



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

Martínez Rojas, A., Pastor Gómez, N. y Chávez Negrete, C. (2025). Instrumentación virtual de bajo costo aplicada a equipos de consolidación unidimensional de suelos [*Postprint*].

CIENCIA *ergo-sum*, 33. <https://doi.org/10.30878/ces.v33n0a51>

Sección: Ciencias Exactas y Aplicadas

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Esta versión del artículo es una “versión final del autor” que fue aceptada por un proceso de **evaluación por pares ciegos**. Este documento diferirá en formato respecto a la “versión del editor”, la cual se someterá a un proceso de corrección de estilo y de diseño editorial. De ninguna forma se modificará el contenido. Todas las ideas que se presentan son responsabilidad del autor.

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, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México¹

Correo electrónico: alondra.martinez@umich.mx

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

Nelio Pastor Gómez, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

Correo electrónico: npastor@umich.mx

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

Carlos Chávez Negrete, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

Correo electrónico: cachavez@umich.mx

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

Recepción: 29 de mayo de 2024

Aprobación: 30 de mayo de 2025

RESUMEN

Se instrumentaron 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. Se desarrolló una interfaz gráfica que permite registrar en tiempo real la deformación del suelo, mejorando la precisión mediante lecturas en intervalos cortos y reduciendo 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 instrumented with a low-cost virtual system using LVDT sensors, Arduino®, and LabVIEW® to retrofit 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

¹ Autor para correspondencia.

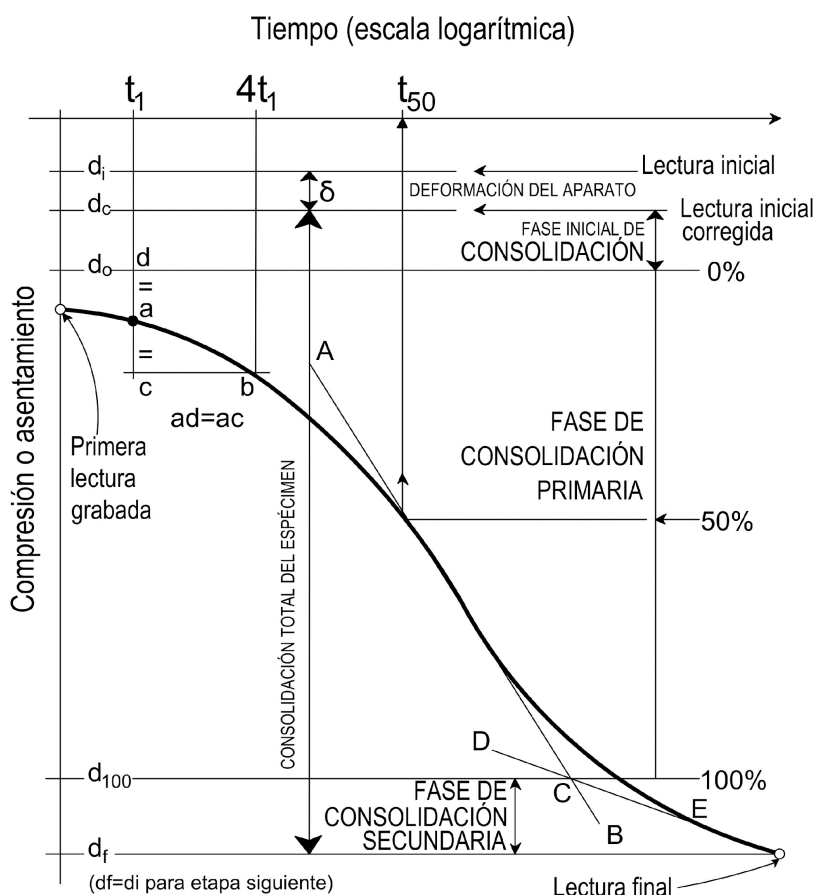
tipos de fuerzas, con la finalidad de conocer las características del material sobre el que se va a construir cualquier tipo de estructura (Das, 2017). Las características físicas de los suelos pueden determinarse mediante pruebas de laboratorio, y junto con la aplicación de métodos de análisis es posible 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 producen deformaciones, e incluso cuando es liberado ese esfuerzo, se recuperan parte de las deformaciones y otras son permanentes. Generalmente 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 & Kovacs, 1981). La deformación vertical total en la superficie resultante de la carga se llama asentamiento (Holtz & 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 puede causar daños estructurales, especialmente si dicho asentamiento ocurre rápidamente. Al incrementar la carga, se presenta un desplazamiento vertical, puede ser hacia abajo, en el caso de que la carga produzca una expulsión de agua, a este proceso se le conoce como consolidación; o hacia arriba cuando el suelo absorbe y/o adsorbe agua a su interior (proceso llamado expansión) (Holtz & Kovacs, 1981). Para fines analíticos, la consolidación de arcillas bajo carga en función del tiempo se puede dividir 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, son los principales objetivos de una prueba de consolidación de laboratorio (Head & 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”. El ensayo se realiza mediante la aplicación de una serie de cuatro a ocho cargas verticales a un espécimen de suelo, el cual está confinado lateralmente por medio de un anillo. La deformación vertical se observa y registra manualmente durante un periodo de tiempo, generalmente de 24 horas, para cada incremento de carga. El consolidómetro consiste esencialmente de 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.

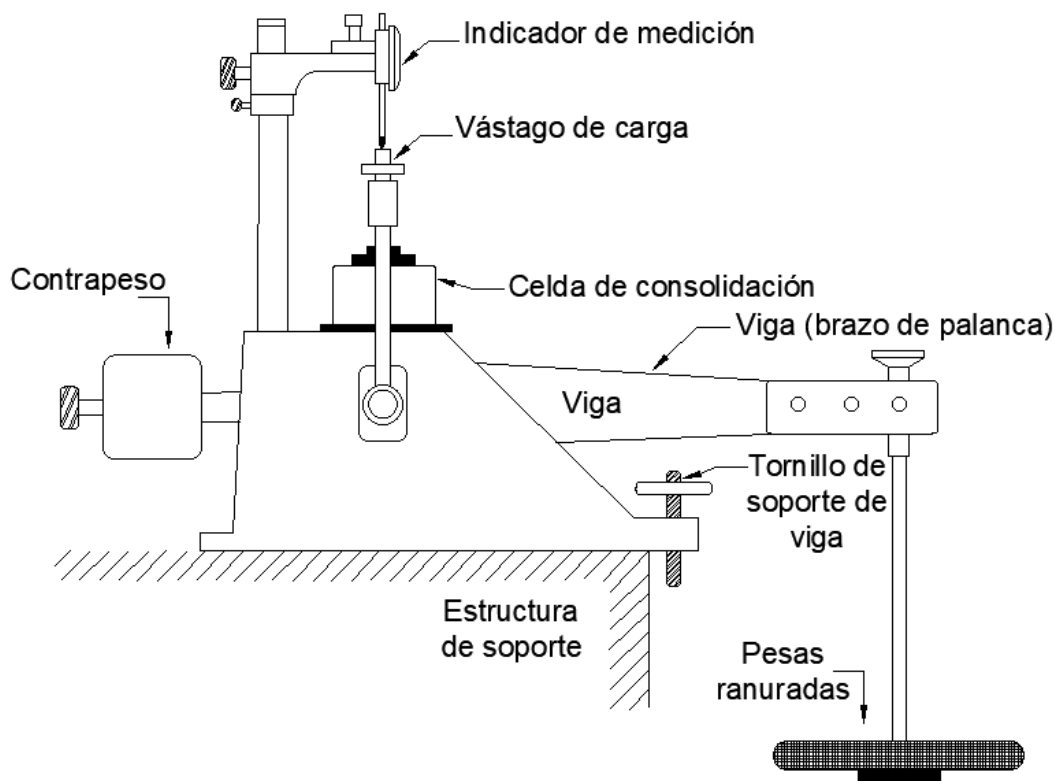
Figura 1
Curva típica de consolidación



Fuente: modificado de Head & Epps, 2011.

El consolidómetro, también conocido como edómetro, comúnmente 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), para realizar las pruebas se requiere de largas jornadas de trabajo, debido a que la captura de datos se realiza manualmente. Lo que hace necesario que el operador se encuentre midiendo constantemente durante toda la ejecución de la prueba.

Figura 2
Esquema del equipo convencional de consolidación



Fuente: modificado de Head & Epps, 2011.

En la actualidad, numerosos laboratorios realizan mediciones mediante equipos instrumentados electrónicamente, con captura y almacenamiento de datos utilizando 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 et al., (2020) presenta 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. Lo que les permitió obtener datos más exactos sobre el comportamiento de los materiales, minimizando errores humanos en la medición manual.

Jastrzebska, (2021) menciona que las mediciones realizadas durante las pruebas geotécnicas con el uso de sensores, permite 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 pueden medir desplazamiento y velocidad, su funcionamiento está basado en una bobina de una sola capa hecha de acero de resorte con un núcleo magnético fijo, funcionando junto con un oscilador. Nurkowski & 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. Demostraron que su diseño permite alta resolución, estabilidad y reducción de errores debido a la fricción.

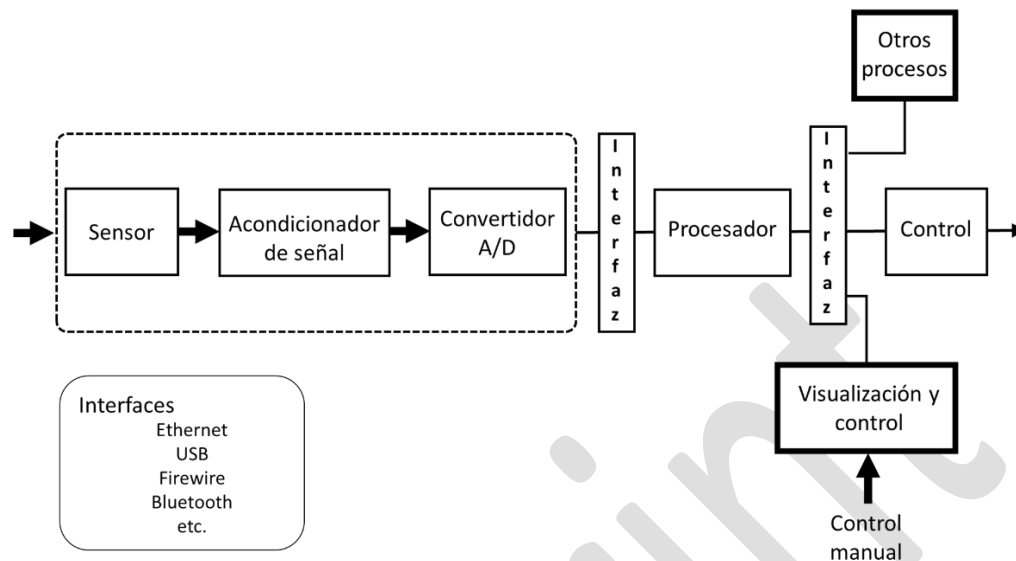
A pesar de la evolución de los sistemas de medición en laboratorios geotécnicos, principalmente en términos de precisión, aún existen desafíos en términos de costo y adaptabilidad a diferentes equipos (Isah & Mohamad, 2021). Por lo que el objetivo principal de este trabajo es realizar una instrumentación virtual semiautomática de bajo costo para tres equipos de consolidación unidimensional de suelos, utilizando del 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 utiliza iconos 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, ofreciendo 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 panel frontal es la interfaz de usuario del VI. 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 realizó utilizando una tarjeta de adquisición de datos Arduino® UNO; la cual es una placa de bajo costo (Motahhir et al. 2017), donde las mediciones se pueden adquirir directamente 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 puede programarse 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 realizar 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. Reduciendo 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

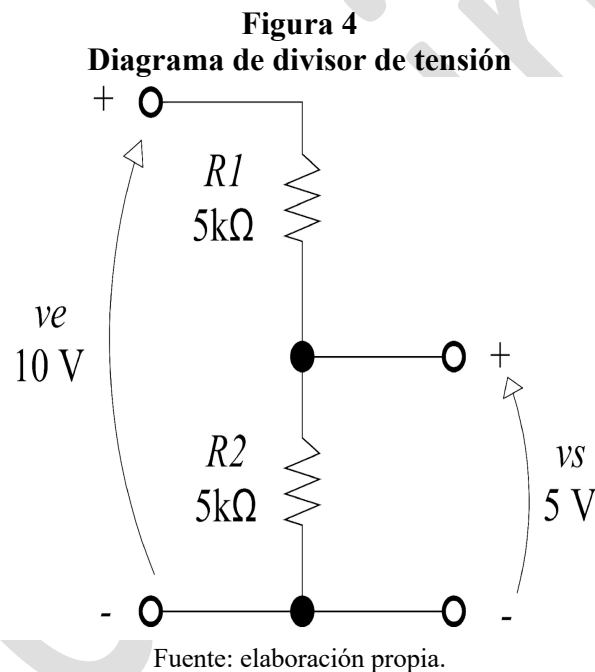
Fuente: Honeywell, 2009.

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 & Zetina, 1999). Se utilizaron 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 ecuación (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.

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

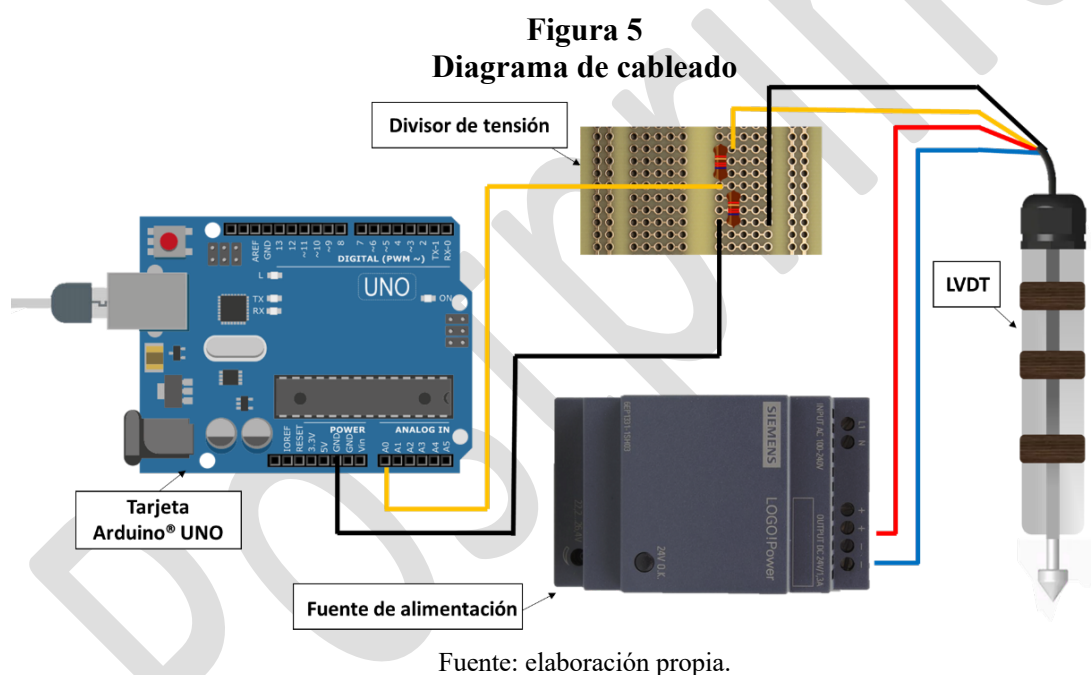
Dónde v_s es el voltaje de salida [V], v_e el voltaje de entrada [V], R_1 y R_2 representan las resistencias conectadas en serie, superior e inferior respectivamente [Ω]. Para este caso en particular el voltaje de entrada fue de 10V, las resistencias utilizadas fueron de $5k\Omega$ (resistencias de precisión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



Cuando el LVDT entrega su máxima salida de 10V, el divisor de tensión lo reduce exactamente a 5V, asegurando que el voltaje esté dentro del rango aceptable para la entrada analógica del Arduino®. Es importante resaltar que se utilizaron resistencias de precisión con tolerancia de $\pm 0.1\%$, lo que minimiza 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®, garantizando una conversión confiable.

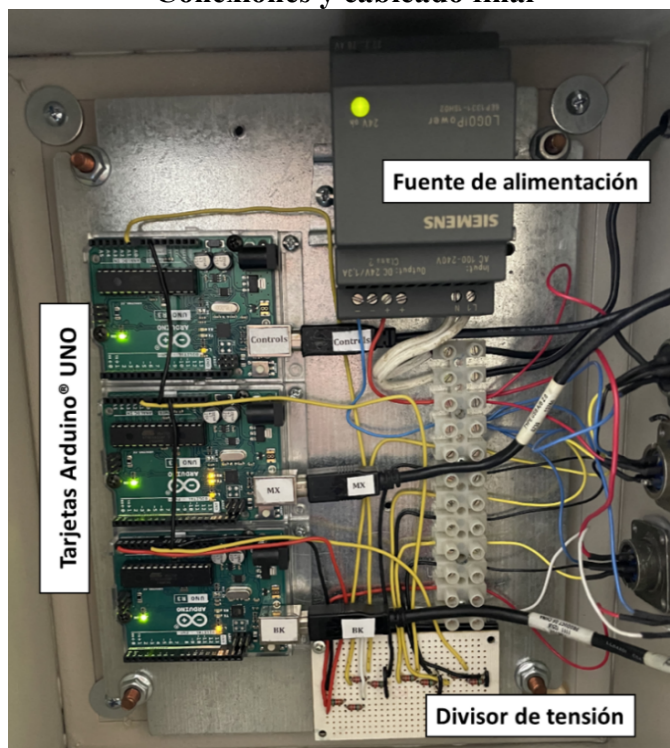
El ADC del Arduino® tiene una impedancia de entrada del orden de $100M\Omega$, lo que significa que el divisor de tensión no afecta significativamente la impedancia de entrada de la tarjeta

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 alimentar el LVDT, lo que garantiza 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 realizó por triplicado, es decir, se instrumentaron tres consolidómetros, de tal manera que cada uno funcione individualmente. Utilizando 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 6
Conexiones y cableado final



Fuente: elaboración propia.

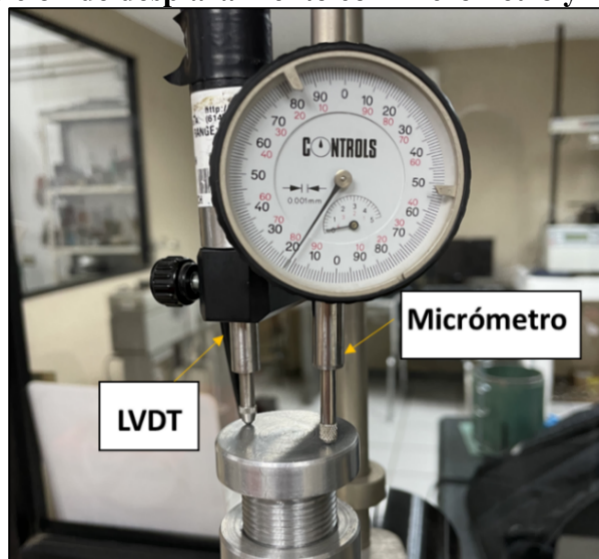
2. 2. Calibración del sensor de desplazamiento

Un método para calibrar el sensor de forma efectiva consiste en utilizar 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), el cual 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 utilizando un micrómetro y el sensor al mismo tiempo para la obtención de 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.

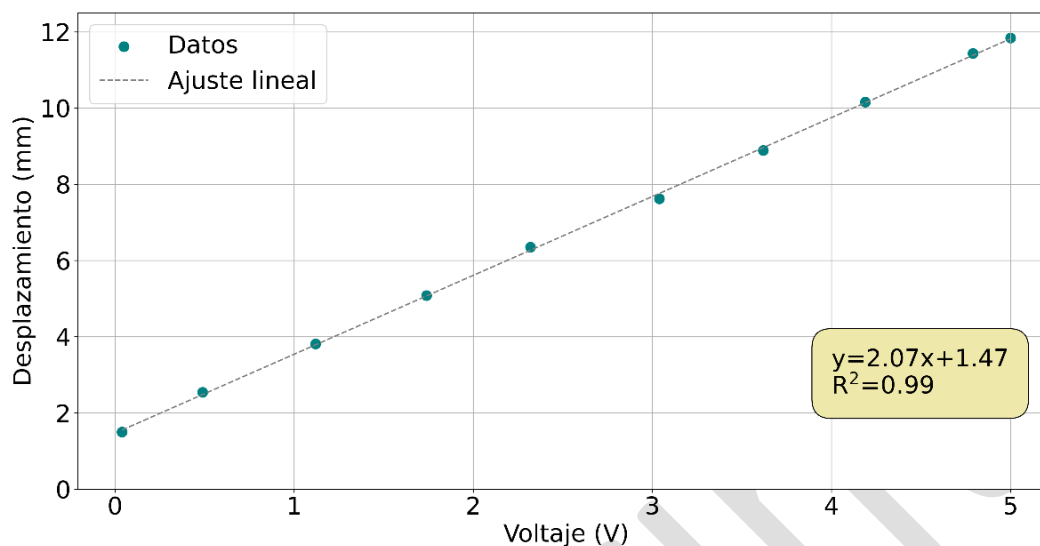
El conversor analógico-digital (ADC) de la placa Arduino® UNO tiene una resolución de 10 bits, lo que significa que convierte una señal analógica en 1024 niveles discretos ($2^{10} = 1024$), cuyo rango de entrada del ADC es de 0 - 5V, lo cual significa una resolución aproximada de 4.88 milivoltios por nivel. Al utilizar la ecuación de calibración, se determina la resolución del desplazamiento ($4.88 \times 2.07 = 10.1 \mu\text{m/nivel}$), esto indica que la mínima variación de desplazamiento detectable por el sistema es aproximadamente 10.1 micrómetros, suficiente para este tipo de aplicaciones. Si el sistema requiriera una mayor resolución, sería recomendable utilizar un ADC de mayor número de bits (12, 16 o más) o un amplificador de señal antes de la conversión A/D. La calibración realizada 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)	0.0 4	0.49	1.1 2	1.7 4	2.32	3.0 4	3.62	4.19	4.79	5.0
Micrómetro (mm)	1.5 0	2.54	3.8 1	5.0 8	6.35	7.6 2	8.89	10.1 6	11.4 3	11.8 4

Fuente: elaboración propia.

Figura 8
Curva de calibración del sensor de desplazamiento lineal LVDT



Fuente: elaboración propia.

2. 3. Software

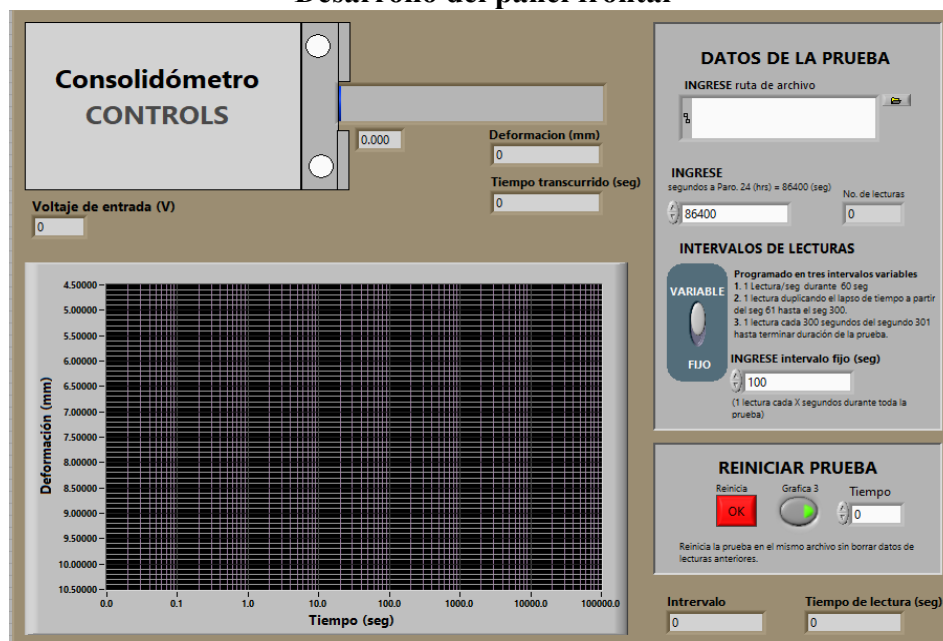
Dentro del software de LabVIEW® podemos encontrar una interfaz para comunicarse con plataformas embebidas comunes, cuyo nombre es LINX®. En este proyecto se trabajó con dicha interfaz para poder lograr la instrumentación virtual. Es importante tener presente que, cada bloque que se emplea del paquete 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. 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 realizadas. Se tienen dos intervalos de registro de lecturas, uno variable y otro fijo.

Figura 9
Desarrollo del panel frontal



Fuente: elaboración propia.

El intervalo variable se encuentra dividido en tres lapsos: el primero, registra una lectura por segundo durante 60 segundos; a partir del segundo 61, el periodo de registro se realiza en incrementos de tiempo equivalentes a potencias de 2, es decir, 2, 4, 8, 16, etc., obteniendo 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 (2020), las mediciones deben realizarse con la suficiente frecuencia para obtener datos precisos sobre la respuesta del suelo, en intervalos específicos según la naturaleza de la prueba. En el presente trabajo, se propone una frecuencia de registros de lecturas mayor, con la finalidad de tener continuidad en los resultados, a fin de poder detectar cambios más pequeños en la deformación. Se sigue lo estipulado por la norma, realizando 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 10
Indicadores de valores de entrada

The screenshot shows a control panel for a 'Consolidómetro'. It features three input fields: 'Voltaje de entrada (V)' with the value '0', 'Deformacion (mm)' with the value '0', and a field for '0.000' which likely represents the current entry number. The interface is titled 'Consolidómetro CONTROLS'.

Fuente: elaboración propia.

Figura 11
Datos de la prueba

The screenshot displays the 'DATOS DE LA PRUEBA' (Test Data) screen. It includes a file path input field labeled 'INGRESE ruta de archivo'. Below this, it shows 'INGRESE segundos a Paro. 24 (hrs) = 86400 (seg)' with a value of '86400' and 'No. de lecturas' with a value of '0'. The 'INTERVALOS DE LECTURAS' (Reading Intervals) section offers two options: 'VARIABLE' (Programado en tres intervalos variables) and 'FIJO' (INGRESE intervalo fijo (seg)). The 'FIJO' option is selected, showing an interval of '100' seconds. A note at the bottom states '(1 lectura cada X segundos durante toda la prueba)'.

Fuente: elaboración propia.

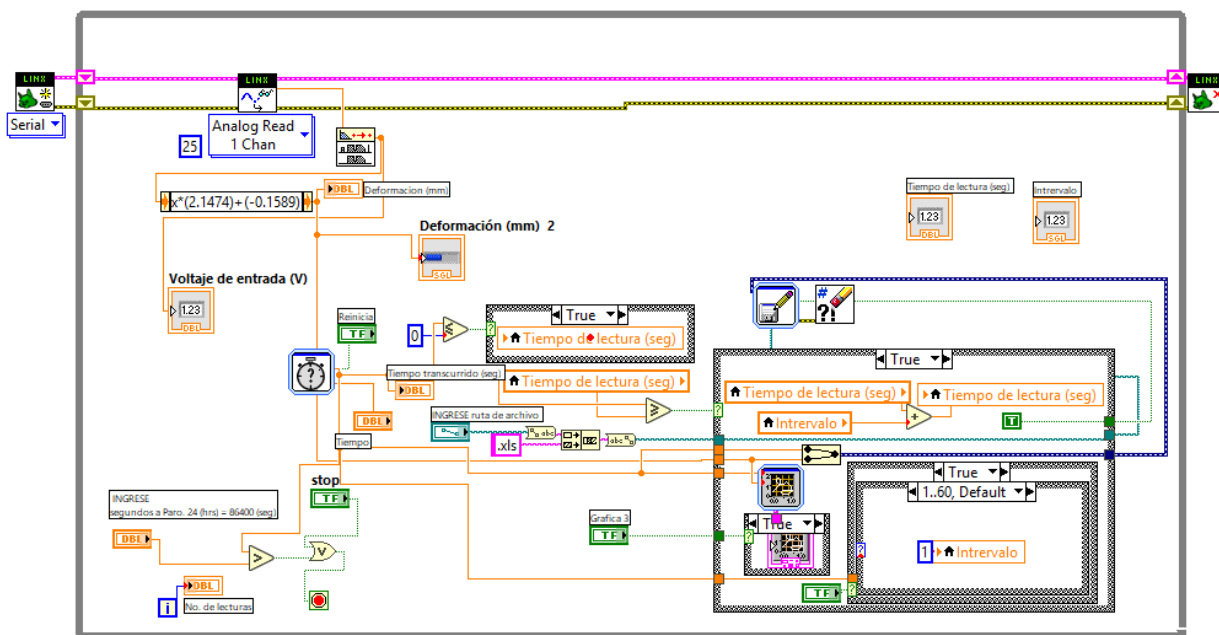
Durante la prueba, se visualiza en tiempo real cómo se deforma la muestra mediante una gráfica semilogarítmica [$\log(\text{tiempo})$ vs deformación (mm)]. Esta representación es útil al principio de la consolidación porque las deformaciones ocurren rápidamente. La escala logarítmica comprime estas variaciones 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 cero en la misma prueba, y el otro botón nos permite visualizar o dejar de visualizar la gráfica. El reinicio del tiempo a cero en la gráfica tiene como propósito esclarecer y reorganizar los datos de la prueba, puede 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.

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, iconos, funciones, y la interfaz LINX® utilizada 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).

Figura 12
Programación gráfica general mediante diagrama de bloques



Fuente: elaboración propia.

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.

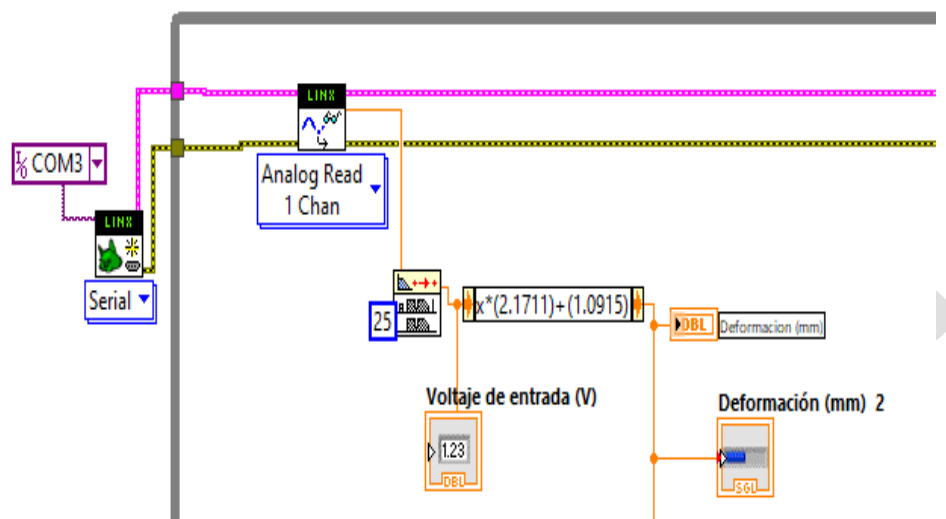
Como se mencionó anteriormente, en el programa se puede establecer un intervalo fijo para registro de lecturas, sin embargo, la tasa de muestreo se mantiene constante. Si solo se tomará una única lectura en lugar de un conjunto de datos a lo largo de todo el proceso, las fluctuaciones en los resultados podrían reflejar 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 utilizados. 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



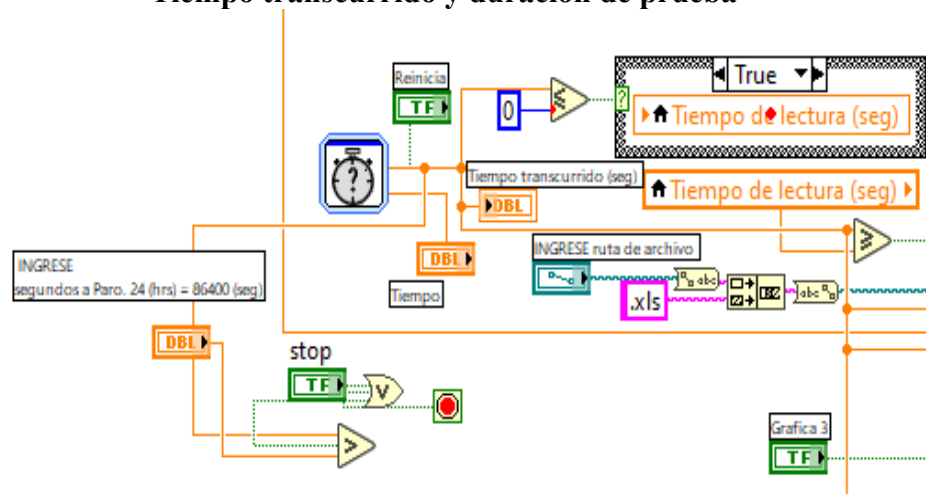
Fuente: elaboración propia.

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 cero en la opción “Set Start Time (s)” lo cual indica restablecerse nuevamente en el tiempo cero.

De la opción “Elapsed Time (s)” se obtuvieron tres conexiones. La primera dirigida a un condicionante, si es mayor a cero 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, estableciendo 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 realizaron mediante estructuras “Case”, para lo cual se fijaron dos intervalos definidos en el programa, el primero es variable, y el segundo es fijo, descritos previamente. Se realizan las conexiones finales para guardar el archivo, ayudándonos de los comandos creados previamente en el panel frontal. Terminando 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 realizar pruebas de consolidación unidimensional de suelos, en cada uno de los tres equipos reacondicionados, utilizando un material previamente analizado. Para realizar una prueba comparativa de control, se utilizó un suelo de referencia con parámetros de consolidación determinados en un equipo convencional no instrumentado. El objetivo fue comparar los resultados y validar el sistema de medición. El material utilizado 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 realizó conforme a lo establecido en la norma ASTM D2435 M-11 (2020).

La Figura 15 muestra 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 realizar 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 realizaron 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 muestra los resultados de la curva de consolidación a 150 kPa en tiempo real.

Tabla 3
Características del suelo en estudio

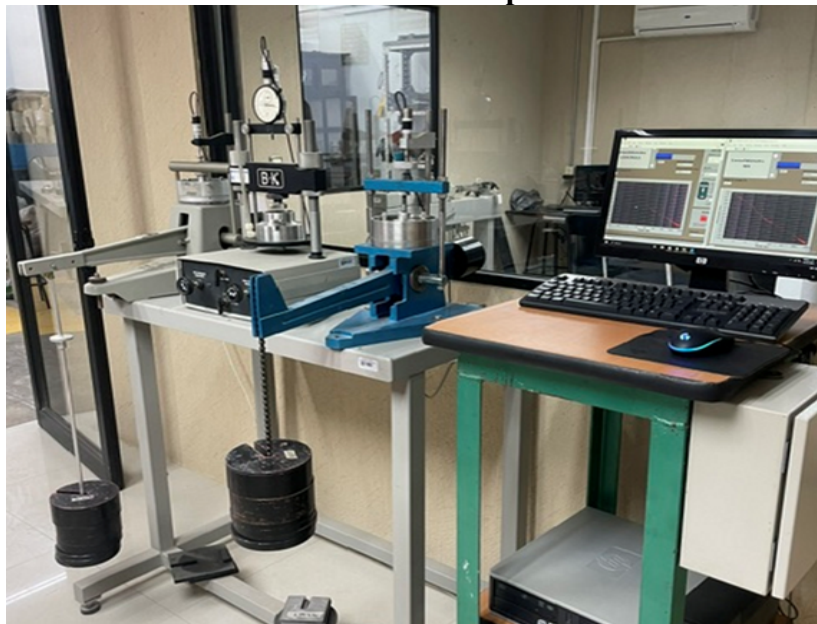
Propiedad	Valor	Norma
Clasificación SUCS	MH	ASTM D2487
Densidad relativa de sólidos (Ss)	2.69	ASTM D854
Contenido óptimo de agua, w_{opt} (%) (*)	34	ASTM D698
Peso volumétrico seco máximo, γ_{dmax} (kN/m³) (*)	12.327	

Fuente: elaboración propia.

(*) 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. Dicho esfuerzo se obtiene al crear la curva de compresibilidad, utilizando 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.

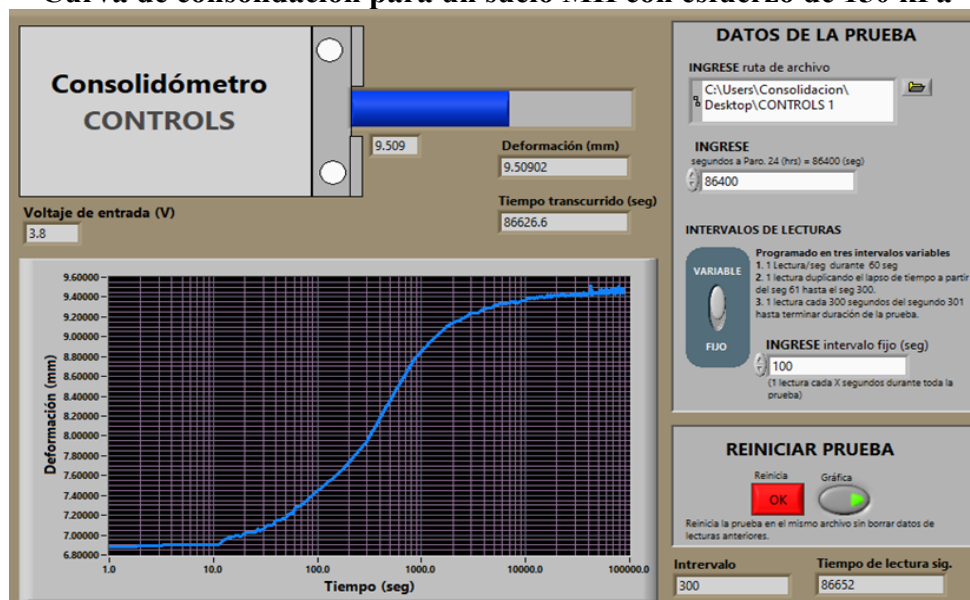
Figura 16
Muestra de suelo en consolidómetro unidimensional



Fuente: elaboración propia.

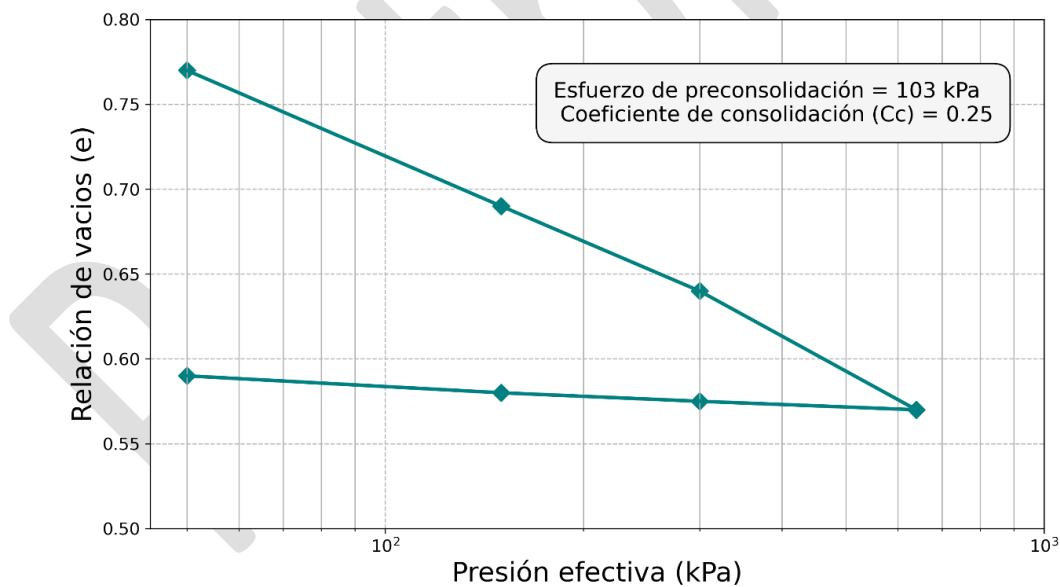
Los resultados de la curva de compresibilidad se muestran en la Figura 18, en donde se presentan el esfuerzo de preconsolidación y el coeficiente de consolidación (C_c). Los resultados obtenidos en el análisis mostraron alta consistencia con los datos del espécimen control. Las mediciones y características 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.

Figura 18
Curva de compresibilidad del suelo MH



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 ensayo 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, representando así una opción más económica frente a la adquisición de nuevos equipos.

El reacondicionamiento a través de instrumentación virtual posibilita la realización de modificaciones o actualizaciones conforme a los requerimientos específicos que surjan durante su operación. En este contexto, el presente trabajo tuvo dos objetivos principales: en primer lugar, reacondicionar equipos convencionales existentes, y en segundo lugar, semi-automatizar 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 presente estudio 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 puedan ser implementadas para aumentar la autonomía y eficiencia del sistema. Actualmente, 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 podrá ser completamente automatizado, 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, desde la ingeniería hasta la medicina, y permite monitorear y controlar variables en tiempo real, optimizando 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, facilitando el desarrollo de nuevas tecnologías y dispositivos con aplicación en diversas áreas del conocimiento.

CONCLUSIONES

En este trabajo 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, permitiendo 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

Los autores expresan su agradecimiento 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 presente trabajo. 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

- American Society for Testing and Materials, ASTM D2435 M-11, (2020). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.
- American Society for Testing and Materials, ASTM D2487, (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- American Society for Testing and Materials, ASTM D854, (2023). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method.
- American Society for Testing and Materials, ASTM D698-12, (2021). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).
- 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 Edition), Pentech Press.
- Head, K. H., & Epps, R. J. (2011). Manual of Soil Laboratory Testing: Permeability, Shear Strength and Compressibility tests. Volume 2 (3rd Edition), Whittles Publishing, Dunbeath, UK.
- 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. 008757-2-EN IL50 GLO.

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., Soufi, G. R., 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. <http://dx.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. Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering, Wiley.

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