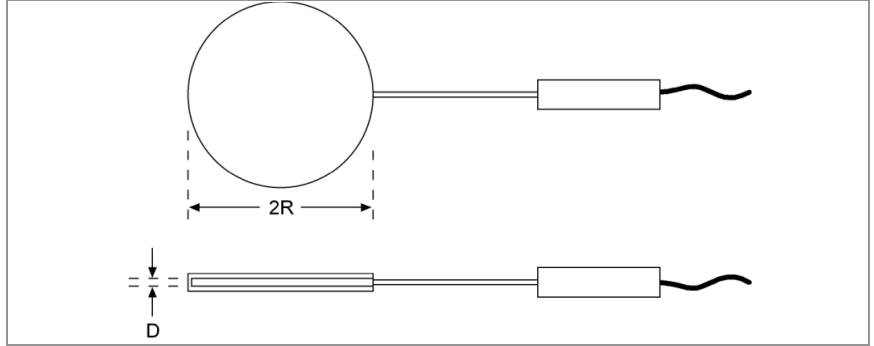


FIGURA 20: Radio (R) y Grosor (D)

C.1 FORMULAS

Considere una celda circular de radio (R) que contiene una película líquida de un grosor (D), coeficiente de expansión térmica K ppm / °C y coeficiente de volumen (G).

Para un aumento de temperatura de 1 °C, la expansión (YT) de la película líquida es dada por la ecuación:

$$YT = KD$$

ECUACIÓN 6: Expansión del líquido para un aumento de temperatura de 1 °C

La expansión del líquido es resistida por el confinamiento del medio circundante (suelo u concreto) y esto provoca un aumento de presión (P) en el líquido, así como una compresión del líquido (Y_c) dada por la ecuación:

$$Y_c = PD/G$$

ECUACIÓN 7: Compresión de líquido

La expansión neta (Y) de la celda es igual a:

$$Y = D (K - P/G)$$

ECUACIÓN 8: Expansión del líquido

La presión del líquido dentro de la celda provoca la deformación del medio circundante. La cantidad de deformación se puede cuantificar mediante la modificación de la fórmula encontrada en la Ecuación 6, donde la deformación (Y), producida por una presión uniforme (P), que actúa sobre un área circular, radio (R), sobre la superficie de un material con un coeficiente de elasticidad (E) y relación de Poisson (v), es dado por:

En el centro de la celda:

$$Y = \frac{2PR(1-v^2)}{E}$$

ECUACIÓN 9: Deformación en el centro

En el borde de la celda:

$$Y = \frac{4PR(1-v^2)}{\pi E}$$

ECUACIÓN 10: Deformación en el borde

Con una diferencia de:

$$PR(1 - v^2)(2 - 4/\pi)/E$$

ECUACIÓN 11: Diferencia de deformación

Las fórmulas anteriores se aplican a las presiones que actúan sobre una superficie libre. Sin embargo, en el caso limitado, Y, en el borde de la celda, se puede suponer que es casi cero. Por lo tanto, se supone que Y, en el centro, es el mismo que se muestra en la Ecuación 11.

Si se supone que la Y media a lo largo de la celda es la mitad de este valor, y si se supone que la deformación del medio a cada lado de la celda es la misma, entonces la expansión total promedio de la celda es dada por:

$$Y = 0.73 PR (1 - v^2) \times 0.5 \times 2/E = 0.73 PR (1 - v^2)/E$$

ECUACIÓN 12: Expansión total promedio de la celda

Al igualar la Ecuación 8 y la Ecuación 12 se obtiene:

$$P (D/G + 0.73 R (1 - v^2)/E) = KD$$

ECUACIÓN 13: Ecuaciones combinadas

Si un lado de la celda está en contacto con una estructura rígida, por ejemplo, un muro de contención de concreto o una zapata de puente de concreto, entonces:

$$Y = 0.73 PR (1 - v^2) \times 0.5/E = 0.36 PR (1 - v^2)/E$$

y

$$P (D/G + 0.36 R (1 - v^2)/E) = KD$$

Donde (E) pertenece al material del suelo.

Dado que estas expresiones son solo aproximadas, se pueden simplificar aún más:

Para todo $E < 10 \times 10^6$ psi, el término D/G es insignificante, siempre que la celda esté diseñada y construida correctamente, es decir, G es grande (no hay aire atrapado dentro de la celda) y D es pequeña. Además, el término $(1 - v^2)$ se puede reemplazar por 0.91 ya que v normalmente se encuentra entre 0.25 y 0.35.

La incrustación total es dada por:

$$P = 1.5 EKD/R \quad \text{psi} / ^\circ\text{C}$$

ECUACIÓN 14: Incrustación total

Y para las celdas de presión de contacto:

$$P = 3 EKD/R \quad \text{psi} / ^\circ\text{C}$$

ECUACIÓN 15: Incrustación total para las celdas de presión de contacto

Algunos valores típicos de los distintos parámetros son:

Líquido	$K \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$G \times 10^6 \text{ psi}$
Aceite	700	0.3
Mercurio	180	3.6
Agua	170	0.3
Glicol	650	0.26
50/50 Glicol/Agua	400	0.28
Material de incrustación	$E \times 10^6 \text{ psi}$	v
Arcilla plástica	0.003	
Suelo	0.001 to 0.02 [Ref 2]	0.25 to 0.45
Arena	0.02 to 0.06 [Ref 3]	0.28 to 0.35
Arena de Ottawa compact	0.2	
Roca erosionada	0.04 to 0.11 [Ref 4]	
Concreto	5.0	0.25

TABLA 6: Valores típicos de varios parámetros de celda

C.2 EJEMPLOS

Para una celda llena de aceite, nueve pulgadas de diámetro y $D = 0.060$ pulgadas, totalmente incrustada en:

(Para celdas de presión de contacto, multiplica los valores de P por dos).

Arcilla plástica:

$$E = 3000 \text{ psi}$$

$$\nu = 0.3$$

$$P = 0.042 \text{ psi / } ^\circ\text{C}$$

Suelo, rigidez media:

$$E = 10000 \text{ psi}$$

$$\nu = 0.3$$

$$P = 0.138 \text{ psi / } ^\circ\text{C}$$

Arena gruesa:

$$E = 50000 \text{ psi}$$

$$\nu = 0.3$$

$$P = 0.69 \text{ psi / } ^\circ\text{C}$$

Para una celda de tensión de concreto llena de aceite, nueve pulgadas de diámetro y $D = 0.020$ pulgadas totalmente incrustada en:

Concreto:

$$E = 5 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$\nu = 0.25$$

$$P = 22.7 \text{ psi / } ^\circ\text{C}$$

Medio completamente rígido:

$$P = 210 \text{ psi / } ^\circ\text{C}$$

Para la misma celda, llena de mercurio en lugar de aceite:

Concreto:

$$P = 5.8 \text{ psi / } ^\circ\text{C}$$

Medio completamente rígido:

$$P = 650 \text{ psi / } ^\circ\text{C}$$

REFERENCIAS:

[1] Roark, R.J. and Young, W.C. "Formulas for Stress and Strain," McGraw Hill, quinta edición, 1982, p 519.

[2] Weiler, W.A. and Kulhawy, F.H. "Factors Affecting Stress Cell Measurement in Soil" J. Geotech. Eng. Div. ASCE. Vol. 108, No. GT12, Dec., pp1529-1548.

[3] Lazebnik, G.E., "Monitoring of Soil-Structure Interaction." Chapman & Hall. pp 224.

[4] Fujiyasu, Y. and Orihara, K. "Elastic Modulus of Weathered Rock." Proc. of the 5th Intl. Symp. on Field Measurements in Geomechanics - Singapore 1999. p 183.

APÉNDICE D. NO LINEALIDAD Y USO DE UN POLINOMIO DE SEGUNDO ORDEN PARA MEJORAR LA EXACTITUD DE LA PRESIÓN CALCULADA

La mayoría de los transductores de presión de cuerda vibrante son lo suficientemente lineales (0.2% F.S.) para que el uso de factores lineales de calibración cumplan con los requerimientos normales. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que la precisión de los datos de calibración, que son dictados por la precisión en la calibración del aparato, siempre es de 0.1% F.S.

Este nivel de precisión se puede recapturar, aún cuando el transductor es no lineal, usando una expresión polinómica de segundo orden que se ajusta mejor a los datos que una línea recta. La expresión polinómica tiene la forma:

$$\text{Presión} = AR^2 + BR + C$$

ECUACIÓN 16: Cálculo de presión con polinomio de segundo orden

En donde:

R es la lectura (dígitos canal B)

A, B y C son los coeficientes

La Figura 19 muestra una hoja de calibración típica de un transductor que tiene muy poca no linealidad. La figura bajo la columna "Linealidad (%FS)" es:

$$\frac{\text{Presión calculada} - \text{Presión real}}{\text{Presión de escalacompleta}} \times 100\% = \frac{G(R_1 - R_0) - P}{\text{F.S.}} \times 100\%$$

ECUACIÓN 17: "Linealidad (%F.S.)" en Hoja de calibración

Nota: La linealidad se calcula usando la regresión cero para R_0 mostrada en la hoja.

Por ejemplo, de la hoja típica que se muestra en la Figura 19:

$$P = 210 \text{ kPa}, G(R_1 - R_0) = -0.1192(7223 - 8983)$$

Da una presión calculada de 209.8 kPa, el error es de 0.2 kPa.

Mientras que la expresión polinómica da una presión calculada de:

$$A(7223)^2 + B(7223) + 1053 = 209.9 \text{ kPa}$$

El error real es de solo 0.1 kPa.

Sin embargo, esta es una mejora insignificante cuando la no linealidad es mayor, por ejemplo

$\pm 0.25\%$ F.S., la mejora podría ser significativa.

Nota: Si se usa la ecuación polinómica es importante que el valor de C, en la ecuación polinómica, se tome en el campo, siguiendo los procedimientos descritos en la Sección 2.2.5. El valor de campo de C se calcula ingresando la lectura inicial cero de campo en la ecuación polinómica con la presión, P, configurada en cero.

Si la lectura cero del campo no está disponible, calcule C usando la lectura de presión cero en la hoja de calibración. En el ejemplo anterior, el valor de C se derivaría de la ecuación:

$$0 = A(8981)^2 + B(8981) \text{ de la cual } C = +1053$$

ECUACIÓN 18: Cálculo de C utilizando la lectura de presión cero de la hoja de calibración

Debe tomarse en cuenta que cuando se están monitoreando los cambios de las presiones de suelos, existe poca diferencia si se usa el coeficiente lineal o la expresión polinómica.