

# Sistema de adquisición de datos automatizado para pruebas mecánicas uniaxiales y triaxiales

**Fernando Rivas Cruz**

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor., México 62490.

Correo: [fernando.rivas@iie.org.mx](mailto:fernando.rivas@iie.org.mx)

## Resumen

Se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo para realizar pruebas mecánicas uniaxiales y triaxiales aplicadas a muestras de roca de yacimientos petroleros, geotérmicos o mineros. El desarrollo permite conocer algunas de las características de la roca para evaluar la explotación de los recursos energéticos y minerales del subsuelo. El sistema muestra el monitoreo de las variables que intervienen en el proceso de pruebas mediante una interfaz gráfica y amigable para el usuario. Las pruebas se desarrollan mediante equipos especializados para simular las condiciones del subsuelo en el que se encuentra inmersa la muestra de roca. Los resultados se presentan en línea y con reportes detallados de las deformaciones y otros parámetros.

*Palabras clave:* Automatización, adquisición de datos, control de fuerza, esfuerzo mecánico, monitoreo.

## 1. Introducción

El conocimiento de las propiedades termofísicas, mecánicas, eléctricas y de transporte de las rocas es un aspecto importante para muchas aplicaciones relacionadas con actividades de localización, evaluación y explotación de los recursos energéticos y minerales del subsuelo, así como para otras áreas de interés científico y tecnológico que involucran el estudio de eventos en los que las rocas de la corteza terrestre actúan como elementos estructurales recipientes de contención y medios de transporte de fluidos y de energía mecánica y calorífica (Contreras, 1993).

El conocimiento de las propiedades de las rocas tiene varias áreas de aplicación como la industria petrolera, la geotermia, la minería, la construcción de túneles y presas, la selección y adecuación de sitios para depositar desechos tóxicos y radiactivos, por mencionar algunos ejemplos.

La localización, evaluación y aprovechamiento de los recursos energéticos y minerales del subsuelo dependen en gran medida del conocimiento de las propiedades de las rocas que lo conforman.

En una diversidad de sistemas subterráneos profundos como los yacimientos geotérmicos y petroleros, las rocas se encuentran sometidas a condiciones ambientales peculiares, alta temperatura, esfuerzos litostáticos y tectónicos, presión de poro e interacciones entre los fluidos de poro y roca. Estos parámetros ambientales pueden afectar en forma considerable las propiedades de las rocas (Contreras, 2007). La obtención de estos datos en sistemas subterráneos profundos sólo es posible a partir de mediciones en muestras de roca específicas del sitio de interés.

El Departamento de Geotermia del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) cuenta con un laboratorio especializado donde se obtiene información del comportamiento de las rocas en sistemas subterráneos profundos relacionados con las áreas de aplicación mencionadas. Además, se realiza la

medición de propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y de transporte de fluidos en muestras de roca sometidos a condiciones de alta presión y temperatura (Contreras, 1993).

Algunas otras pruebas y mediciones que se realizan en el laboratorio de yacimientos del IIE son, entre otras: compresión hidrostática, compactación, consolidación, medición de la permeabilidad absoluta, medición de la conductividad, medición del calor específico, medición de la resistividad eléctrica, deformación uniaxial y deformación triaxial.

A continuación se describen trabajos desarrollados con respecto a pruebas del tipo mecánico (uniaxial y triaxial). Las pruebas triaxiales se aplican de forma convencional en suelos agrícolas no saturados para determinar la influencia de la succión del suelo en la carga y el comportamiento del cambio de volumen (Wulfsohn et al., 1998). Okada y otros (2006) proponen un nuevo método para medir la relación esfuerzo-deformación en masas de roca. Las notas técnicas de aplicación se obtienen a partir de diferentes composiciones de roca. Se aplican pruebas mecánicas.

Con respecto a sistemas de monitoreo, Penumadu et al. (2004) presentan el desarrollo de un programa de pruebas de tipo virtual, en donde se realizan experimentos para complementar estudios y cursos de las características de rocas. Bilir y Muftuoglu (2004) rediseñaron un sistema de cómputo para pruebas del tipo triaxial que permite analizar el comportamiento de la relación esfuerzo-deformación para evitar los problemas encontrados durante y después de la construcción de estructuras.

La originalidad de este trabajo consiste en el desarrollo de un sistema capaz de monitorear y almacenar las variables implicadas en el proceso de pruebas mecánicas del tipo uniaxial y triaxial, según sean las características de la roca, así como la generación de reportes detallados durante y al final de la prueba. La aplicación se desarrolló con la herramienta de software comercial LabVIEW®.

## 2. Propiedades mecánicas de las rocas

La determinación de las propiedades mecánicas de la roca al punto de falla es parte de la especialidad de la mecánica de rocas e incluye el estudio de la deformación de las rocas, por lo que es necesario conocer conceptos fundamentales, como esfuerzo y deformación, para evaluar las propiedades de la roca.

### 2.1. Esfuerzo

Comúnmente denotado por  $\sigma$ , se refiere a la fuerza aplicada a la roca que tiende a cambiar de dimensión. La fuerza aplicada normalmente se refiere como carga:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo ( $\text{Pa}=1 \text{ N/m}^2$ ),  $F$  es la fuerza en N y  $A$  es el área de la muestra en  $\text{m}^2$ . Las tres condiciones básicas de esfuerzo son: a) tensión, b) compresión y c) esfuerzo cortante (ver Fig. 1).

### 2.2. Deformación

El efecto del esfuerzo aplicado a la roca es parte del estudio para medir la deformación producida por la aplicación de una carga. La deformación, comúnmente denotada por  $\epsilon$ , es el cambio relativo en la forma o el tamaño de la roca debido a la fuerza aplicada. En otras palabras se mide la deformación del material cuando se le aplica una carga (Dandekar, 2004; ver Fig. 2).

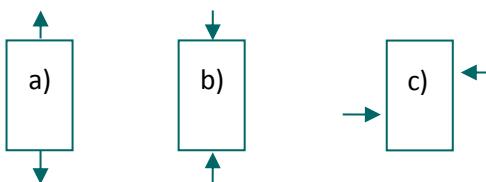


Fig. 1. Representación esquemática de esfuerzos.



Fig. 2. Deformación.

Por ejemplo, considerar un núcleo de una longitud original  $L_0$  que está sujeto a esfuerzo de tensión. Despues de aplicar la carga, la longitud original se incrementa a  $L$ , por lo que la deformación axial está definida como:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L} \quad (2)$$

Un núcleo es una muestra continua de roca que se obtiene de la formación mediante perforaciones con una barrena especial hueca, la cual es capaz de cortar tramos de roca de hasta 20 m de longitud con un diámetro máximo de 20 cm (Contreras, 2007).

### 2.3. Fallas mecánicas (relación esfuerzo-deformación)

La deformación se incrementa al aplicar un esfuerzo sobre algunos materiales durante un tiempo prolongado, ya que la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado. Si se retira la carga, el material regresa a su estado inicial, con cero deformación. A este fenómeno se le llama deformación elástica. Si el esfuerzo continúa incrementándose, alcanza el punto de saturación o de falla; la fuerza de la roca se supera y la deformación es permanente. A este fenómeno se le llama deformación plástica (ver Fig. 3).

En la Figura 4 se muestra la aplicación de un esfuerzo de compresión (par de pistones) y un esfuerzo de diferente magnitud aplicado a la circunferencia del cilindro (presión de confinamiento). Si la presión radial (confinamiento) es cero, y solo se aplica la compresión el proceso se denomina ‘prueba de esfuerzo uniaxial’. Cuando a la muestra se le realiza una prueba con presión de confinamiento diferente a cero y se aplica compresión, la prueba se denomina ‘prueba de esfuerzo triaxial’. Es posible obtener una gran variedad de estados reales de carga con esta prueba.

Una prueba triaxial usualmente se realiza al incrementar la carga axial (compresión) mientras la presión de confinamiento se mantiene constante, hasta que se alcanza el nivel de esfuerzo hidrostático. La carga axial normalmente se aplica de tal manera que se llegue a la condición de ruptura o deformación de la muestra. En la Figura 3 se muestra la relación esfuerzo-deformación en una prueba uniaxial.

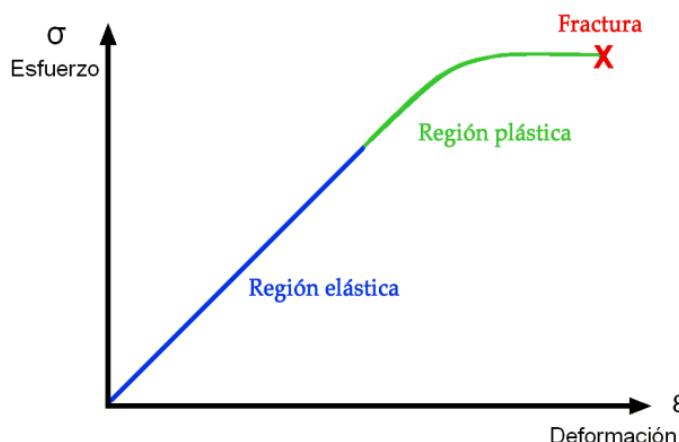


Fig. 3. Relación esfuerzo-deformación.

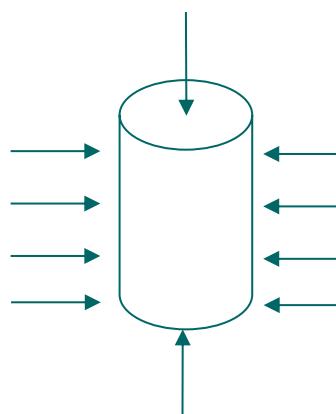


Fig. 4. Pruebas uniaxial y triaxial de muestras de roca de 38 mm de diámetro.

## 2.4. Descripción del proceso de pruebas

El Proceso de Pruebas Mecánicas (PPM) está diseñado con la capacidad de generar la carga aplicada a la roca, la presión de confinamiento, el monitoreo, almacenamiento y el procesamiento de los datos en los ensayos de compresión uniaxial y triaxial ejercidas sobre muestras de núcleos de rocas.

### Ensayo de compresión Uniaxial

Para el ensayo de tipo uniaxial la roca se coloca en el equipo, del cual se aplica una carga de compresión hasta llevarla a la fractura. Se adquieren los datos de carga, deformación axial y transversal mediante sensores LVDTs (*Linear variable differential transformer*) conectados en un arreglo mostrado en la Figura 5. Un LVDT es un dispositivo sensor que mide el desplazamiento lineal para transformarlo en una señal eléctrica en milivolts. Cada uno de los sensores se conecta a la etapa de acondicionamiento de señal, tarjeta de adquisición de datos y a la computadora de adquisición de datos.

### Ensayo de compresión Triaxial

En este caso, la muestra de roca se deposita en una camisa donde se le aplica presión de confinamiento, se mantiene a una presión determinada y se le aplica la carga de compresión. Esta carga se aplica hasta que la roca llega a su fractura. El arreglo de esta prueba se muestra en la Figura 6.

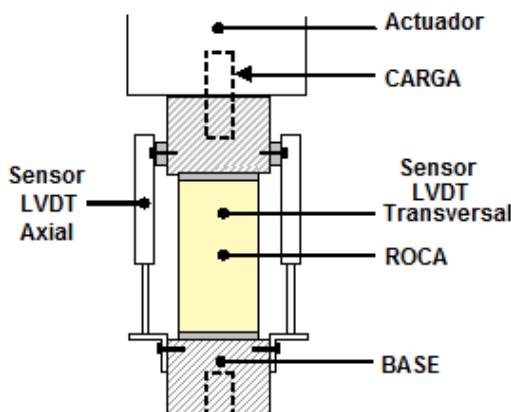


Fig. 5. Arreglo de ensayo Uniaxial.

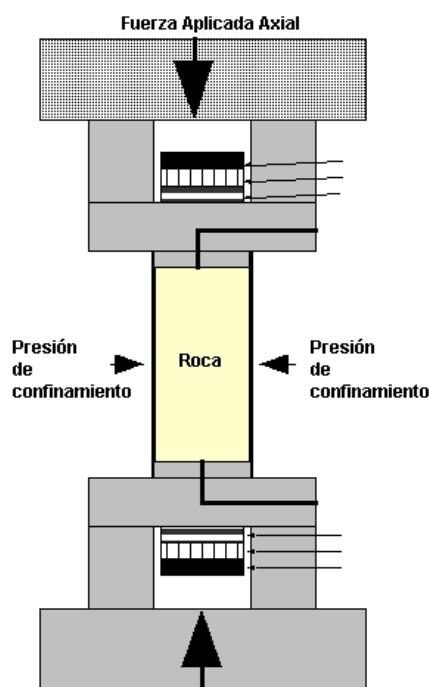


Fig. 6. Arreglo de ensayo Triaxial.

### 3. Sistema de adquisición de datos

Se utilizó un equipo experimental configurado alrededor de una máquina de compresión para pruebas mecánicas, equipada con un sistema de control manual (no servo-controlado) para regular la rapidez de aplicación de la carga, con capacidad para aplicar niveles de carga axial compresiva de hasta 150 toneladas (ver Fig. 7).

La muestra se instrumenta con los sensores adecuados para medir deformaciones axiales en función de la carga aplicada. La deformación axial se mide con un dispositivo que utiliza como elementos sensores dos transformadores diferenciales linealmente variables (LVDT), con rango de medición nominal de  $\pm 0.1''$ , resolución infinita y respuesta altamente lineal dentro de su rango de medición nominal.

La deformación transversal se mide en la parte media de la muestra en una dirección diametral, empleando un dispositivo sensor tipo cantiléver instrumentado con extensómetros eléctricos. La deformación de la muestra en la dirección radial propicia que en el sensor se genere un voltaje de salida que es linealmente proporcional a la magnitud de dicha deformación.



Fig. 7. Sistema de control manual no servocontrolado.

Todos los sensores primarios (LVDTs) que se utilizaron para medir las deformaciones axial y transversal fueron calibrados mediante la aplicación de valores conocidos de desplazamiento o de deformación que se generaron y midieron con micrómetros de alta exactitud, los que a su vez están calibrados por un laboratorio acreditado contra un instrumento patrón. En la Figura 7 se muestra un anillo dinamométrico integrado con un indicador de carátula con el que se calibra la celda de carga, la cual aplica la fuerza necesaria para deformar la muestra de roca instrumentada, de aproximadamente 1.5" de diámetro y 4" de longitud.

La calibración de la celda de carga se realiza con base a un sistema patrón que indica la relación de desviaciones micrométricas-carga aplicada. La relación de desviaciones se correlaciona con la carga aplicada y el voltaje del sensor de presión, como se puede ver en la Figura 8. La calibración indica que a 0 volts de corriente continua no hay carga aplicada y aproximadamente 10 volts equivalen a 40,000 kg fuerza.

Los sensores de desplazamiento diferencial (LVDTs) se calibran mediante el uso de micrómetros. La relación del desplazamiento en milímetros (mm) genera una señal de voltaje de corriente directa de 0-10 Volt al aplicar los acondicionadores de señal (ver Fig. 9).



Fig. 8. Calibración de la celda de carga.

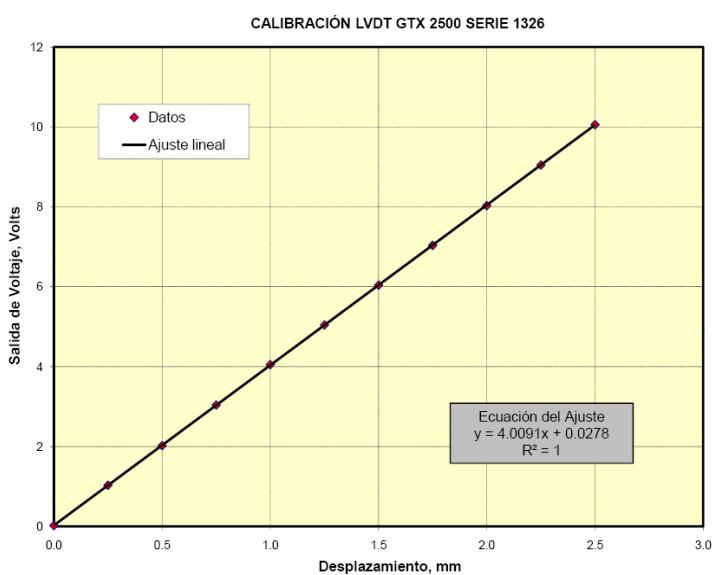


Fig. 9. Calibración de los sensores LVDT.

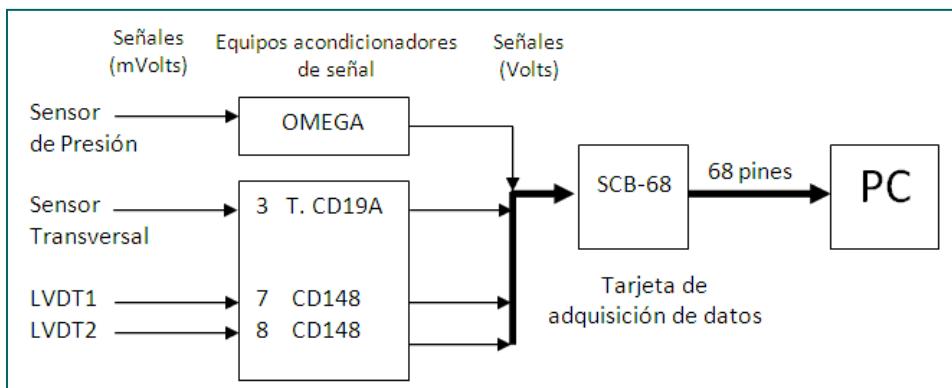


Fig. 10. Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos.

Los sensores previamente calibrados se conectan a la electrónica necesaria para generar las señales de desplazamiento y de carga (señales de voltaje de corriente directa, 0- 10 volts). En la Fig. 10 se muestra el diagrama de bloques de la conexión entre sensores, acondicionadores de señal y tarjeta de adquisición de datos conectados a la computadora.

#### 4. Desarrollo del sistema de adquisición de datos

Para el control del SPM (Sistema de Pruebas Mecánicas) se requiere de una programación que proporcione una interfaz gráfica donde el usuario pueda seguir la evolución de las variables censadas en línea. LabVIEW® es el entorno de programación gráfica capaz de cumplir con estas necesidades, además de realizar las tareas de adquisición, análisis y presentación de los datos.

En el diseño del sistema de monitoreo hay que realizar cuatro operaciones principales: a) aplicación de control de botones y barra de menú; b) aplicación de lectura de datos de la instrumentación, c) aplicación de almacenamiento de datos de todas las variables; d) aplicación de ejecución de acciones.

A partir de esas consideraciones se genera un diagrama de flujo principal encargado de monitorear los dispositivos del proceso de pruebas mecánicas (Fjaer et al., 1992). En la Figura 11 se muestra el diagrama de flujo principal y las operaciones que se ejecutan simultáneamente utilizando ciclos while.

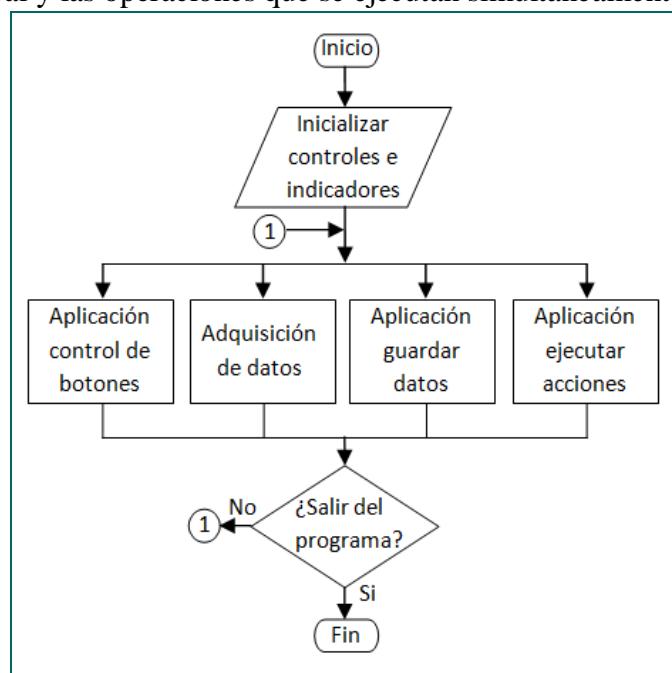


Fig. 11. Programa principal SPM.

A continuación se explican los sub-diagramas principales en el desarrollo del sistema de pruebas mecánicas aplicadas a muestras de núcleos de roca.

##### *Iniciar controles e indicadores*

Este subprograma se encarga de asignar un valor igual a cero a los controles e indicadores de la pantalla principal del sistema de monitoreo antes de iniciar la prueba. Se incluye la rutina para indicar los parámetros de tipo de prueba, muestra, diámetro, longitud, T muestreo.

**Aplicación control de botones**

Estructura de casos que permite llamar a la acción indicada en la barra de menú o botones.

**Adquisición de datos**

Consiste en la ejecución de un ciclo que adquiere los datos de cada uno de los elementos que constituyen el SPM en tiempo real.

**Aplicación ejecutar acciones**

En este subprograma se ejecutan las aplicaciones dadas desde la barra de menú como son graficación en tiempo real, tabla de datos, etc. Estos procesos se realizan en paralelo.

**Aplicación guardar datos**

Almacena los datos para generar el reporte en formato MS-Excel. El tiempo de muestreo es variable mediante el selector del tiempo de adquisición de datos. Se almacenan tres tipos de archivos:

1. Archivo de especificaciones del tipo de prueba y las características de la roca (diámetro, longitud, etc.).
2. Archivo de adquisición de datos de las variables de prueba (en unidades de ingeniería). El formato es en hoja de cálculo y en el nombre del archivo se especifica el año, mes, día y nombre la muestra.
3. Archivo de respaldo de la adquisición de datos en voltajes.

## 5. Resultados

Con el objetivo de verificar la funcionalidad de cada aplicación del sistema de pruebas mecánicas y con base a las normas establecidas, se realizan pruebas de la puesta en marcha del SPM a muestras de rocas. La norma para las pruebas uniaxiales es la *Standard test method for elastic moduli of intact rock core specimens in uniaxial compression* (ASTM, 2002a). Para las pruebas triaxiales la norma es la *Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurement* (ASTM, 2002b).

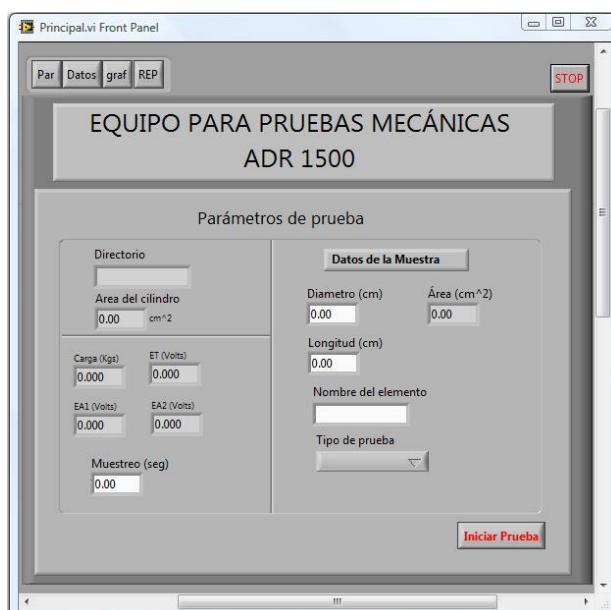


Fig. 12. Programa principal SPM.

La Figura 12 muestra la interfaz del sistema de monitoreo SPM. La pantalla principal contiene elementos como almacenamiento de datos, diámetro y longitud de la muestra, cálculo del área, nombre de la muestra (dadas por el cliente), tipo de muestra, tiempo de muestreo (variable). Los resultados son la etapa de graficación, que permite al usuario conocer el comportamiento de la deformación axial y transversal.

La Figura 13 muestra el efecto de la presión sobre la resistencia a la compresión y sobre el comportamiento general del esfuerzo-deformación con compresión uniaxial. Se aprecia que al incrementarse la presión la deformación axial y transversal se incrementan.



Fig. 13. Graficación en línea de las deformaciones axial y transversal.

La Figura 14 muestra la ventana de adquisición de datos en tiempo real. Aparecen los datos de tiempo de adquisición, voltajes, carga y esfuerzo, por mencionar algunos.

## 6. Generación de Reportes

Para las pruebas de compresión uniaxial, en el Sistema de Pruebas Mecánicas se genera la gráfica en tiempo real del comportamiento de la muestra al aplicarle presión a la misma. Se genera adicionalmente el reporte a detalle (ver Fig. 15) con la finalidad de entregar al cliente detalles de las pruebas realizadas. Para este caso algunos datos adicionales en el reporte son: longitud de la muestra, diámetro, área, esfuerzo hasta fractura de la roca donde termina la prueba y el nombre de la muestra.

Otra característica del reporte final es la generación de las gráficas de los Círculos de Mohr. Esta es una técnica usada en ingeniería y geofísica para representar gráficamente un tensor simétrico y calcular con ella momentos de inercia, deformaciones y tensiones, adaptándolos a las características de una circunferencia (radio, centro, etc.). También es posible el cálculo del esfuerzo cortante máximo absoluto y la deformación máxima absoluta. En la Figura 16 se muestra el resultado de graficar los Círculos de Mohr a diferentes muestras de roca del mismo grupo litológico. Se entiende por grupo

litológico el total de muestras obtenidas de un núcleo de perforación, en la cual el núcleo tiene las mismas características de tamaño de grano, partículas, características físicas y químicas.



Fig. 14. Datos en línea.

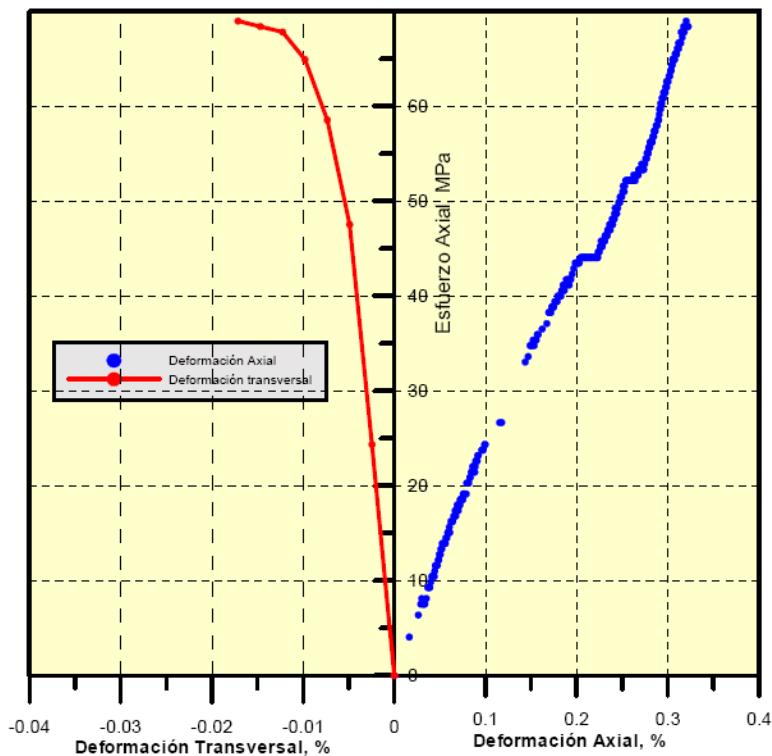


Fig. 15. Datos en línea de las deformaciones.

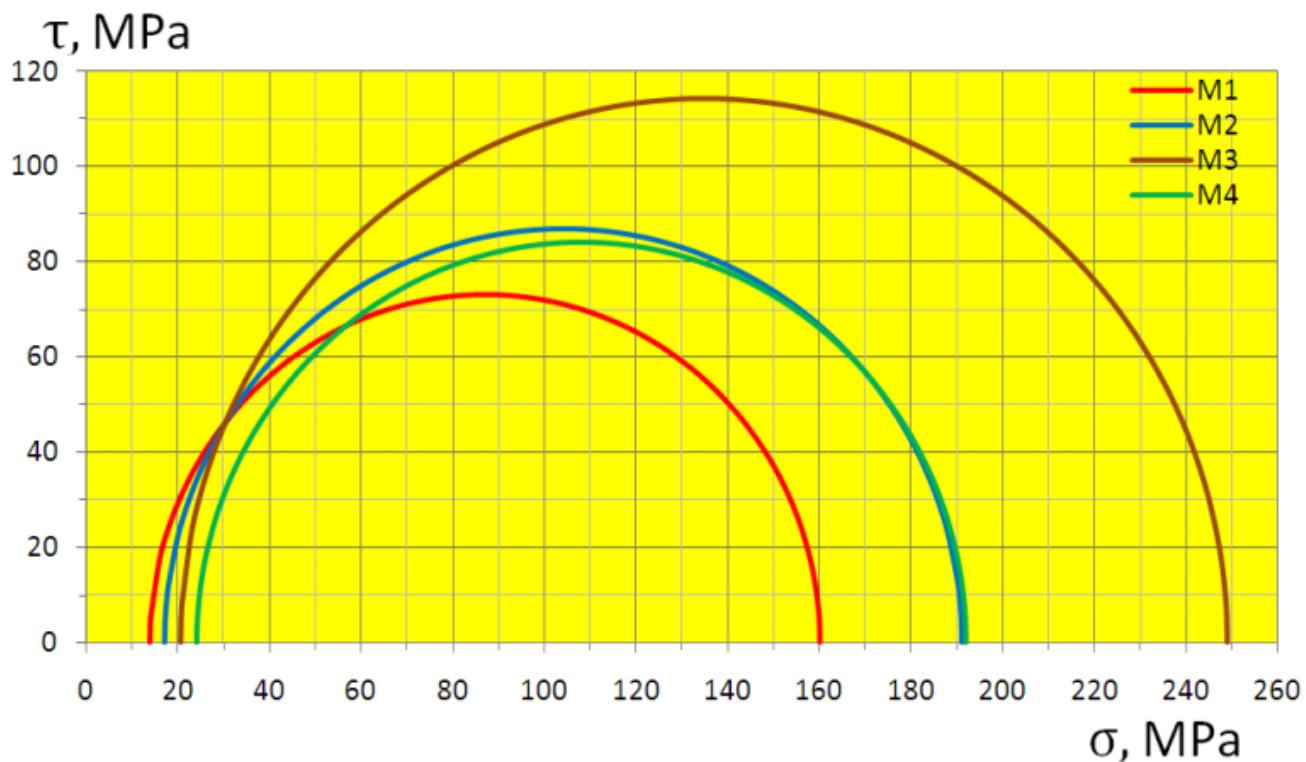


Fig. 16. Resultados y graficación de Círculos de Mohr.

## 7. Conclusiones

El sistema desarrollado permite monitorear las diversas variables físicas que intervienen en el proceso de pruebas mecánicas. Esta aplicación en tiempo real tiene la gran ventaja de analizar el comportamiento del proceso para la toma de decisiones durante la ejecución del mismo, con la finalidad de mejorar el desempeño del proceso y finalmente incrementar el nivel de confiabilidad en las pruebas y los niveles de seguridad, ya que la fuerza aplicada a una roca puede llegar hasta las 45 toneladas.

La importancia del SPM es que permite disponer de un sistema de adquisición de datos a bajo costo de instrumentación y permite un control óptimo y de gran calidad de una manera efectiva y flexible.

Se sistema se probó al colocar muestras de roca y aplicar diferentes pruebas uniaxiales y triaxiales. El sistema genera reportes detallados de la prueba en formato MS-Excel.

## Referencias

- ASTM, 2002(a). *Standard test method for elastic moduli of intact rock core specimens in uniaxial compression*. American Society for Testing and Materials, Committee D18 on Soil and Rock. Designation: D 3148-02. April 2002.
- ASTM, 2002(b). *Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurement*. American Society for Testing and Materials, Committee D18 on Soil and Rock. Designation: D 2664-95a. June 2002.
- Bilir, M., and Y. Muftuoglu, 2004. A computer-controlled triaxial swelling test apparatus. *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*. Vol. 28, pp. 269-280.

- Contreras López, E., 1993. Determinación de propiedades mecánicas y térmicas en muestras de roca sometidas a condiciones de alta presión y temperatura. Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas, Taxco, Guerrero.
- Contreras López, E., 2007. Importancia de las actividades de planificación, corte, manejo y análisis de los núcleos de perforación de pozos petroleros. Boletín interno del Instituto de Investigaciones Eléctricas, Año 31, Julio-Septiembre 2007.
- Dandekar, A., 2004. *Petroleum reservoir rock and fluid properties*. Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-8493-3043-8.
- Fjaer, E. et al., *Petroleum related rock mechanics*. Elsevier Science Publishers B.V., Netherlands. ISBN: 0-444-88913-2.
- Okada, T., K. Tani, H. Ootsu, Y. Toyooka, T. Hosono, and S. Kaneko, 2006. Development of in-situ triaxial test for rock masses. *International Journal of the Japanese Committee for Rock Mechanics*, Vol. 2, November 2006.
- Penumadu, D., A. Prashant and D. Frost, 2004. A virtual triaxial compression test simulator. *17<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference*, University of Delaware, Newark, DE, June 2004.
- Wulfsohn, D., A. Bankole and D. Fredlund, 1998. Triaxial Testing of Unsaturated Agricultural Soils. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 69, pp. 317-330.