

Instrumentación virtual de bajo costo aplicada a equipos de consolidación unidimensional de suelos

Low-cost virtual instrumentation applied to one-dimensional soil consolidation equipment

*Alondra Martínez Rojas**

ROR Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

alondra.martinez@umich.mx

 <https://orcid.org/0009-0006-5373-363X>

Recepción: 29 de mayo de 2024

Aprobación: 30 de mayo de 2025



Nelio Pastor Gómez

ROR Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

npastor@umich.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-3293-672X>

Carlos Chávez Negrete

ROR Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

cachavez@umich.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-3932-6943>

RESUMEN

Se instrumentan tres consolidómetros unidimensionales de suelos con un sistema virtual de bajo costo basado en sensores LVDT, Arduino y LabVIEW con el objetivo de reacondicionar equipos convencionales y automatizar la adquisición de datos. Además, se desarrolla una interfaz gráfica que permite registrar en tiempo real la deformación del suelo para mejorar la precisión mediante lecturas en intervalos cortos y reducir la intervención del operador. Las pruebas comparativas con equipos tradicionales validaron la eficacia del sistema. Se concluye que esta instrumentación representa una alternativa económica, precisa y funcional frente a los equipos comerciales de alto costo. PALABRAS CLAVE: instrumentación virtual, consolidómetro, arduino, registros, asentamientos.

ABSTRACT

Three one-dimensional soil consolidometers were equipped with a low-cost virtual system using LVDT sensors, Arduino, and LabVIEW modernize conventional equipment and automate data acquisition. A graphical interface was developed to record real-time soil deformation, improving accuracy with short-interval readings and reducing operator involvement. Comparative tests with traditional equipment validated the system's effectiveness. It is concluded that this instrumentation is an economical, accurate, and functional alternative to high-cost commercial systems.

KEYWORDS: instrumentation, oedometer, arduino, readings, settlements.

INTRODUCCIÓN

La mecánica de suelos es la aplicación de la ciencia física que combina la ingeniería mecánica, las propiedades y el comportamiento de masas de suelo sometidas a diferentes tipos de fuerzas con la finalidad de conocer las características del material sobre el que se va a construir cualquier tipo de estructura (Das, 2017). Las características físicas de los suelos pueden determinarse mediante pruebas de laboratorio y, junto con la aplicación de métodos de análisis, es posible predecir su comportamiento en condiciones de trabajo definidas (Head, 1992) que ayudarán en el diseño y seguridad de toda obra civil. Cuando los suelos están sometidos a esfuerzos, se

*AUTORA PARA CORRESPONDENCIA

alondra.martinez@umich.mx

producen deformaciones e incluso, cuando es liberado ese esfuerzo, se recuperan parte de las deformaciones y otras son permanentes. Por lo general, en los materiales elásticos la respuesta bajo carga es instantánea; sin embargo, otros materiales requieren un tiempo relativamente largo para que se produzcan deformaciones (Head, 1992; Holtz y Kovacs, 1981). La deformación vertical total en la superficie resultante de la carga se llama *asentamiento* (Holtz y Kovacs, 1981).

En el diseño de cimentaciones para estructuras de ingeniería, interesa conocer la magnitud del asentamiento y su evolución (Das, 2017). Un asentamiento excesivo es capaz de causar daños estructurales, en especial si dicho asentamiento ocurre con rapidez. Al incrementar la carga, se presenta un desplazamiento vertical que puede ser hacia abajo, en el caso de que la carga produzca una expulsión de agua; a este proceso se le conoce como *consolidación*. También, puede ser hacia arriba cuando el suelo absorbe y/o adsorbe agua a su interior (proceso llamado *expansión*) (Holtz y Kovacs, 1981). Para fines analíticos, la consolidación de arcillas bajo carga en función del tiempo se divide en tres fases: compresión inicial, consolidación primaria y consolidación secundaria, representadas en la curva característica típica (figura 1). Definir la magnitud de la consolidación primaria y de la curva de consolidación primaria versus tiempo, junto con los parámetros derivados, es uno de los principales objetivos de una prueba de consolidación de laboratorio (Head y Epps, 2011).

El método de prueba se describe en la norma ASTM D2435 M-11 (2020) “Métodos de prueba estándar para propiedades de consolidación unidimensional de suelos mediante carga incremental” (ASTM International, 2020). El ensayo se realiza mediante la aplicación de una serie de 4 a 8 cargas verticales a un espécimen de suelo, el cual está confinado lateralmente por medio de un anillo. La deformación vertical se observa y registra de forma manual durante un periodo, generalmente de 24 horas, para cada incremento de carga. El consolidómetro consiste esencialmente en un anillo rígido (construido en material inoxidable) en donde se coloca el espécimen de suelo; cuenta con superficie de drenaje (superior e inferior), que en general son discos de piedras porosas, una placa de carga y un recipiente exterior que contiene agua en la que se puede sumergir el conjunto.

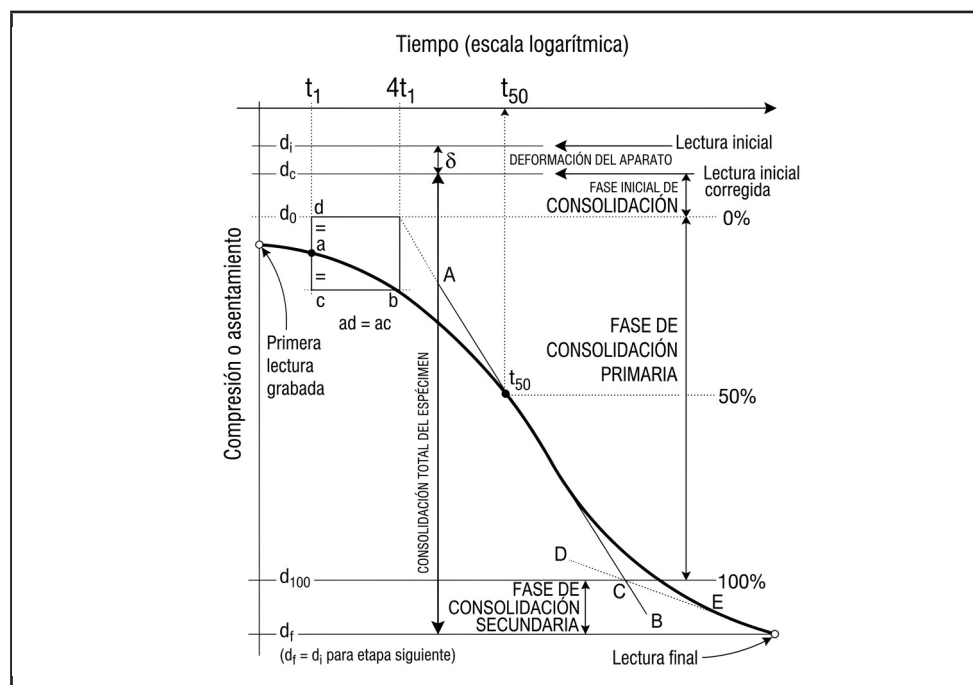


FIGURA 1
Curva típica de consolidación
Fuente: modificado de Head y Epps, 2011.

El consolidómetro, también conocido como edómetro, más utilizado es el de palanca tipo Bishop. En este dispositivo la carga aplicada sobre la muestra de suelo se efectúa mediante un brazo de palanca que sostiene pesas, el cual está conectado a un sistema de medición que registra la deformación vertical del suelo. En un consolidómetro mecánico “convencional” (figura 2) se requiere de largas jornadas de trabajo para las pruebas debido a que la captura de datos es manual, lo que hace necesario que el operador mida constantemente durante toda la ejecución de la prueba.

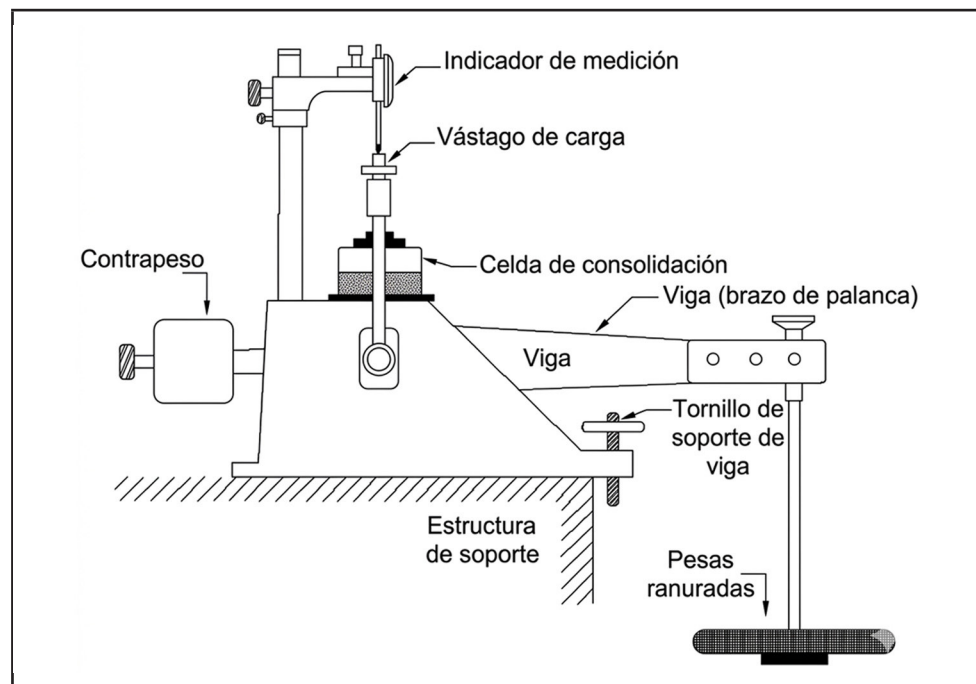


FIGURA 2

Esquema del equipo convencional de consolidación

Fuente: modificado de Head y Epps, 2011.

En la actualidad, numerosos laboratorios llevan a cabo mediciones mediante equipos instrumentados electrónicamente con captura y almacenamiento de datos en computadoras; sin embargo, estos equipos suelen tener un costo elevado. Por otro lado, los equipos mecánicos convencionales están siendo progresivamente desplazados. Una opción para reacondicionar los equipos y mejorar la captura de datos es reemplazar el equipo de medición con sensores electrónicos, lo que reduce la intervención y el tiempo invertido por parte del operador durante la prueba. Estos sensores permiten obtener resultados más precisos al tomar lecturas en intervalos de tiempo muy pequeños.

Karimpour-Fard *et al.* (2020) presentan el diseño, fabricación y calibración de un consolidómetro neumático. Para la adquisición de datos, el edómetro está equipado con transductores de presión de poros, celdas de presión lateral y normal y un transductor de desplazamiento lineal tipo LVDT, que hicieron posible obtener datos más exactos sobre el comportamiento de los materiales al minimizar errores humanos en la medición manual.

Jastrzebska (2021) menciona que las mediciones hechas durante las pruebas geotécnicas con el uso de sensores permiten la determinación de valores reales de parámetros en un estado controlado y homogéneo. Su implementación mejora los laboratorios con aparatos modernos para medir deformaciones y la posibilidad de modernizar dispositivos estándar. Algunos sensores miden desplazamiento y velocidad y su funcionamiento está basado en una bobina de una sola capa hecha de acero de resorte con un núcleo magnético fijo que opera junto con un oscilador. Nurkowski y Nowakowski (2023) implementaron estos tipos de sensores en un equipo triaxial de suelos, destacaron sus ventajas frente a otros sensores comerciales y compararon su rendimiento con diferentes tipos de sensores de desplazamiento. Asimismo, demostraron que su diseño permite alta resolución, estabilidad y reducción de errores debido a la fricción.

A pesar de la evolución de los sistemas de medición en laboratorios geotécnicos, principalmente en términos de precisión, aún existen desafíos en términos de costo y adaptabilidad a diferentes equipos (Isah y Mohamad, 2021). Por lo anterior, el objetivo principal de este artículo es una instrumentación virtual semiautomática de bajo costo para tres equipos de consolidación unidimensional de suelos con el *software* LabVIEW y el microcontrolador Arduino Uno.

1. INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

La instrumentación virtual combina tecnologías de detección, *hardware* y *software* con tecnologías computacionales para crear soluciones de instrumentación definidas por un usuario, aplicables en el control y monitoreo (Obrenovic *et al.*, 2006; Saravanakumar *et al.*, 2009). Las industrias con procesos automatizados, como plantas químicas o de fabricación, utilizan instrumentación virtual con el objetivo de mejorar la productividad, confiabilidad, seguridad, optimización y estabilidad del sistema.

La instrumentación virtual desarrolla un sistema computarizado de prueba y medición para controlar desde una computadora un dispositivo de *hardware* de medición externo. Además de muestra, prueba o mide datos recopilados por el dispositivo externo en paneles similares a instrumentos en pantalla de computadora (Jerome, 2010). En la figura 3 se muestra el esquema de un instrumento virtual.

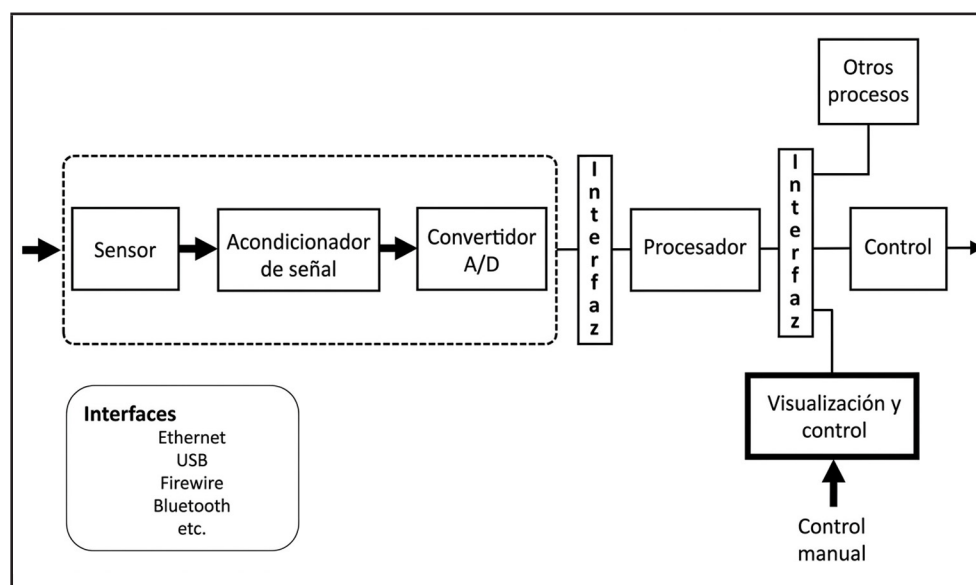


FIGURA 3

Esquema de un instrumento virtual

Fuente: modificado de SaravanaKumar *et al.*, 2009.

LabVIEW es un *software* con lenguaje de programación gráfico, desarrollado por National Instruments, que emplea íconos en lugar de texto para crear aplicaciones. Está basado en la interacción del usuario con interfaces computacionales gráficas para el control y monitoreo de sistemas físicos, la cual ofrece mayores ventajas respecto a los lenguajes tradicionales (Goldberg, 2000). En general, los programas desarrollados en LabVIEW se denominan *Instrumentos Virtuales* (VI). Los VI contienen dos componentes principales, el panel frontal y el diagrama de bloques: el primero es la interfaz de usuario y el diagrama de bloques contiene el código fuente gráfico (Saravanakumar *et al.*, 2009). LabVIEW está totalmente integrado para la comunicación con *hardware* y placas de adquisición de datos.

2. METODOLOGÍA

La técnica propuesta de instrumentación virtual se elaboró con una tarjeta de adquisición de datos Arduino Uno, que es una placa de bajo costo (Motahhir *et al.*, 2017), donde las mediciones se pueden adquirir de forma directa en tiempo real. La corriente y el voltaje se obtienen a través de un sistema de sensores de desplazamiento lineal tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer), un circuito divisor de tensión, una fuente de alimentación externa y *software* de programación gráfica LabVIEW. Como cualquier sistema integrado, el sistema de instrumentación virtual en tiempo real propuesto está dividido en dos partes: *hardware* y *software*.

2. 1. Hardware

Para adquirir las mediciones de desplazamiento a través del LVDT, se requieren diferentes componentes que contemplen las conexiones, circuito electrónico y calibraciones. La placa Arduino Uno se puede alimentar mediante una fuente de alimentación a corriente directa (CD) o mediante una conexión USB con una computadora. Esta placa proporciona 14 pines de entrada/salidas digitales y 6 entradas analógicas y es posible programarla mediante el *software* Arduino IDE.

2. 1. 1. Conexiones y circuito electrónico

El sensor utilizado es el transductor de desplazamiento en miniatura modelo S3C DC-DC de la marca Honeywell. Tiene un rango de carrera total de $\pm 2.54\text{mm}$ a 10.16mm con salida de $\pm 5\text{ V CD}$ o 0 a 10 V CD . Funciona con una fuente de alimentación doble de $\pm 12\text{ V CD}$ a $\pm 20\text{ V CD}$ o una sola fuente de alimentación de 24 a 40 V CD , con cable multiconductor blindado de 6 ft de longitud (Honeywell, 2009). De acuerdo con su código de colores (tabla 1), se procedió a elaborar el diagrama de cableado. Debido a que el voltaje de salida del LVDT es de 0V a 10V y la placa Arduino únicamente maneja salida de 0V a 5V , fue necesario implementar un divisor de tensión que reduzca el voltaje de salida del sensor para evitar daños en el microcontrolador y asegurar una medición precisa.

TABLA 1
Código de colores del sensor de desplazamiento LVDT

Color del cable	Alimentación doble	Alimentación sencilla	Salida
Rojo	Entrada 12V a 20 V	Entrada 24V a 40V	...
Azul	Entrada -12V a -20 V	Alimentación negativa	...
Negro	Común 0V , I/P, O/P	...	...
Amarillo	...	...	0V a 10V

Fuente: Honeywell, 2009.

El divisor de tensión es un circuito lineal pasivo que produce un voltaje de salida fraccionado del voltaje de entrada. La división de voltaje es el resultado de distribuir el voltaje de entrada entre los componentes del divisor (Zetina y Zetina, 1999). Se usaron dos resistencias en serie. El voltaje de entrada se aplicó a través de ellas y el voltaje de salida se obtuvo de su conexión. Para el cálculo del voltaje de salida se utilizó la ec. (1), cuyo valor equivale al voltaje de entrada escalado por la razón de las resistencias: la resistencia inferior dividida entre la suma de las dos resistencias. Basada en la incógnita de la corriente de acuerdo con la ley de Ohm y partiendo de la propiedad aditiva de las resistencias en serie:

$$v_s = v_e \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

Donde v_s es el voltaje de salida [V], v_e el voltaje de entrada [V], R_1 y R_2 representan las resistencias conectadas en serie, superior e inferior respectivamente [Ω]. Para este caso en particular, el voltaje de entrada fue de 10V, las resistencias utilizadas fueron de $5k\Omega$ (resistencias de precisión con tolerancia de $\pm 0.1\%$), de donde se obtuvo un voltaje de salida de 5 V (figura 4).

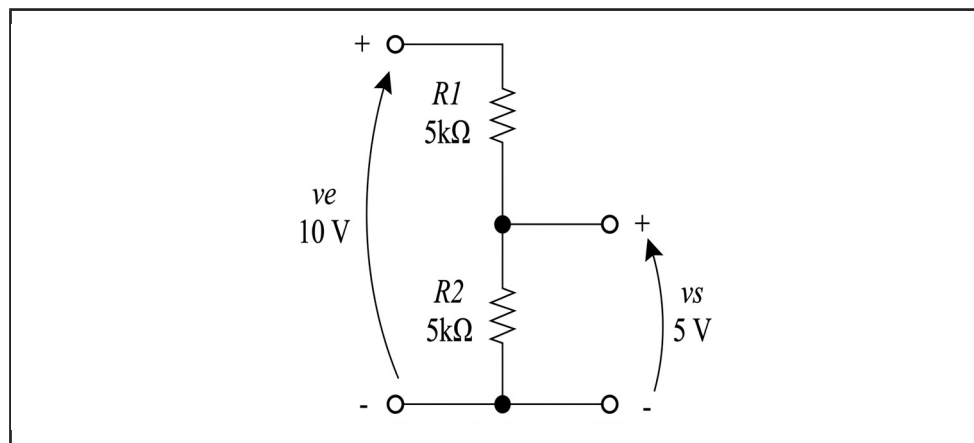


FIGURA 4

Diagrama de divisor de tensión

Fuente: elaboración propia.

Cuando el LVDT entrega su máxima salida de 10V, el divisor de tensión lo reduce exactamente a 5V, lo cual asegura que el voltaje esté dentro del rango aceptable para la entrada analógica del Arduino. Es importante resaltar que se recurrió a resistencias de precisión con tolerancia de $\pm 0.1\%$ para minimizar errores en la reducción del voltaje. Además, el cálculo teórico del divisor coincide con el rango requerido por el conversor analógico-digital (ADC) del Arduino, y así garantizar una conversión confiable.

El ADC del Arduino tiene una impedancia de entrada del orden de $100M\Omega$, lo que significa que el divisor de tensión no afecta significativamente la impedancia de entrada de la tarjeta de adquisición de datos. La corriente consumida por el divisor de tensión es baja (1 mA), lo cual es ideal considerando la salida de alta impedancia del sensor. Se utilizó una fuente de alimentación estable de 24V para el LVDT y asegurar una salida de voltaje consistente. El divisor de tensión diseñado es suficiente y adecuado para la aplicación debido a que reduce el voltaje de 10V a 5V con precisión y no introduce errores significativos debido a la alta impedancia de entrada del ADC, por lo que no es necesario un circuito más complejo (como amplificadores operacionales o convertidores de nivel), ya que el divisor de tensión cumple eficazmente con su función. En la figura 5 se muestra el diagrama de cableado completo. Con la finalidad de simplificar el esquema, solo se presenta para un solo sensor de desplazamiento lineal.

En la figura 5 se conecta el cable amarillo al canal analógico A0, el cable negro a tierra (GND), el rojo a la fuente de alimentación positiva y el azul a la negativa, pasando previamente los cables amarillo y negro por el divisor de tensión. El proyecto se hizo por triplicado, es decir, se instrumentaron tres consolidómetros, de tal manera que cada uno funcione individualmente con la misma fuente de alimentación y operados desde la misma computadora. Para el montaje de las tarjetas, se utilizó un gabinete de alta especificación con la finalidad de asegurar la protección contra el polvo, agua e impactos y a través de sistemas de pasamuros se realizaron las conexiones correspondientes (figura 6).

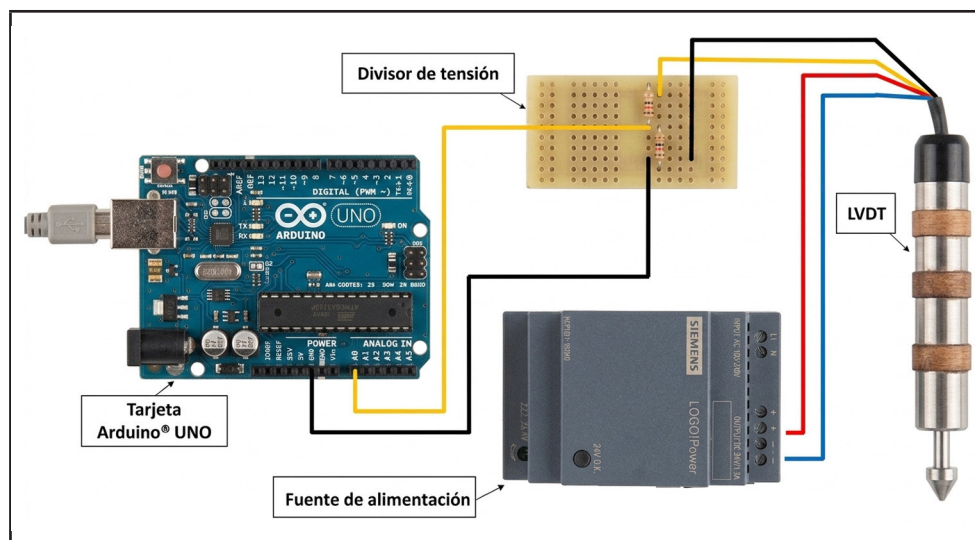


FIGURA 5
Diagrama de cableado
Fuente: elaboración propia.

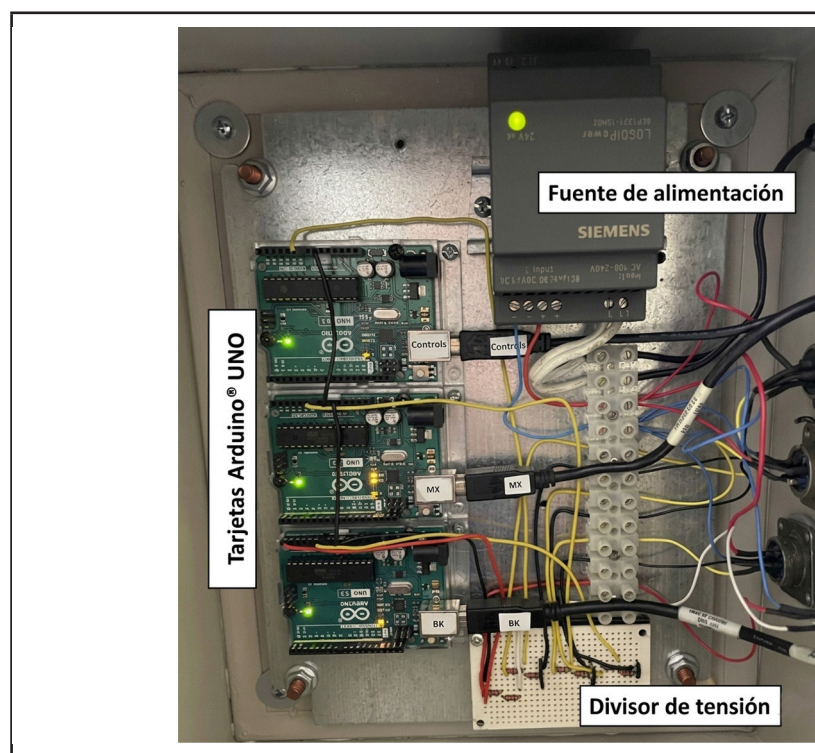


FIGURA 6
Conexiones y cableado final
Fuente: elaboración propia.

2. 2. Calibración del sensor de desplazamiento

Un método para calibrar el sensor de forma efectiva consiste en emplear una serie de puntos para ajustar una recta que describa la relación entre los valores eléctricos y físicos. Para ello se utilizaron diez valores de desplazamiento registrados con un micrómetro de la marca Controls (82-D1254), que es un medidor de cuadrante estándar con

rango de medición de 12.57 mm y 0.01 mm de precisión con certificado de calibración por el fabricante y diagrama de sistema de trazabilidad a escala continua.

En la figura 7 se muestra la medición con micrómetro y el sensor al mismo tiempo para obtener los puntos de calibración. Los valores medidos con el micrómetro se trazaron contra su correspondiente señal de voltaje de corriente directa registrada con el LVDT (tabla 2). Se graficaron los valores de calibración en la figura 8. En dicha gráfica se tiene en las abscisas el valor de entrada de voltaje en voltios, mientras que en el eje de las ordenadas se representa el valor de salida del desplazamiento en milímetros. La ecuación resultante fue $y = 2.07x + 1.47$, donde x representa el voltaje de entrada y y el desplazamiento. La ecuación corresponde a un ajuste lineal, cuyo coeficiente de correlación (R^2) fue de 0.99.

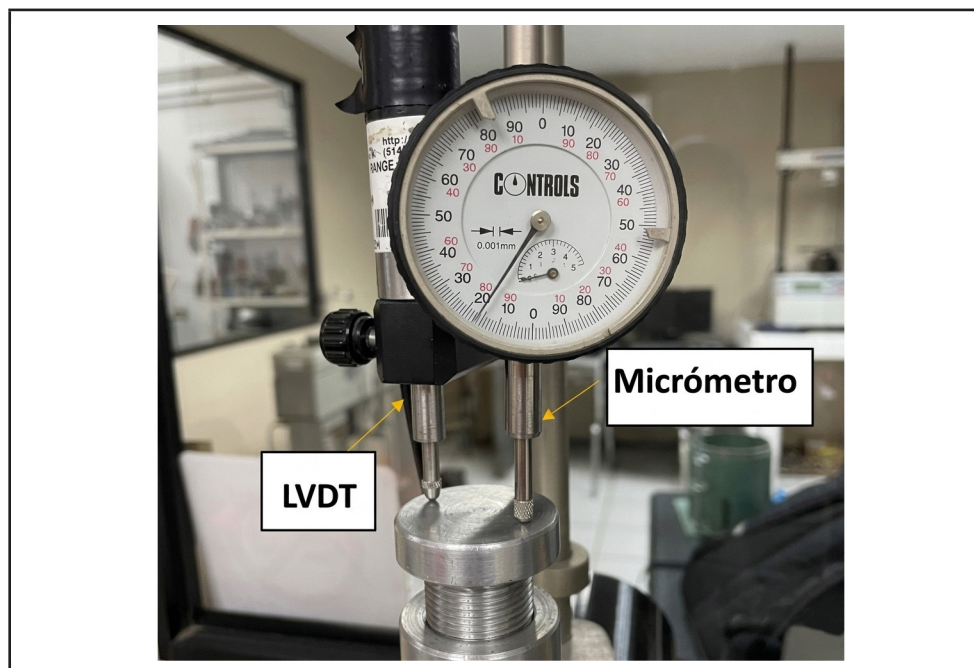


FIGURA 7

Medición de desplazamiento con micrómetro y LVDT

Fuente: elaboración propia.

El conversor analógico-digital (ADC) de la placa Arduino Uno tiene una resolución de 10 bits, lo que significa que convierte una señal analógica en 1 024 niveles discretos ($2^{10} = 1\,024$), cuyo rango de entrada del ADC es de 0-5V, lo cual significa una resolución aproximada de 4.88 mV por nivel. Al utilizar la ecuación de calibración, se determina la resolución del desplazamiento ($4.88 \times 2.07 = 10.1 \mu\text{m}/\text{nivel}$); esto indica que la mínima variación de desplazamiento detectable por el sistema es aproximadamente $10.1 \mu\text{m}$, suficiente para este tipo de aplicaciones. Si el sistema requiriera una mayor resolución, sería recomendable un ADC de mayor número de bits (12, 16 o más) o un amplificador de señal antes de la conversión A/D. La calibración con un micrómetro confirmó que la relación de conversión de voltaje a desplazamiento es precisa y estable.

TABLA 2

Lecturas con micrómetro (mm) y LVDT (V)

LVDT (V)	0.04	0.49	1.12	1.74	2.32	3.04	3.62	4.19	4.79	5.0
Micrómetro (mm)	1.50	2.54	3.81	5.08	6.35	7.62	8.89	10.16	11.43	11.84

Fuente: elaboración propia.

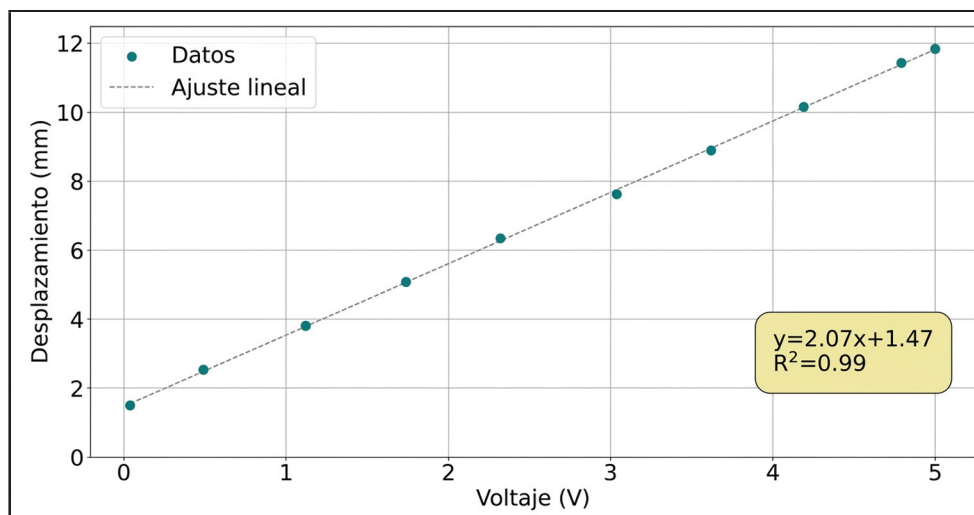


FIGURA 8

Curva de calibración del sensor de desplazamiento lineal LVDT

Fuente: elaboración propia.

2. 3. Software

Dentro del *software* de LabVIEW podemos encontrar una interfaz para comunicarse con plataformas embebidas comunes, cuyo nombre es Linx. En este proyecto se trabajó con dicha interfaz para lograr la instrumentación virtual. Es importante tener presente que cada bloque que se emplea del paquete de Arduino instalado en LabVIEW representa una función tal cual del lenguaje de Arduino, y cada entrada del bloque en LabVIEW representa los parámetros de entrada para dicha función.

2. 3. 1. Panel frontal

El panel frontal es la pantalla final con la que el usuario interactúa durante la ejecución de la prueba, e incluye controles e indicadores. En este trabajo el panel frontal se dividió en cuatro partes: indicadores de valores de entrada, datos de la prueba, ejecución de la prueba y reinicio (figura 9). Los indicadores de entrada son el ingreso de voltaje y su correspondiente conversión a deformación en milímetros. Adicionalmente, se introdujo de manera visual una barra del desplazamiento que el LVDT va teniendo, con su respectiva etiqueta de nombre para diferenciar cada consolidómetro (figura 10). En la figura 11 se muestra la parte de los datos de la prueba, que consiste en configurar y guardar; el programa proporciona un archivo de hoja de cálculo (extensión .xls) con dos columnas, una de tiempo (segundos) y otra de deformación del espécimen de suelo (milímetros). Se establece la duración de la prueba para que el programa se detenga una vez que se cumpla dicho tiempo indicando el número de lecturas hechas. Se tienen dos intervalos de registro de lecturas, uno variable y otro fijo.

El intervalo variable se encuentra dividido en tres lapsos: a) el primero, registra una lectura por segundo durante 60 segundos; a partir del segundo 61, el periodo de registro se tiene lugar en los incrementos de tiempo equivalentes a potencias de 2, es decir, 2, 4, 8, 16, etc.; esto es, se obtienen registros en los segundos 61, 63, 67, 75 y así sucesivamente hasta el segundo 300. Finalmente, en el último lapso se toma una lectura cada 300 segundos hasta el término de la prueba. El segundo intervalo es fijo y se establece el tiempo en segundos al que se desea registrar una lectura. El programa puede cambiar de un intervalo a otro durante la ejecución de la prueba. De acuerdo con la ASTM D2435-11 (ASTM International, 2020), las mediciones deben llevarse a cabo con la suficiente frecuencia para obtener datos precisos sobre la respuesta del suelo, en intervalos específicos según la naturaleza de la prueba. En este artículo se propone una frecuencia de registros de lecturas mayor con la finalidad de tener continuidad

en los resultados y así detectar cambios más pequeños en la deformación. Se sigue lo estipulado por la norma con intervalos de medición más cortos al inicio del ensayo cuando las deformaciones son rápidas. Posteriormente, los intervalos se van alargando a medida que el proceso de consolidación se estabiliza y las deformaciones se vuelven más lentas.

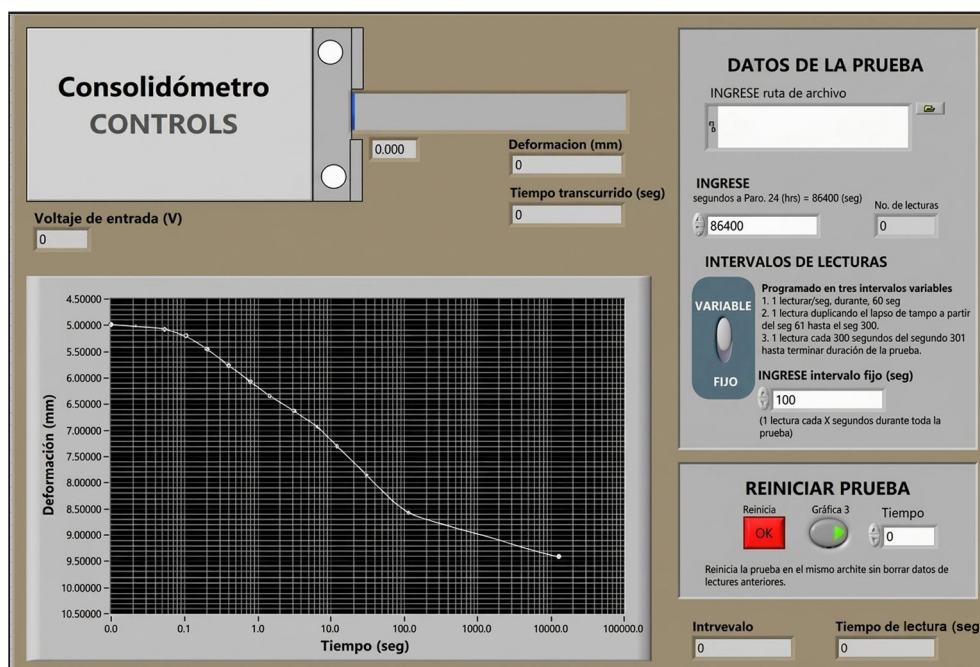


FIGURA 9
Desarrollo del panel frontal
Fuente: elaboración propia.

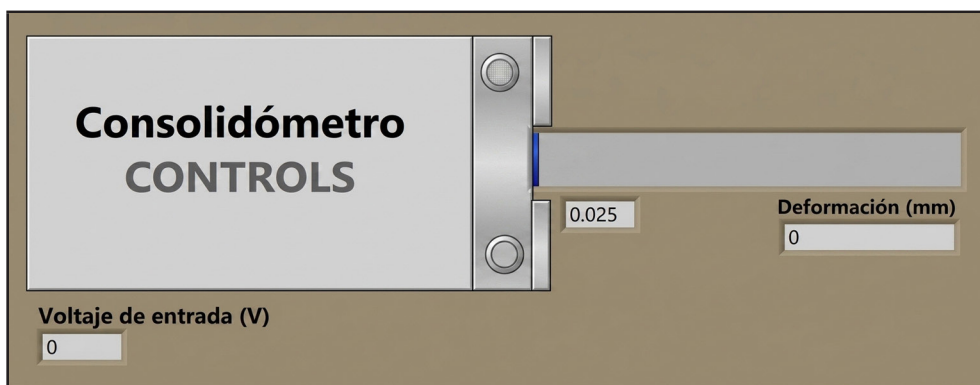


FIGURA 10
Indicadores de valores de entrada
Fuente: elaboración propia.

Durante la prueba, se visualiza en tiempo real cómo se deforma la muestra mediante una gráfica semilogarítmica [$\log(\text{tiempo})$ vs deformación (mm)]. Esta representación es útil al principio de la consolidación porque las deformaciones ocurren muy rápido. La escala logarítmica comprime estas variaciones de tiempo iniciales y amplía las fases más lentas del proceso para verlas mejor. De esta manera, se mejora la visualización tanto de las fases rápidas como de las lentas y ayuda a la identificación de anomalías de manera más clara. Además, se respeta el formato ampliamente utilizado en la ingeniería geotécnica (representación típica de la prueba de consolidación). Dentro del mismo panel frontal (figura 9), se incluye un indicador para el tiempo transcurrido un indicador para el intervalo

de tiempo y un indicador del registro de lecturas capturado. Se cuenta con la opción de reiniciar el tiempo de las lecturas sin perder los datos previamente registrados mediante dos botones: el primero para reiniciar el tiempo a 0 en la misma prueba y el otro botón nos permite visualizar o dejar de visualizar la gráfica. El reinicio del tiempo a 0 en la gráfica tiene como propósito esclarecer y reorganizar los datos de la prueba, además de ser útil para separar las fases del ensayo, establecer un punto de referencia o evitar confusión con datos previos. Por otro lado, dejar de visualizar la gráfica ayuda a reducir la sobrecarga visual y a optimizar los recursos computacionales del sistema.

FIGURA 11

Datos de la prueba

Fuente: elaboración propia.

2. 3. 2. Diagrama de bloques

Una vez terminado el panel frontal, se realiza la programación gráfica mediante los bloques de comandos. El diagrama de bloques incluye cables, íconos, funciones y la interfaz Linx aplicada para la conexión con Arduino. Para este trabajo, el diagrama de bloques se divide en las siguientes partes: ciclos, interfaz, conversión de datos, tiempo, reinicio, ejecución, creación del archivo para el almacenamiento e intervalos de lecturas (figura 12).

Dentro del diagrama de bloques, se crea la estructura principal y se conecta la interfaz con Arduino. Para ello, previamente fue necesario descargar el programa Linx. Luego en la placa Arduino, se inicializa la interfaz, seguido de la lectura y cierre. Se realizan las conexiones correspondientes y se establece una constante en la entrada VISA Resource con la finalidad de establecer el puerto COM correspondiente a la conexión de la placa Arduino.

Para determinar el valor del registro que se almacenará, se utiliza la media móvil de la serie temporal, la cual suaviza las fluctuaciones de las lecturas, ya que la tasa de muestreo es de 100 datos por segundo, lo cual nos permitirá almacenar menos datos sin perder información. Otra alternativa es el filtrado activo o digital, el cual es necesario cuando se requieren características específicas de filtrado como selección de frecuencia, bajo desfase o precisión en la eliminación de ruido, especialmente en aplicaciones de alta frecuencia o cuando el ruido es de tipo específico.

En cambio, el método de media móvil es adecuado para situaciones más simples donde el ruido es general y se prefiere una implementación sencilla. Además, el sensor de desplazamiento LVDT utilizado tiene una alta resolución y estabilidad, por lo que el ruido en las mediciones no es significativo.

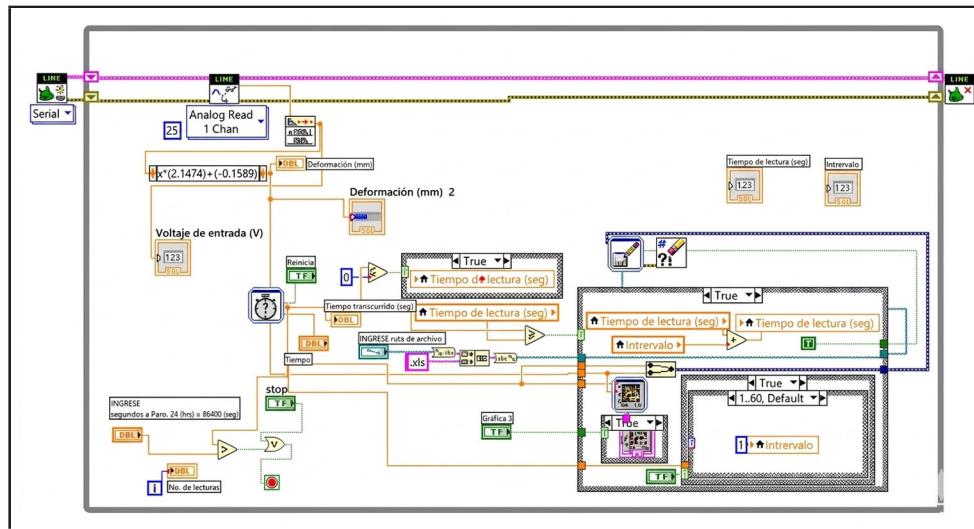


FIGURA 12

Programación gráfica general mediante diagrama de bloques

Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó, en el programa se establece un intervalo fijo para registro de lecturas; sin embargo, la tasa de muestreo se mantiene constante. Si solo se toma una lectura en lugar de un conjunto de datos a lo largo de todo el proceso, las fluctuaciones en los resultados reflejarían variaciones no relacionadas con el proceso real de consolidación, sino con errores de medición o variabilidad temporal.

Dentro del mismo diagrama de bloques se crea una nueva estructura para establecer la ecuación de calibración del sensor de desplazamiento; cabe resaltar que dicha ecuación es propia de cada dispositivo y se tuvo que determinar para los tres sensores LVDT usados. Se conectan el “indicador gráfico de deformación” y el “indicador numérico de deformación”, ambos previamente creados en el panel frontal a la salida de la ecuación de calibración.

En la figura 13 se muestra el proceso de conexión. Hasta este punto ya se tiene creado un instrumento virtual para la lectura y conversión de voltaje de un sensor de desplazamiento utilizando una tarjeta de adquisición de datos Arduino Uno mediante la programación gráfica en LabVIEW.

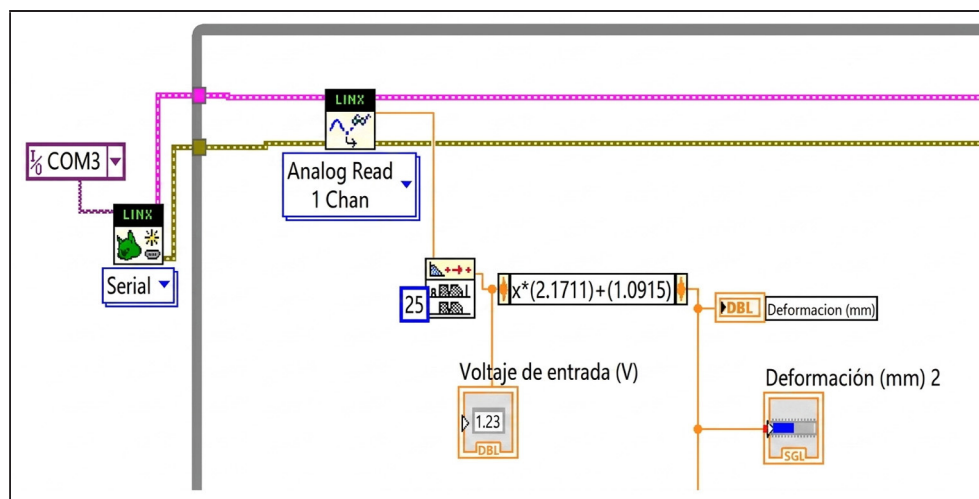


FIGURA 13

Estructura de lectura y conversión de datos de voltaje

Fuente: elaboración propia.

Para establecer el tiempo, ya sea para contabilizar el transcurrido, para indicar el instante de cada lectura o para el reinicio de la prueba, se realizó a través del comando Elapsed Time (figura 14). Se estableció una constante 0 en la opción “Set Start Time (s)”, lo cual indica restablecerse nuevamente en el tiempo 0.

De la opción “Elapsed Time (s)” se obtuvieron tres conexiones. La primera dirigida a un condicionante: si es mayor a 0 será verdadera y se indica el tiempo de la lectura con ayuda de una estructura del tipo “Case”. La segunda dirigida al indicador numérico de tiempo transcurrido, previamente creado en el panel frontal. La tercera conexión incluye otra condicionante, y se establece que el tiempo sea mayor al tiempo de lectura ayudándonos de la creación de variables locales. Se conecta el botón de reinicio previamente creado en el panel frontal en la opción de “Reset”.

Los intervalos de lecturas se efectuaron mediante estructuras “Case” para lo cual se fijaron dos intervalos definidos en el programa: el primero es variable y el segundo es fijo, ya descritos. Se realizan las conexiones finales para guardar el archivo ayudándonos de los comandos creados previamente en el panel frontal, en tanto se termina el diagrama de bloques.

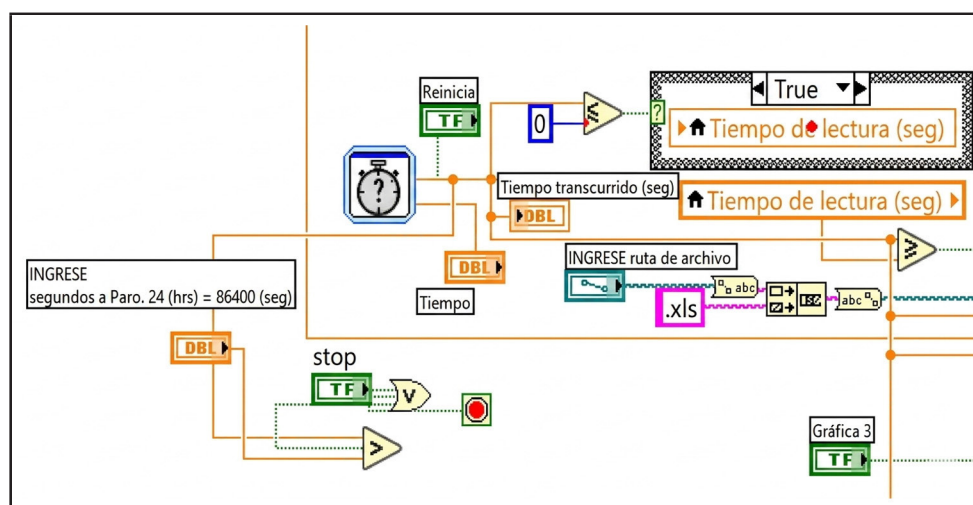


FIGURA 14
Tiempo transcurrido y duración de prueba
Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADOS

Una vez terminado el proceso de instrumentación, se procedió a las pruebas de consolidación unidimensional de suelos en cada uno de los tres equipos reacondicionados con material analizado. Para una prueba comparativa de control, se utilizó un suelo de referencia con parámetros de consolidación determinados en un equipo convencional no instrumentado con el objetivo de comparar los resultados y validar el sistema de medición. El material empleado se obtuvo de un sitio del municipio de Tarímbaro, en el estado de Michoacán de Ocampo, muy cerca de la ciudad de Morelia. Clasificado como un limo de alta plasticidad (MH) de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), sus propiedades se muestran en la tabla 3. El desarrollo de la prueba se hizo conforme a lo establecido en la norma ASTM D2435 M-11 (ASTM International, 2020).

La figura 15 presenta los consolidómetros operando simultánea e independientemente. Cada uno toma mediciones a su propio ritmo sin influir ni alterar los datos de los demás. Cada uno tiene su propio programa, controlados desde la misma computadora. Esto es útil para comparar diferentes tipos de suelos en condiciones similares o para pruebas paralelas. Las dimensiones de las muestras fueron de 50 mm de diámetro y 20 mm de altura; se aplicaron cuatro esfuerzos verticales de 50, 150, 300 y 640 kPa. Los incrementos de carga se reali-

zaron a cada 24 horas y posteriormente se descargó el suelo en los mismos intervalos. La duración total de la prueba fue de 8 días. Se cuidó el nivel de agua en la muestra inundada y se verificó que la carrera del sensor de desplazamiento LVDT estuviera dentro del intervalo de medición (figura 16). El programa guarda automáticamente el tiempo y la deformación vertical en un archivo .xls. La figura 17 registra los resultados de la curva de consolidación a 150 kPa en tiempo real.

TABLA 3
Características del suelo en estudio

Propiedad	Valor	Norma
Clasificación SUCS	MH	ASTM D2487
Densidad relativa de sólidos (S_s)	2.69	ASTM D854
Contenido óptimo de agua w_{opt} (%) (*)	34	ASTM D698
Peso volumétrico seco máximo γ_{dmax} (kN/m ³) (*)	12.327	

Fuente: elaboración propia.
Nota: * = prueba de compactación Proctor estándar.

La prueba de consolidación unidimensional finaliza al completar todo el ciclo de carga y descarga con sus respectivas curvas de consolidación y obtener el esfuerzo de preconsolidación. Este esfuerzo es el máximo al que ha sido sometido el suelo a lo largo de su historia geológica, el cual se obtiene al crear la curva de compresibilidad con los esfuerzos efectivos de cada incremento y la relación de vacíos obtenida al final de cada prueba mediante el método gráfico de Casagrande.

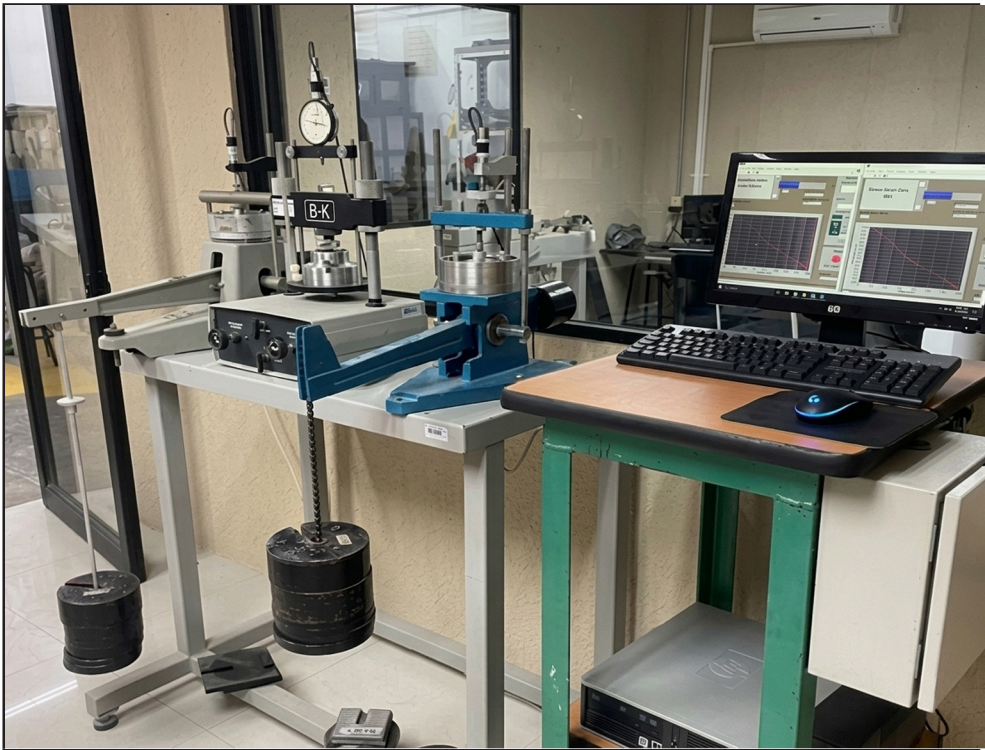


FIGURA 15
Consolidómetros en operación
Fuente: elaboración propia.

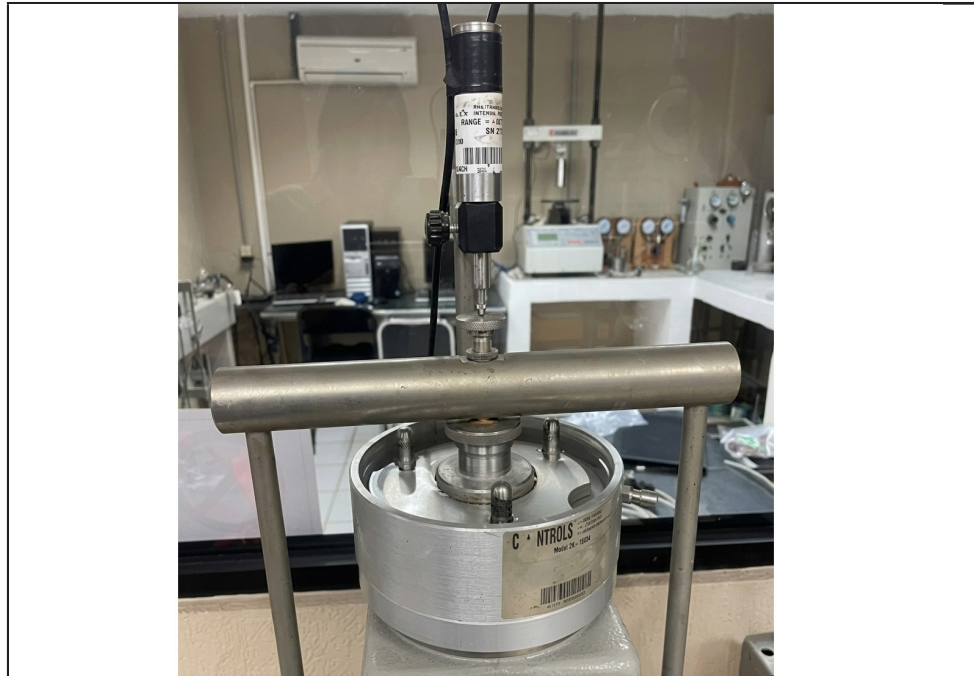


FIGURA 16

Muestra de suelo en consolidómetro unidimensional

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la curva de compresibilidad se muestran en la figura 17, en donde se presentan el esfuerzo de preconsolidación y el coeficiente de consolidación (C_c). Los resultados obtenidos en el análisis mostraron alta consistencia con los datos del espécimen control. Las mediciones y características observadas se encuentran dentro del rango esperado, lo que respalda la fiabilidad y precisión del procedimiento utilizado, además de la obtención de una curva de consolidación continua.

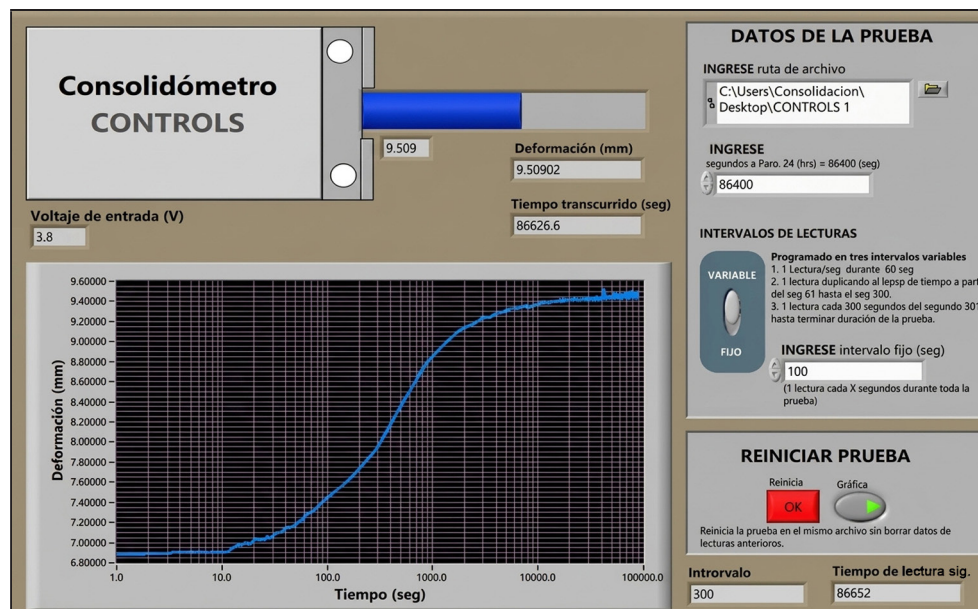


FIGURA 17

Curva de consolidación para un suelo MH con esfuerzo de 150 kPa

Fuente: elaboración propia.

PROSPECTIVA

La prueba de consolidación unidimensional de suelos permite estimar la deformación que experimenta un suelo a lo largo del tiempo bajo la aplicación de una carga constante y condiciones de drenaje unidireccional. Este trabajo resulta fundamental para predecir los asentamientos que podrían afectar a una estructura y, con ello, diseñar una cimentación adecuada. No obstante, en muchos laboratorios el equipo disponible para ejecutar esta prueba se encuentra limitado o en desuso. Una alternativa viable para restaurar estos equipos y extender su vida útil consiste en reacondicionarlos mediante la incorporación de instrumentos electrónicos. Esta estrategia permite operar los equipos antiguos con un desempeño comparable al de modelos más recientes, por lo que representa así una opción más económica frente a la adquisición de nuevos equipos.

El reacondicionamiento a través de instrumentación virtual posibilita las modificaciones o actualizaciones conforme a los requerimientos específicos que surjan durante su operación. En este contexto, el artículo tuvo dos objetivos principales: en primer lugar, reacondicionar equipos convencionales existentes y, en segundo lugar, semiautomatizar el procedimiento de la prueba de consolidación de suelos.

La ejecución convencional de esta prueba implica extensas jornadas de trabajo, ya que requiere la recopilación continua de datos durante al menos ocho días consecutivos. A ello se suma la influencia del operador que puede afectar la precisión del registro de tiempos y desplazamientos. En esta primera etapa de instrumentación se abordó exclusivamente la mejora en el registro y precisión de los datos mediante el uso de un sensor de desplazamiento lineal y una tarjeta de adquisición de datos de bajo costo.

Cabe destacar que si bien es técnicamente factible integrar algoritmos de procesamiento en tiempo real (como el método de Asaoka para detectar el final del proceso de consolidación) o incorporar alertas ante comportamientos anómalos, estas funcionalidades no fueron contempladas en esta fase inicial. El enfoque del artículo se limitó a establecer una base funcional robusta, accesible y reproducible centrada en la automatización del registro de datos.

No obstante, se proyecta que en futuras etapas, con mayores capacidades de procesamiento e integración, estas herramientas avanzadas se pongan en marcha para aumentar la autonomía y eficiencia del sistema. En la actualidad, el procedimiento aún requiere la intervención del operador cada 24 horas para realizar manualmente los incrementos de carga, descargar la información registrada y continuar con el análisis convencional. Sin embargo, considerando los avances continuos en sensores electrónicos y sistemas embebidos, se prevé que en un futuro próximo este proceso sea automatizado por completo, lo cual brindará resultados más confiables y fomentará el desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas a la ingeniería geotécnica.

La instrumentación electrónica tiene hoy en día una amplia gama de aplicaciones que van desde la ingeniería hasta la medicina y permite monitorear y controlar variables en tiempo real al optimizar procesos experimentales y operativos. La capacidad de los sensores para medir variables físicas como flujo, distancia o temperatura y transformarlas en señales eléctricas resulta clave para la obtención de datos precisos y confiables. En consecuencia, la instrumentación representa una herramienta esencial para impulsar la innovación debido a que facilita el desarrollo de nuevas tecnologías y dispositivos con aplicación en diversas áreas del conocimiento.

CONCLUSIONES

En este artículo se desarrolló una instrumentación semiautomática de bajo costo para tres equipos de consolidación unidimensional de suelos. Este sistema de adquisición de datos actualizado incrementa significativamente la fiabilidad de los resultados al reducir el margen de error humano y optimizar las horas laborales.

Además, el procesamiento en tiempo real facilita la toma de decisiones durante la prueba, ya que permite ajustar dinámicamente los intervalos de captura de datos. El uso de lenguajes de programación gráficos y tarjetas de adquisición accesibles ha creado una herramienta simple, pero potente para caracterizar con precisión el comportamiento de los suelos.

Al comparar esta instrumentación con opciones comerciales, como los consolidómetros digitales, la diferencia de costos es significativa. Mientras que estos últimos, con mayor precisión y automatización, tienen un rango de precios actual entre 5 000 y 15 000 USD, la instrumentación desarrollada con LabVIEW y Arduino utilizando LVDT tiene un costo aproximado de entre 130 y 575 USD. Esto representa una alternativa mucho más asequible sin comprometer la calidad de los datos obtenidos. Si bien los consolidómetros digitales ofrecen características avanzadas, la instrumentación de bajo costo se presenta como una opción viable, accesible y eficiente en el reacondicionamiento de equipos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la revista *CIENCIA ergo-sum* y a los árbitros por sus valiosas observaciones y sugerencias, las cuales contribuyeron de manera significativa a mejorar la estructura y el contenido del artículo. Asimismo, se reconoce el apoyo financiero brindado por Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti), así como el respaldo de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

REFERENCIAS

- ASTM International (American Society for Testing and Materials). (2020). *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. Designation ASTM D2435 M-11*. ASTM International.
- Das, B. M. (2017). *Shallow foundations: Bearing Capacity and Settlement*. CRC press.
- Goldberg, H. (2000). What is virtual instrumentation? *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 3(4), 10-13. <https://doi.org/10.1109/5289.887453>
- Head, K. H. (1992). *Manual of soil laboratory testing: Soil classification and compaction tests. Volume 1* (2nd ed.). Pentech Press.
- Head, K. H., & Epps, R. J. (2011). *Manual of soil laboratory testing: Permeability, shear strength and compressibility tests. Volume 2* (3rd ed.). United Kingdom: Whittles Publishing.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Honeywell. (2009). Model S3C DC-DC. Miniature Displacement Transducer. Golden Valley: Honeywell.
- Isah, B. W., & Mohamad, H. (2021). Surface-mounted bare and packaged fiber Bragg grating sensors for measuring rock strain in uniaxial testing. *Sensors*, 21(9), 2926. <https://doi.org/10.3390/s21092926>
- Jastrzebska, M. (2021). Modern displacement measuring systems used in geotechnical laboratories: Advantages and disadvantages. *Sensors*, 21(12), 4139. <https://doi.org/10.3390/s21124139>
- Jerome, J. (2010). *Virtual instrumentation using LabVIEW*. PHI Learning Pvt. Ltd. New Delhi.
- Karimpour-Fard, M., Zarbakhsh, S., Rezaie Soufi, G., Ahadi, A., & Naveen, B. P. (2020). Design, fabrication and calibration of a tall pneumatic oedometer apparatus. *Measurement*, 163, 107985. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107985>
- Motahhir, S., Chalh, A., El Ghzizal, A., Sebti, S., & Derouich, A. (2017). Modeling of photovoltaic panel by using proteus. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 10, 8-13. <https://doi.org/10.25103/jestr.102.02>
- Nurkowski, J., & Nowakowski, A. (2023). Inductive sensor for measuring linear displacement and velocity - Version with stationary magnetic core. *Measurement*, 222, 113675. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113675>

- Obrenovic, Ž., Starcevic, D., & Jovanov, E. (2006). Virtual Instrumentation. In M. Akay (Ed.), *Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering*. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/9780471740360.ebs1265>
- Saravanakumar, G., Wahidabanu, R. S. D., & Nayak, C. G. (2009). Performance analysis of various Smith predictors for integrating processes with longer dead-time. *International Journal of Automation and Control*, 3(2-3), 248-263. <https://doi.org/10.1504/IJAAC.2009.025245>
- Zetina, A., & Zetina, A. (1999). *Electrónica básica*. México: Limusa Noriega Editores.

CC BY-NC-ND



Disponible en: <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/23818>

Cómo citar el artículo:

Martínez Rojas, A., Pastor Gómez, N. y Chávez Negrete, C. (2026). Instrumentación virtual de bajo costo aplicada a equipos de consolidación unidimensional de suelos. *CIENCIA ergo-sum*, 33. <https://doi.org/10.30878/ces.v33n0a51>

DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v33n0a51>



Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Declaración de autoría (CRediT):

Alondra Martínez Rojas: conceptualización, investigación, metodología, *software*, visualización, redacción-borrador original y redacción-revisión y edición.

Nelio Pastor Gómez: metodología, *software*, validación y redacción-revisión y edición.

Carlos Chávez Negrete: conceptualización, metodología, administración del proyecto, recursos, supervisión, validación y redacción-revisión y edición.